Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!
Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

**В. А. Петросов**

# УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДОСНАБЖЕНИЯ

Харьков
Издательский дом «ФАКТОР»
2007

ББК 65.28(4Укр)
П31

Цю книгу захищено авторським правом, а описані в ній процеси — патентами на винаходи і корисні моделі. Жодну з частин книги не може бути відтворено чи передано в будь-якій формі або в будь-який спосіб, електронний чи механічний, включаючи фотокопіювання, звукозапис, або будь-якою інформаційною чи пошуковою системою, крім як у формі коротких уривків чи цитат для цілей огляду, без письмового дозволу автора.

---

**Петросов В. А.**

П31 Стійкість водопостачання. — Х.: Фактор, 2007. — 360 с.
ISBN 978-966-312-749-1.

У книзі подано результати багаторічних досліджень багатофакторної залежності зміни гідравлічних опорів водоводів з часом їх експлуатації, дослідження рівня водоспоживання в містах, розташованих у різних природно-кліматичних зонах СНД, запропоновано математичну модель багатофакторного впливу навколишнього середовища на водоспоживання населення з урахуванням початку глобальної зміни клімату на Землі.

Викладено принципово нові підходи до розрахунків системи подачі та розподілу води (ПРВ) в умовах АСУВ, оцінки відмов у роботі елементів ПРВ, прогнозу та рекомендації пошуку оптимальних рішень щодо заміни технічно зношених водопровідних мереж, оцінки непродуктивних втрат води в житловому фонді міста тощо.

Висвітлено проблеми, пов'язані зі зброєю першого удару — ОР, БЗ, РР для масового знищення людей через системи водопостачання, розробленою в деяких країнах Європи та США. Надано рекомендації та технічні рішення щодо підвищення безпеки водозабезпечення міст і контролю якості води.

Книгу розраховано на наукових співробітників, інженерно-технічних працівників науково-дослідних і проектних організацій, служб експлуатації систем водопостачання, хіміків, санітарних лікарів, студентів, фахівців, які забезпечують безпеку держави.

**ББК 65.28(4Укр)**

ISBN 978-966-312-749-1

© Видавничий будинок «Фактор», 2007

# СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ. ..... 6

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ ..... 11

1.1. Существующие методы определения гидравлических сопротивлений водоводов ..... 11

1.2. О расчете потокораспределения в узлах водосети ..... 15

1.3. Влияние глобального изменения климата на водопотребление ..... 25

1.4. Анализ работы систем подачи и распределения воды ..... 29

1.5. Применение АСУ в системах водообеспечения ..... 34

1.6. Выбор направления исследований. Цель и задачи ..... 37

ГЛАВА 2. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ..... 39

2.1. Методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ ..... 39

2.2. Метод расчета водопотребления городов ..... 46

2.3. Методика расчета интенсивности отказа водораспределительных сетей ..... 48

2.4. Методика расчета изменений давления в сети ПРВ насосной станции № 25А при гидравлическом ударе ..... 49

2.5. Методика оценки утечек воды в жилом фонде городов ..... 53

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ВОДОВОДОВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЕГО РАСЧЕТА ..... 54

3.1. Предпосылки к исследованию коэффициента гидравлического сопротивления ..... 54

3.2. Натурные исследования коэффициента гидравлического сопротивления водоводов диаметром 1200, 1400, 1600 мм ..... 58

*3.2.1. Исследования коэффициента гидравлического сопротивления водовода диаметром 1200 мм* ..... 58

*3.2.2. Исследования коэффициента гидравлического сопротивления водовода диаметром 1400 мм (источник воды — река Северский Донец)* ..... 68

*3.2.3. Исследования коэффициента гидравлического сопротивления водовода диаметром 1600 мм (источник воды — река Северский Донец)* ..... 72

*3.2.4. Исследования коэффициента гидравлического сопротивления водовода диаметром 1400 мм (источник воды — река Днепр)* ..... 76

*3.2.5. Исследования парных зависимостей* $\lambda = f(Re)$ *и* $\lambda = f(\overline{\Delta})$ *водовода диаметром 1200 мм с построением двухфакторной регрессионной зависимости* $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$ ..... 81

*3.2.6. Исследования парных зависимостей* $\lambda = f(Re)$ *и* $\lambda = f(\overline{\Delta})$ *водовода диаметром 1400 мм и построение двухфакторной регрессионной зависимости* $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$ ..... 89

*3.2.7. Исследования парных зависимостей* $\lambda = f(Re)$ *и* $\lambda = f(\overline{\Delta})$ *водовода диаметром 1600 мм и построение двухфакторной регрессионной зависимости* $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$ ..... 96

*3.2.8. Исследования парных зависимостей* $\lambda = f(Re)$ *и* $\lambda = f(\overline{\Delta})$ *водовода диаметром 1400 мм (источник воды — река Днепр) и построение двухфакторной регрессионной зависимости* $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$ .....103

3.3. Методика оценки коэффициента гидравлического сопротивления водоводов диаметром 1200 — 1600 мм.....108

3.4. Применение метода определения коэффициента гидравлического сопротивления для расчета пропускной способности водовода диаметром 1200 мм со сроком эксплуатации 37 лет .....112

3.5. Применение метода определения коэффициента гидравлического сопротивления для оценки состояния водоводов при более длительном сроке их эксплуатации .....114

Выводы.....117

ГЛАВА 4. МЕТОД РАСЧЕТА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРОДОВ.....118

4.1. Основные положения.....118

4.2. Влияние температуры воздуха в городах на изменение удельного среднесуточного водопотребления .....123

4.3. Влияние годового радиационного баланса и альбедо на удельное среднесуточное водопотребление .....125

4.4. Влияние упругости водяного пара и относительной влажности на изменение удельного среднесуточного водопотребления.....129

4.5. Влияние среднегодового количества осадков на изменение общего удельного среднесуточного водопотребления .....131

4.6. Влияние размеров ореола городского загрязнения на изменение общего удельного среднесуточного водопотребления .....132

4.7. Влияние высоты расположения городов над уровнем моря на удельное среднесуточное водопотребление .....140

4.8. Функциональные связи между численностью населения, его плотностью, размерами жилой площади и удельным среднесуточным водопотреблением.....142

4.9. Зависимость удельного среднесуточного водопотребления от географического расположения городов.....147

4.10. Построение многокритериальной зависимости удельного среднесуточного водопотребления от температуры и других параметров .....149

Выводы .....153

ГЛАВА 5. РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДВУХКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ ..... 155
5.1. Постановка задачи о системе двухконтурного управления ..... 155
5.2. Описание системы водоснабжения городов ..... 155
5.3. О повышении эффективности работы насосных станций ..... 162
5.4. Анализ потокораспределения в узлах сети и способы управления ..... 170
5.5. Стабилизация напора в диктующей точке сети ..... 174
5.6. Метод двухконтурного управления насосной станцией ..... 180
5.7. Техническая реализация метода двухконтурного управления насосными станциями ..... 189
Выводы ..... 191

ГЛАВА 6. РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРВ ..... 192
6.1. Основные направления интенсификации функционирования систем ПРВ ..... 192
6.2. Анализ эффективности функционирования АСУ ТП водоснабжения Харькова ..... 198
6.3. Методика определения причин повреждений в системе ПРВ ..... 219
6.4. Экспериментальное исследование гидроудара в системе ПРВ и его влияние на повреждение водосети ..... 229
6.5. Разработка методики определения интенсивности отказов на водосети ..... 239
6.6. Методика адресного выбора для замены или санации технически изношенных участков ..... 243
6.7. Разработка методики определения утечек и потерь воды в жилом фонде городов ..... 244
Выводы ..... 249

ГЛАВА 7. ОБЗОР РАБОТ ПО ПРОБЛЕМАМ ОВ, БС, РВ, СПОСОБНЫХ ПОРАЖАТЬ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ ..... 251

ГЛАВА 8. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ ..... 278
8.1. Основные проблемы контроля качества воды ..... 278
8.2. Методы контроля качества воды ..... 284

ПРИЛОЖЕНИЕ А ..... 303

ПРИЛОЖЕНИЕ Б ..... 336

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ ..... 342

# ВВЕДЕНИЕ

Интенсификация работы и безопасность систем водообеспечения городов является одной из важнейших проблем, стоящих перед Украиной в XXI веке, особенно после Чернобыльской катастрофы. От ее решения зависит обеспечение общества и народного хозяйства водными ресурсами в условиях начала глобального изменения климата на Земле, ограниченных запасов пресных водных ресурсов, негативного изменения гидробиологического и солевого состава вод, используемых в качестве источника водоснабжения.

Управление водоснабжением в городах требует решения такого ключевого вопроса, как рациональное использование водных, энергетических и других ресурсов, где важная роль отводится измерению расхода воды, контролю утечек и неучтенной воды в системе ее подачи и распределения и т. п. Все это диктует необходимость усовершенствования систем водообеспечения, тщательного анализа и прогноза их уязвимости и принятия мер, направленных на повышение надежности этих систем в нормальных и экстремальных условиях, включая угрозу терроризма.

К основным недостаткам существующей системы управления водным хозяйством страны в целом следует отнести ее перенапряженность, недостаточную управляемость, низкую эффективность, экономическую нестабильность. В условиях, когда запасы водных ресурсов Украины ограниченны, указанные недостатки особенно ощутимы.

Система не обеспечивает управления водным хозяйством страны по принципу единого организма, не обладает гибкостью, информативностью, не снабжена соответствующим механизмом оперативной передачи, обработки и накопления информации о состоянии водных объектов и систем водоснабжения в масштабе всей страны.

Барьерная роль очистных водопроводных сооружений при существующей технологии ограниченна. Вследствие этого существует постоянная реальная угроза роста инфекционных, аллергических, онкологических и других заболеваний. Дефицит питьевой воды, использование неконтролируемых источников водоснабжения являются одной из причин вспышек гепатита А, которые в последние годы имели место в Автономной Республике Крым, Николаевской, Днепропетровской, Донецкой, Кировоградской областях, в Севастополе и других регионах.

Если учесть, что вода, например, реки Северский Донец, прежде чем попасть в Дон, используется водопотребителями шесть раз, становятся очевидными актуальность проблемы обеспечения населения качественной питьевой водой и необходимость интенсификации работы систем водообеспечения.

Водопроводно-канализационное хозяйство Украины обладает такими особыми и существенными характеристиками, как единство технологического процесса, неразделенность во времени процесса производства и потребления, возможность химико-бактериологического поражения водных ресурсов вследствие как обычного загрязнения в результате деятельности человека, так и умышленного при ограниченной барьерной роли систем кондиционирования воды, а также загрязнения в результате проявления отрицательных последствий Чернобыльской катастрофы.

Почти 50 % воды из подземных источников подается коммунальными водопроводами с отклонениями от требований стандарта к общей жесткости, содержанию сухого остатка, железа, марганца, фтора, нитратов и соединений аммиака. Свыше 80 % сельского населения пользуется водой из колодцев или индивидуальных скважин, большая часть которых находится в неудовлетворительном санитарно-гигиеническом состоянии.

В Украине отсутствуют экономически приемлемые технологии кондиционирования подземных вод, за исключением обезжелезивания и, в незначительной мере, удаления марганца.

Водопроводные очистные сооружения, которые проектировались и строились в соответствии с ранее действовавшими нормативами, сегодня уже не в состоянии без усовершенствования технологии и применения новых высокоэффективных реагентов препятствовать поступлению в питьевую воду химических соединений, совокупное действие которых на организм человека представляет реальную угрозу здоровью.

Общая протяженность коммунальных сетей водопроводов Украины составляет 87101,3 км. Более 250 специализированных коммунальных предприятий ежесуточно подают 8,3 млн м$^3$ питьевой воды. Общий объем реализованной воды за 2000 год составил 3,02 млн м$^3$. Централизованным водоснабжением обеспечено 70 % населения Украины. Среднее водопотребление в Украине составляет примерно 320 л/сут на одного человека, и это выше европейского уровня. В то же время переход на расчеты за услуги водоснабжения по показателям домовых приборов учета свидетельствует о том, что фактически в некоторых домах этот показатель 600 л/сут на человека и выше вследствие неудовлетворительного технического состояния внутридомовых сетей, выхода из строя систем рециркуляции горячего водоснабжения

В Украине в аварийном состоянии находится 29,3 тыс. км, или 30 % общей длины водопроводных сетей. Четвертая часть водопроводных сооружений и сетей (в стоимостном выражении) фактически отработала срок амортизации, закончился срок амортизации каждой пятой насосной станции. В Украине ряд сооружений работает уже более 100 лет, в Харькове — 125 лет. По состоянию на 2007 год на восстановление и реконструкцию системы водоканализации городов требуется около 100 млрд грн.

Неудовлетворительное техническое состояние водопроводных сетей в городах приводит к значительным потерям питьевой воды, которые составляют до 30 % общего объема ее подачи. Эти потери тяжелым бременем ложатся на экономику Украины, которая в настоящее время находится в глубоком кризисе. Ежегодно вместе с потерями воды теряется более 1,1 млрд кВт·ч электроэнергии, 7000 т жидкого хлора, более 20 тыс. т коагулянта и других ресурсов.

Значительное место в энергосбережении систем водообеспечения занимает процесс транспортировки воды по магистральным водоводам. Изменение условий работы последних, вызванное увеличением со временем макрошероховатости внутренних поверхностей труб, влечет за собой повышение коэффициента гидравлического сопротивления и, как следствие, увеличение расхода электроэнергии на транспортировку воды.

История экспериментальной гидравлики и теоретической гидромеханики насчитывает несколько сотен лет. Тем не менее ряд проблем остался нерешенным, что сводит на нет усилия расчетчиков и проектировщиков, занимающихся развитием водоснабжения крупных городов. Достаточно упомянуть общеизвестный факт. Сразу же после строительства магистральных водоводов диаметром от 1200 до 1600 мм выяснилось, что их пропускная способность не отвечает расчетным параметрам, вследствие чего Харьков получал воды на 28–32 % меньше, чем было предусмотрено, а через 5–7 лет этот показатель возрос до 45–52 %. Дело было не в ошибках в расчетах. Можно не сомневаться, что расчетчики использовали последние по тому времени данные о гидравлических сопротивлениях трубопроводов [308, 311]. Причиной расхождений были условия работы магистральных водоводов, при которых происходит резкое изменение во времени макрошероховатостей внутренней поверхности труб. Указанная разница в подаче воды компенсировалась введением новых дополнительных водоводов и перекачивающих насосных станций. Так, на трассах магистральных водоводов диаметром 1200–1400 мм, введенных в эксплуатацию в 1962 и 1967 гг., из-за роста гидравлических сопротивлений потребовалось для увеличения подачи воды городу построить промежуточную насосную станцию перекачки, которая была введена в эксплуатацию в 1972 г.

Эти обстоятельства побудили автора настоящей книги начать долголетние экспериментальные исследования гидравлических сопротивлений различных трубопроводов в натурных условиях. Они велись в течение сроков эксплуатации водоводов, достигающих почти четырех десятилетий, что позволило предложить эмпирические формулы, которые дают возможность не только правильно рассчитывать магистральные водоводы для водообеспечения городов,

но и определять изменение их состояния с течением времени, а также принимать решения о реновации (замене или санации) водосетей.

Один из важнейших и малоизученных вопросов — водопотребление городов. Обычно предполагалось, что оно зависит только от численности населения и потребностей в воде различных предприятий. На самом деле это лишь часть независимых параметров, оказывающих влияние на водопотребление, — природно-климатических, географических, градостроительных и др. Среди них — температурный режим воздуха в городах, радиационный баланс и альбедо земной поверхности, влажность воздуха, упругость водяного пара, среднегодовое количество осадков, ореол загрязнения города, площадь застройки, высота расположения города над уровнем моря и многое другое. Результаты проведенных автором исследований дают возможность оценить влияние указанных факторов на развитие водоснабжения городов и страны в целом, ее водохозяйственной экономики, принять решение о планировании запасов водных ресурсов. Все это приобретает особое значение в условиях начала глобального изменения климата на Земле уже в XXI веке.

В странах Европы, в Америке, Японии и др. широкое распространение получили автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) водоснабжения. В бывшем СССР специалисты, занимающиеся вопросами водоснабжения, были лишены возможности использовать зарубежный опыт создания АСУ ТП. Вопросам АСУ ТП водоснабжения городов не уделялось должного внимания. Была другая техническая политика, отсутствовали методики и т. д.

В городах Украины, как и в СНГ в целом, где осуществлена автоматизированная система управления подачей и распределением воды (ПРВ), стало изредка применяться так называемое одноконтурное автоматизированное управление насосными станциями, однако оно ведет к росту потерь воды при внештатных ситуациях.

В отличие от автоматизированной одноконтурной системы ПРВ, автором впервые в практике водоснабжения предложена, исследована и обоснована модель автоматического двухконтурного управления системой ПРВ, которая дает возможность ликвидировать указанный недостаток.

Отсутствие методик определения причин повреждений в системах ПРВ также снижает эффективность оперативного управления водообеспечением. Проведение экспериментальных и статистических исследований позволяет интенсифицировать работу систем ПРВ и внутридомовых сетей жилого фонда.

Автором в данной книге приведена разработка теоретически и экспериментально обоснованных методов интенсификации работы систем подачи и распределения воды, направленных на решение важной народнохозяйственной задачи — повышение эффективности водообеспечения городов.

Теоретические исследования проводились с использованием математического аппарата высшей алгебры, математического программирования, теории вероятностей и математической статистики, теории графов, методов корреляционного и регрессионного анализа, включая нелинейное многофакторное моделирование. Экспериментальные исследования выполнялись в натурных условиях с использованием микропроцессорных устройств сбора, накопления и передачи информации, соединенных с контроллером КОМКОН-микро с помощью интерфейса, ультразвуковых накладных расходомеров UFM 610 p, тензорезисторных датчиков давления ДД, образцовых и самопишущих манометров МТС-712 Ч, тахометров, толщиномеров УТ-93П, контактных измерителей толщины макрошероховатости ИТМ-1, фотопрофилографов, радиостанции АКВА-Р (с частотой в диапазоне УКВ) и др. Все приборы регулярно и своевременно проходили государственную проверку.

Результаты проведенных исследований имеют научную новизну, которая состоит в следующем.

Разработана методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления трубопроводов, учитывающая изменение макрошероховатости в процессе их длительной эксплуатации.

Установлены и исследованы факторы, оказывающие влияние на удельное среднесуточное водопотребление — температурный режим воздуха в городе, радиационный баланс, альбедо земной поверхности, влажность воздуха, упругость водяного пара, ореол загрязнения города, численность населения, площадь застройки города и ряд других.

Разработана методика расчета удельного среднесуточного водопотребления городов с учетом их расположения в различных природно-климатических условиях и загрязнения от промышленных выбросов в атмосферу.

Научно обоснован и разработан метод двухконтурного автоматического управления насосной станцией в системе подачи и распределения воды. Разработан и реализован алгоритм, использование которого позволяет производить расчет потокораспределения, основанный на измерениях пьезометрических напоров действующей системы ПРВ, и в автоматическом режиме обнаруживать аварию и ее место.

Предложен метод определения диктующей точки в действующей системе ПРВ. Сформулирован критерий качества и эффективности функционирования системы ПРВ во внештатных ситуациях.

Разработан метод оценки отказа элементов водосети, учитывающий снижение прочности труб при длительной эксплуатации, сезонные колебания температуры воды в трубах и наружного воздуха. Разработан алгоритм выбора технически изношенных участков сетей для их реновации.

Предложен метод экспертной оценки состояния санитарно-технического оборудования жилого фонда и утечек воды в городах.

Получены и теоретически обобщены результаты экспериментальных исследований, которые проводились в натурных условиях на действующих сооружениях водоснабжения при их длительной эксплуатации.

Указанные результаты положены в основу разработки и внедрения в практику новых методов интенсификации работы систем водообеспечения.

Методика расчета коэффициента гидравлического сопротивления внедрена при расчете и разработке гидравлической схемы транспортирования воды по водоводам Кочеток–Харьков в зоне Роганской насосной станции перекачки.

Методика расчета удельного среднесуточного водопотребления применяется при проектировании систем водообеспечения в проектных институтах городов Украины. Она была использована при утверждении целевой комплексной программы «Экономия и рациональное использование водных ресурсов в Москве и повышение надежности ее водообеспечения на период до 2000 года» в соответствии с Распоряжением Совета Министров СССР № 1405-р от 19.06.1987 года.

При разработке схемы управления режимами работы насосной станции № 25А (Харьков) был использован метод управления процессом подачи и распределения воды на основе одно- и двухконтурных систем управления.

Практическое применение разработанной методики прогнозирования отказов водосети дало значительный экономический эффект и существенно повысило надежность водоснабжения.

Внедрение АСУ ТП водоснабжения городов дает возможность сократить расход электроэнергии на 7–10 %; уменьшить утечки и непроизводительные потери воды на 10–12 % благодаря снижению избыточных напоров; уменьшить количество повреждений на водосети на 5–7 %; вследствие этого получена экономия реагентов и горюче-смазочных материалов, снижены затраты на устранение повреждений водосети.

Разработанные автором модели управления насосными станциями использованы при составлении программ, которые применяются СПКБ АСУ водоснабжением городов Украины.

Результаты проведенной работы внедрены в учебный процесс Харьковского государственного технического университета строительства и архитектуры и Харьковской государственной академии городского хозяйства, в том числе в учебном курсе «Организация, управление городским хозяйством, включая АСУ», использованы при разработке «Методических рекомендаций по определению экономической эффективности автоматизированных систем управления технологическими процессами водоснабжения городов», утвержденных Министерством жилищно-коммунального хозяйства УССР в 1982 г.; включены во «Временную методику расчета удельных норм расхода электроэнергии на подъем и подачу воды, очистку и перекачку сточных вод для водопроводных и канализационных хозяйств УССР», утвержденную Министерством жилищно-коммунального

хозяйства УССР в 1983 г., а также в «Правила пользования системами коммунального водоснабжения и водоотведения в городах и поселках Украины», утвержденные Госжилкомхозом Украины в 1994 г.

Проведены многолетние теоретические и экспериментальные исследования на магистральных водоводах и водораспределительных сетях, результаты которых легли в основу предложенной автором методики, позволяющей прогнозировать изменения сопротивлений в трубопроводах в процессе их длительной эксплуатации.

Установлены и исследованы факторы, влияющие на величину удельного среднесуточного водопотребления. Разработан метод определения водопотребления городов.

Разработан и внедрен цикл новых научно-технических решений, которые позволили интенсифицировать водоснабжение городов и осуществить комплексную экономию водных, энергетических и материальных ресурсов (автор являлся научным руководителем работ по созданию в Харькове первой в бывшем СССР АСУ ТП водоснабжения). Данные решения нашли применение в других городах СНГ.

Автором разработан и исследован метод двухконтурного автоматического управления системой ПРВ.

Разработана и внедрена в практику методика обнаружения аварий, основанная на использовании принципа двухконтурного автоматического управления. Предложен метод определения диктующей точки.

Сформулирован критерий качества и эффективности функционирования системы ПРВ во внештатных ситуациях. Предложен метод оценки отказа элементов водосети.

Предложен метод оценки состояния санитарно-технического оборудования жилого фонда и утечек воды в городах.

С участием автора разработаны учебное пособие «Информационно-аналитические системы управления инженерными сетями жизнеобеспечения населения» [61], концепция применения геоинформационных систем для управления подачей и распределением воды предприятиями водопроводного хозяйства [202]; методика расчета водопотребления городов на основе многофакторной модели, зависящей от природно-климатических, градостроительных и других условий.

# ГЛАВА 1

# СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

Водные, энергетические и другие ресурсы, необходимые для активного развития страны, в Украине крайне ограниченны. Это ставит ее в особые условия, требующие экономии ресурсов, а значит, применения передовых технологий и высокой культуры использования ресурсов. Одним из приоритетных направлений в сбережении водных, энергетических и других ресурсов является совершенствование водоснабжения как крупного их потребителя.

Проблем, свидетельствующих о критической ситуации с запасами и качеством пресной воды в мире, очень много. Потребление воды в сельском хозяйстве, промышленности, в городах увеличивается, причем решающим фактором выступает не только рост численности населения, но и повышение уровня жизни. Непредсказуемо и глобальное изменение климата на Земле в наступившем XXI веке, с чем будет связана необходимость повышения эффективности систем водоснабжения, их постоянного реагирования на изменение климата.

В последнее время у нас в стране и за рубежом ведутся работы, направленные на повышение надежности и эффективности работы систем водоснабжения. Этому предшествовали исследования, проведенные отечественными и зарубежными учеными и специалистами: Н.Н. Абрамовым, М.М. Андрияшевым, А.Д. Альтшулем, А.М. Грабовским, А.Е. Беланом, В.А. Большаковым, Е.М. Гальперином, В.М. Глушковым, Е.П. Григоровским, С.С. Душкиным, А.Г. Евдокимовым, А.М. Кургановым, Б.С. Лезновым, Л.Ф. Мошниным, Г.С. Попковичем, Н.И. Самойленко, С.В. Сумароковым, А.Д. Тевяшевым, В.Е. Терновцевым, П.Д. Хоружим, С.В. Храменковым, В.Р. Чупиным, Ф.А. Шевелевым, И.С. Эгильским и др., а также зарубежными исследователями Ларри В. Майсом, Сусумой Кавамурой, Г. Ханом, Робертом Дж. Хебергом и др. [1, 4, 18, 14, 24, 264, 219, 47, 49, 58, 59, 44, 120, 214, 79, 267, 60, 278, 294, 297, 305, 311, 318, 345, 359, 290, 356].

## 1.1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВОДОВОДОВ

Магистральные водоводы, транспортирующие питьевую воду от систем кондиционирования в городскую систему резервуаров и систему ПРВ, рассчитаны на длительный период эксплуатации — более 25 лет. Основным условием транспортирования воды является обеспечение ее качества, расхода и давления. При транспортировании воды от систем кондиционирования в магистральных трубопроводах происходят реакции между водой и материалом трубопровода. С повышением температуры воды усиливаются химические и биологические процессы в воде и качество ее изменяется тем сильнее, чем дольше вода находится в трубопроводной системе [87, 112, 271]. Это влияет и на возникновение неровностей (шероховатости) на внутренней поверхности водовода.

При проектировании не учитывается увеличение гидравлического сопротивления в магистральных водоводах с течением времени эксплуатации. Само проектирование основывается на первоначальных требованиях технико-экономического обоснования, касающихся себестоимости воды, подбора экономичного диаметра труб водовода, удельного расхода электроэнергии

на 1 м$^3$ подаваемой воды и т. д., исходя из условий, заданных для пуска этих водоводов с проектными потерями напора и определенным расходом воды, не допускающими дефицита воды в городах. Как правило, после строительства магистральных водоводов и при их пуске возникают проблемы, свидетельствующие об отклонениях действительного гидравлического сопротивления водоводов от проектного. Службы эксплуатации систем водоснабжения с самого начала пуска в действие водоводов вынуждены предпринимать меры для ликвидации этих недостатков, с тем чтобы не допустить развития дефицита воды [68, 79, 188, 317]. Растет себестоимость воды.

При проектировании водоводов учитывается, что движение потока воды будет турбулентным и лишь в некоторых случаях в водоводах могут возникать переходные режимы. В основе расчета стальных магистральных водоводов больших диаметров лежит предложенная Ф.А. Шевелевым формула расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda$ для автомодельных турбулентных режимов потока воды [311]:

$$\lambda = \frac{0,021}{d^{0,3}}, \qquad (1.1)$$

где $d$ — диаметр водовода, м.

Приведенная расчетная формула (1.1) не учитывает зависимость коэффициента $\lambda$ от роста шероховатости внутренней поверхности водоводов с течением времени. Учитывается лишь эквивалентная величина шероховатости, которая, по мнению Ф.А. Шевелева, составляет 1 мм. Формула (1.1) может быть использована только при условии автомодельного турбулентного режима потока воды, если ее считать применимой для водоводов. Более того, численный коэффициент 0,021 имеет размерность м$^{0,3}$, что также нельзя признать корректным для расчетов водоводов, находящихся в процессе эксплуатации, так как вводится эквивалентная величина шероховатости, равная 1 мм. В работе Ф.А. Шевелева (с. 4–5) сказано, что при коррозии стенок труб или образовании на них отложений шероховатость стенок возрастает, что влечет за собой увеличение коэффициента $\lambda$, но не учитывается автором. Формула (1.1) применима для расчета неновых стальных и чугунных водопроводных труб с естественной шероховатостью, которая по гидравлическому сопротивлению эквивалентна искусственной шероховатости, образуемой нанесением на стенки новых стальных труб песка зернистой крупностью 1 мм, и может быть принята как нормальная.

Гидравлический расчет водопроводных труб, находящихся в эксплуатации, в случае образования отложений необходимо проводить по формулам, учитывающим увеличение коэффициента сопротивления [188, 193, 294]. Таким образом, в таблицах Ф.А. Шевелева не предлагаются решения, учитывающие прогноз изменения коэффициента $\lambda$ в течение срока эксплуатации водоводов. Проектные институты, которые пользовались формулами Маннинга [265], а позже Ф.А. Шевелева, также не учитывали изменения коэффициента $\lambda$ с течением времени эксплуатации водоводов.

В процессе длительной эксплуатации водоводов пропускная способность металлических трубопроводов значительно уменьшается вследствие внутренней коррозии и инкрустации. Это является общей проблемой не только для водопроводов городов Украины (рис. 1.1) [297]. Согласно [227, 292, 294] в процессе эксплуатации гидравлические сопротивления трубопроводов увеличиваются в 2–7 раз и более по сравнению с первоначальными значениями. Они зависят от диаметра и материала труб, качественных показателей транспортируемой воды, условий работы и срока эксплуатации трубопровода [291, 294].

Гидравлические характеристики действующих трубопроводов можно определить по методу «трех манометров» [145], когда манометры ставят в начале и конце трубопровода, а также в месте ответвления. При этом на трубопроводе между манометрами все потребители отключаются. Фактическое удельное сопротивление исследуемого трубопровода определяют по формуле

$$A_{\text{ф}} = \frac{\left(\sqrt{i_1} - \sqrt{i_2}\right)^2}{q^2}, \qquad (1.2)$$

где $i_1$ и $i_2$ — гидравлические уклоны на участках трубопровода длиной $l_1$ и $l_2$, определяемые соотношениями

$$i_1 = h_1 / l_1; \quad i_2 = h_2 / l_2. \qquad (1.3)$$



Рис. 1.1. Третий Краснопресненский водовод Москвы диаметром 1200 мм (сталь) время эксплуатации — более 30 лет (по данным С.В. Храменкова, «Мосводоканал»)

Здесь $h_1$ и $h_2$ — потери напора на этих участках, измеряемые манометрами, м;

$q$ — расход воды, л/с, измеряемый через ответвление, установленное на расстоянии $l_1$ от начала исследуемого трубопровода.

Приведенная формула (1.2) справедлива при условии равенства удельных сопротивлений на обоих участках.

Наиболее сложной и трудоемкой операцией при вычислении гидравлических сопротивлений действующих водопроводных линий является определение расхода воды, проходящего по трубопроводу [125, 294]. Весьма точным является объемный метод:

$$Q = W/t, \tag{1.4}$$

где $W$ — объем емкости (резервуара), м$^3$, заполняемой или опорожняемой за время $t$, с.

При наличии большого количества участков сети такая работа является очень громоздкой. Согласно [294] при обследовании действующей системы ПРВ целесообразно испытывать лишь характерные участки сети, сгруппировав их в зависимости от материала и диаметра труб, а также от условий и сроков их эксплуатации. Коэффициент увеличения удельного сопротивления труб $A_ф$ по сравнению с табличным значением $A_т$, взятым для неновых металлических труб, определяется по формуле [292, 294]

$$k = \frac{A_ф}{A_т} = \frac{11{,}9 d_р^{0{,}3}}{\left(\lg \dfrac{3{,}7 d_р}{\overline{\Delta}_{экв}}\right)^2}, \tag{1.5}$$

где $d_p$ — расчетный внутренний диаметр трубопровода, мм;

$\Delta_{экв}$ — эквивалентная шероховатость, т.е. такая воображаемая равномерная зернистая шероховатость с высотой (диаметром) зерен $d_з = \overline{\Delta}_{экв}$, при которой в области квадратичного сопротивления потери напора в трубах будут равны потерям напора при естественной шероховатости.

Эквивалентную шероховатость находят по формуле [294]

$$\overline{\Delta}_{экв} = \frac{3{,}7 d_р}{\exp \dfrac{0{,}33}{d_р^2 \sqrt{A_ф d_р}}}. \tag{1.6}$$

Вычислив $\overline{\Delta}_{экв}$ для определенных диаметров трубы соответствующего срока их службы $T$, строят график $\overline{\Delta}_{экв} = f(T)$. По этому графику для всех участков сети находят $\overline{\Delta}_{экв}$, зная продолжительность их эксплуатации и приняв, что условия работы примерно одинаковы

для всего водопровода. Затем по формуле (1.5) находят соответствующий коэффициент $k$, а следовательно, и $A_{ф}$.

Как показывают исследования [294], формула (1.5) справедлива, если относительная шероховатость трубопровода

$$\overline{\Delta}_{отн} = \overline{\Delta}_{экв} / d_{р} \geq 0,0047. \qquad (1.7)$$

Этому условию удовлетворяет график зависимости $k = f\left(d_{р}, \overline{\Delta}_{экв}\right)$.

В работе [239] отмечается, что таблицы Ф.А. Шевелева предназначены для расчета трубопроводов холодного водоснабжения, транспортирующих воду, температура которой составляет 10 °С. В системах горячего водоснабжения условия работы трубопроводов другие. Температура воды там должна достигать 55–60 °С. В таких условиях увеличиваются отложения на внутренней поверхности трубопроводов и может существенно уменьшаться живое сечение. В расчетах трубопроводов необходимо учитывать изменения параметров труб, в том числе и зарастание трубопроводов в результате коррозии и осаждения из воды взвешенных частиц карбоната кальция [96, 111, 315].

В зарубежной практике для расчета водопроводных труб широко пользуются формулой Кольбрука, определяющей значение коэффициента гидравлического сопротивления в зависимости от численного параметра шероховатости — эквивалентной шероховатости [307]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2\lg\left[\frac{k}{3,7D} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}}\right], \qquad (1.8)$$

где $k$ — эквивалентная шероховатость;

$D$ — внутренний диаметр трубы;

$Re$ — число Рейнольдса.

Формулу (1.8) рекомендуется использовать для расчета труб, работающих во всех трех областях гидравлического сопротивления: от гидравлически гладкой ($k = 0$) до квадратичной. Эта формула дает асимптотическое приближение кривой $\lambda = f(Re)$ как к прямой для гладких труб, так и к горизонтальной прямой (область квадратичного сопротивления).

Для проведения расчетов рекомендуется также использовать формулу Муди, аппроксимирующую формулу Кольбрука [307] в виде

$$\lambda = 0,0055\left[1 + \left(\frac{20000k}{D} + \frac{10^{6}}{Re}\right)^{1/3}\right]. \qquad (1.9)$$

Преимуществом формулы Кольбрука является то, что она может быть применена для определения потерь напора при движении любой жидкости с известной вязкостью.

Среди одночленных степенных формул, полученных экспериментальным путем, наибольшее распространение (в США, Великобритании) имеет формула Хазена–Вильямса [307, 335]

$$\lambda = 1030 / c^{1,852} Re D^{0,01852}, \qquad (1.10)$$

где $c$ — коэффициент Хазена–Вильямса.

Величины $c$ получены в результате замеров действительных потерь напора при движении воды в трубах различных диаметров и с различной шероховатостью стенок. Формула (1.10) неквадратичная, но используется для практических расчетов труб при работе их в любой области гидравлического сопротивления. Формула Хазена–Вильямса имеет вид, характерный для гидравлически гладких труб. Как видим, зависимость $\lambda$ от $D$ очень незначительна. В представленном виде формула (1.10) составлена для температуры воды $t$, равной 14 °С. Анализ показывает, что при $c$ = 150–155 зависимость (1.10) может быть применена для расчета гидравлически гладких труб диаметром более 300 мм, при $c$ = 100–150 — для расчета труб, работающих в переходной области. Использование формулы (1.10) при $c < 100$ (для квадратичной области сопротивления) в данном виде не рекомендуется и требует введения поправок.

Как отмечалось ранее, в процессе эксплуатации происходит уменьшение пропускной способности труб вследствие внутренней коррозии и отложений. Для оценки снижения пропускной способности принято предположение о постоянном, равномерном увеличении шероховатости, которое впервые было выдвинуто Кольбруком и Уайтом для шероховатых труб и в дальнейшем развито для процесса отложений в гладких трубах. Ими предложена формула, определяющая соотношение между ростом выступов шероховатости $a$ и $pH$ воды [307, 328]

$$2\lg a = 3{,}8 - pH, \text{ мм/год}. \qquad (1.11)$$

Ламонт на основании обследования 60 бывших в эксплуатации (в Великобритании) чугунных трубопроводов с покрытием рекомендует зависимость для определения величины $a$ [307, 343, 344]:

$$\lg \frac{a}{0{,}002} = \frac{-J}{2{,}6}, \text{ мм/год}, \qquad (1.12)$$

где $J$ — индекс насыщения воды по методу Ланжелье.

Результаты исследований гидравлического сопротивления труб из различных материалов, проведенных во ВНИИ ВОДГЕО [306, 308, 311], дали возможность проанализировать зависимости Прандтля–Никурадзе и Кольбрука (формула Кольбрука есть не что иное, как механическое объединение формулы Прандтля–Никурадзе для шероховатых труб с их же формулой для гидравлически гладких труб) [307].

Квадратичная формула Прандтля–Никурадзе, как было установлено [307, 308, 311], может иметь лишь ограниченную область применения для очень узкого диапазона диаметров вследствие того, что при ее выводе параметры, входящие в логарифмическую формулу распределения скоростей, приняты постоянными, в то время как они являются параметрами, зависящими от диаметра трубы. Формула Кольбрука, помимо отмеченных выше недостатков, вообще некорректна по своему построению. Она необоснованно упрощает зависимость $\lambda = f(Re)$ в переходной области. Суть упрощения заключается в том, что формула Кольбрука включает в себя только формулу для гладких труб, в то время как каждому виду труб свойственны особые переходные кривые. Формула Кольбрука дает лишь асимптотическое приближение кривых сопротивления к кривой для гладких труб и к горизонтальной прямой области квадратичного сопротивления [307].

Одночленная степенная формула Хазена–Вильямса также упрощает действительный вид зависимости $\lambda = f(Re)$, характерный для данного вида труб.

Проведенными ранее исследованиями было установлено, что коэффициент гидравлического сопротивления $\lambda$ магистральных водоводов при их эксплуатации не остается постоянным, а изменяется с течением времени: $\lambda = f(T)$ [173]. Эти исследования проводились на водоводах Харькова в течение почти девяти лет, причем оценивались лишь изменения $\lambda = f(T)$ в квадратичной области при $Re$ = const.

Таким образом, выполненный анализ методов определения гидравлических сопротивлений водоводов показал, что в настоящее время отсутствуют решения, учитывающие динамику роста гидравлических сопротивлений труб в течение длительного срока эксплуатации, связанного с образованием макрошероховатости внутренней поверхности одних и тех же водоводов $\lambda = f\left[Re, \overline{\Delta}(T)\right]$ в широком диапазоне чисел $Re$. Прогноз изменения коэффициента $\lambda = f\left[Re, \overline{\Delta}(T)\right]$ чрезвычайно актуален в сложившихся экономических условиях и даст возможность правильно обосновывать сроки эксплуатации водоводов, рекомендации о времени проведения их санации и т. д.

## 1.2. О РАСЧЕТЕ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УЗЛАХ ВОДОСЕТИ

Начиная с 1972 г., автором совместно с профессорами А.Г. Евдокимовым и А.Д. Тевяшевым разрабатывалась теория АСУ подачи и распределения воды. С тех пор были опубликованы две монографии [61, 193] и ряд статей.

Ниже излагаются основные идеи построения метода расчета потокораспределения в узлах сложной системы ПРВ и описаны причины, по которым автор данной книги предпочел более простой, но и более совершенный подход, оказавшийся наиболее эффективным для использования в действующих системах ПРВ городов (см. главу 5).

Процесс оперативного управления системой ПРВ в городах рассматривался как управляемый процесс совместного режима работы насосных станций, водосети, резервуаров и их составляющих элементов. Наличие в процессах водопотребления основных компонентов, таких, как гармоническая составляющая и случайный шум, приводит к необходимости построения для текущего управления действующей сетью двухуровневой схемы управления системой ПРВ. Данная схема включает:

планирование режимов транспортирования и распределения воды, которое позволяет целенаправленно отслеживать гармонические тренды путем изменения структуры и параметров существующей сети;

оперативное управление, устраняющее нежелательные изменения напоров в диктующей точке сети.

Необходимость определенных затрат времени для реализации управляющих воздействий на рассмотренных этапах управления требует применения на каждом из этих этапов дискретного способа управления. Поэтому интервал управления разбивается на дискреты (кванты), которые определяются как точностью аппроксимации соответствующих компонентов (гармонических, шумовых) процессов водопотребления, так и временем реализации управления на каждом из этапов.

Дискретность управления позволяет представить этот процесс на каждом этапе в виде последовательной многошаговой процедуры принятия решения.

Эффективность функционирования любой системы связана с качественными и количественными целями управления этой системой. Основная качественная цель управления рассматриваемой системой заключается в реализации технологии транспортирования и распределения воды.

Для количественной характеристики достижения поставленной цели служит критерий управления, который в данном случае может принимать только два значения: единицу (в случае достижения цели — есть вода у потребителя в любой высшей точке) и ноль (в противном случае — нет воды у потребителя). Качественные цели являются стратегическими и используются на самом верхнем уровне иерархии управления всей системой, так как связаны с обеспечением водой всех потребителей. Кажущаяся простота такого критерия управления обманчива, поскольку функциональная зависимость критерия от управляемых параметров может быть весьма сложной.

Как уже отмечалось, качественная цель управления системой ПРВ заключается в обеспечении потребителей требуемым количеством воды при давлении не ниже минимально допустимого. Сформулируем эту цель математически, предварительно введя критерий суммарных избыточных напоров.

Пусть $P_j$ и $P_j^+$ — текущее и минимально допустимое давление в $j$-м узле соответственно. Тогда суммарные избыточные напоры в момент времени $t$ можно вычислить в соответствии с выражением

$$y(t) = \sum_{j \in V} \left( P_j(t) - P_j^+ \right) = \sum_{j=1}^{v} \left( P_j(t) - P_j^+ \right), \qquad (1.13)$$

где $V$ — множество вершин графа сети;

$v$ — количество его вершин.

Критерий управления является ключевым в понимании многих проблем, возникающих в организации рационального функционирования ПРВ. В нормальных условиях оптимального функционирования системы ПРВ текущее давление $P_j$ в $j$-м узле должно быть всегда больше или равно $P_j^+$.

В идеальном случае давление у потребителей должно быть минимально допустимым $P_j^+$, но из физической сути системы ПРВ следует, что давление на насосной станции должно быть всегда выше, чем в любом другом узле водосети.

С другой стороны, известно, что чрезмерное превышение текущего давления над нормативным приводит к нежелательным последствиям:

повышает расход электроэнергии;

увеличивает утечку воды во внутридомовых сетях (непроизводительные расходы воды);

повышает вероятность повреждения водосети, что, в свою очередь, ведет к возрастанию вероятности ущерба от аварии и т.д.

Оценка этого критерия [61] на отрезке времени $[0,T]$ позволяет судить об эффективном функционировании подсистемы ПРВ с точки зрения выполнения последней своего основного функционального назначения. Изменение пьезометрической высоты, а значит, давления $P_j$ (будем иногда называть его свободным напором в точке) в каждой вершине графа (схема соединения узлов) подсистемы ПРВ на заданном отрезке времени $[0,T]$ будем характеризовать функционалом вида

$$Z_j = \frac{1}{T}\int_0^T \varphi\ (P_j(t))dt, \tag{1.14}$$

где $P_j(t)$ — случайный процесс изменения величины свободного напора в $j$-м узле подсистемы ПРВ;

$$\varphi_j(t) = \varphi\ (P_j(t)) = \begin{cases} 1, \text{ при } P_j(t) \geq P_j^+; \\ 0, \text{ при } P_j(t) < P_j^+. \end{cases} \tag{1.15}$$

Функционал (1.14) характеризует относительное время, в течение которого подсистема ПРВ выполняет свое функциональное назначение в $j$-м узле сети, т.е. $j$-потребитель обеспечен водой на всех этажах жилого дома в любом узле.

Если информация о величине свободного напора в $j$-м узле поступала в дискретные моменты времени $t$, $t + 1$, то в этом случае выражение (1.14) приближенно может быть заменено интегральной суммой

$$Z_j = \frac{1}{T}\sum_{k=1}^{T}\varphi(P_{jk})\Delta t_k,\ (j \in V), \tag{1.16}$$

где $k$ — дискрет интервала времени, равный числу $t$;

$T$ — интервал времени (обычно на практике $T = 24$ часа).

Качество функционирования системы подачи и распределения воды на временном интервале $[0,T]$ в простейшем случае можно характеризовать функцией вида

$$Z = \frac{1}{v}\sum_{j \in V} Z_j\ , \tag{1.17}$$

где $V$ — множество узлов;

$v$ — количество узлов.

Как видим, значения вышеприведенных критериев находятся в диапазоне от 0 до 1.

Количественные цели управления заключаются в стремлении уменьшить (или увеличить) значение некоторых критериев, отражающих режимы функционирования управляемого объекта. В качестве такого критерия довольно часто в водопроводных сетях используют функцию (1.13), стараясь найти ее минимум.

Другим распространенным критерием эффективности функционирования ПРВ являются энергозатраты в момент времени $t$:

$$y(t) = \sum_{j \in L}\frac{h_j^{(a)}(t)q_j(t)}{102\eta_j}\ , \tag{1.18}$$

где $h_j^{(a)}$, $q_j$ и $\eta_j$ — потеря напора, расход на $j$-й насосной станции и ее коэффициент полезного действия соответственно;

$L$ — множество насосных станций.

Интегральная оценка энергозатрат на интервале времени $[0, T]$

$$Z = \int_0^T y(t)dt \tag{1.19}$$

или при дискретном способе съема информации

$$Z = \sum_{j=1}^{T} y_j \Delta t_j \,. \tag{1.20}$$

Остановимся на ряде других критериев функционирования ПРВ, получивших распространение на практике.

Максимальный избыточный напор в момент времени $t$ (он диктуется из условий этажности застройки и недопущения свободного напора в трубопроводах распределительной сети более 60 м водяного столба)

$$Z(t) = \max_{j \in N} P_j(t) \,. \tag{1.21}$$

Этот критерий характеризует «узкие» места в системе ПРВ, особенно в режиме минимального водопотребления, способные привести к повреждениям на водосети и непроизводительным расходам воды во внутридомовой сети. Здесь $N$ — множество потребителей воды.

Суммарное мгновенное водопотребление

$$y_1(t) = \sum_{j \in L} q_j(t) = \sum_{i \in N} q_i(t) \,. \tag{1.22}$$

Интегральная оценка водопотребления на отрезке времени $[0,T]$ вычисляется по аналогии с выражениями (1.19), (1.20), а именно:

$$Z_1 = \int_0^T y_1(t) dt \tag{1.23}$$

или, при дискретности поступающей информации,

$$Z_1 = \sum_{j=1}^{T} y_{1j} \Delta t_j \,. \tag{1.24}$$

Оценка суммарной утечки в системах водоснабжения

$$y_2 = \sum_{j \in N} A(P_j - P_j^+) q_j \,, \tag{1.25}$$

где $A$ – коэффициент непроизводительных потерь воды на единицу изменения давления.

Главная задача оперативного управления – обеспечить выполнение системой ПРВ своего целевого назначения. Управляемыми переменными для этих сетей являются параметры и структуры отдельных подсистем. Управление параметрами и структурой возможно на активных элементах (насосных станциях) и распределительных сетях. Об изменении параметров и структуры потребителей можно судить по изменению параметров процессов потребления воды.

Таким образом, задача оперативного управления системой ПРВ заключается в том, чтобы с помощью изменения структуры и параметров управляемых подсистем компенсировать изменение структуры и параметров потребителей. Причем компенсацию этих изменений необходимо осуществлять, минимизируя некоторый функционал потерь в энергетическом, стоимостном или надежностном выражении при соблюдении соответствующей совокупности ограничений.

Структура процесса оперативного управления потокораспределением в водопроводных сетях может быть представлена в виде двух основных этапов, или уровней управления:

1) оперативное планирование потокораспределения в водопроводной сети с учетом превалирующего влияния некоторого критерия на данный плановый период (минимум эксплуатационных затрат, надежное водообеспечение потребителей, обеспечение критерия качества функционирования по формуле (1.17), который должен быть равен единице);

2) стабилизация давлений в диктующих точках в заданном диапазоне.

Решение задачи оперативного управления на каждом из этих уровней, как правило, разнесено во времени и пространстве, требует различного объема и характера оперативной информации, наличия математических моделей, описывающих объект управления, разных критериев и методов решения задач управления.

Остановимся на основных задачах водораспределения, получивших наибольшее распространение при решении задач проектирования и развития водопроводных сетей.

В процессе проектирования возникает задача выбора оптимального режима работы насосных станций при их совместной работе на водопроводную сеть.

Известны: структура сети; узловые расходы (следовательно, и общий поток воды, подаваемый в сеть насосными станциями); диаметры трубопроводов; длины магистральных участков; геодезические отметки; минимально допустимые свободные напоры в узлах сети; количество насосных станций, работающих на сеть, $l \geq 1$.

Для математической формулировки этой задачи остановимся более подробно на математической модели установившегося водораспределения в водопроводной сети (рис. 1.2).

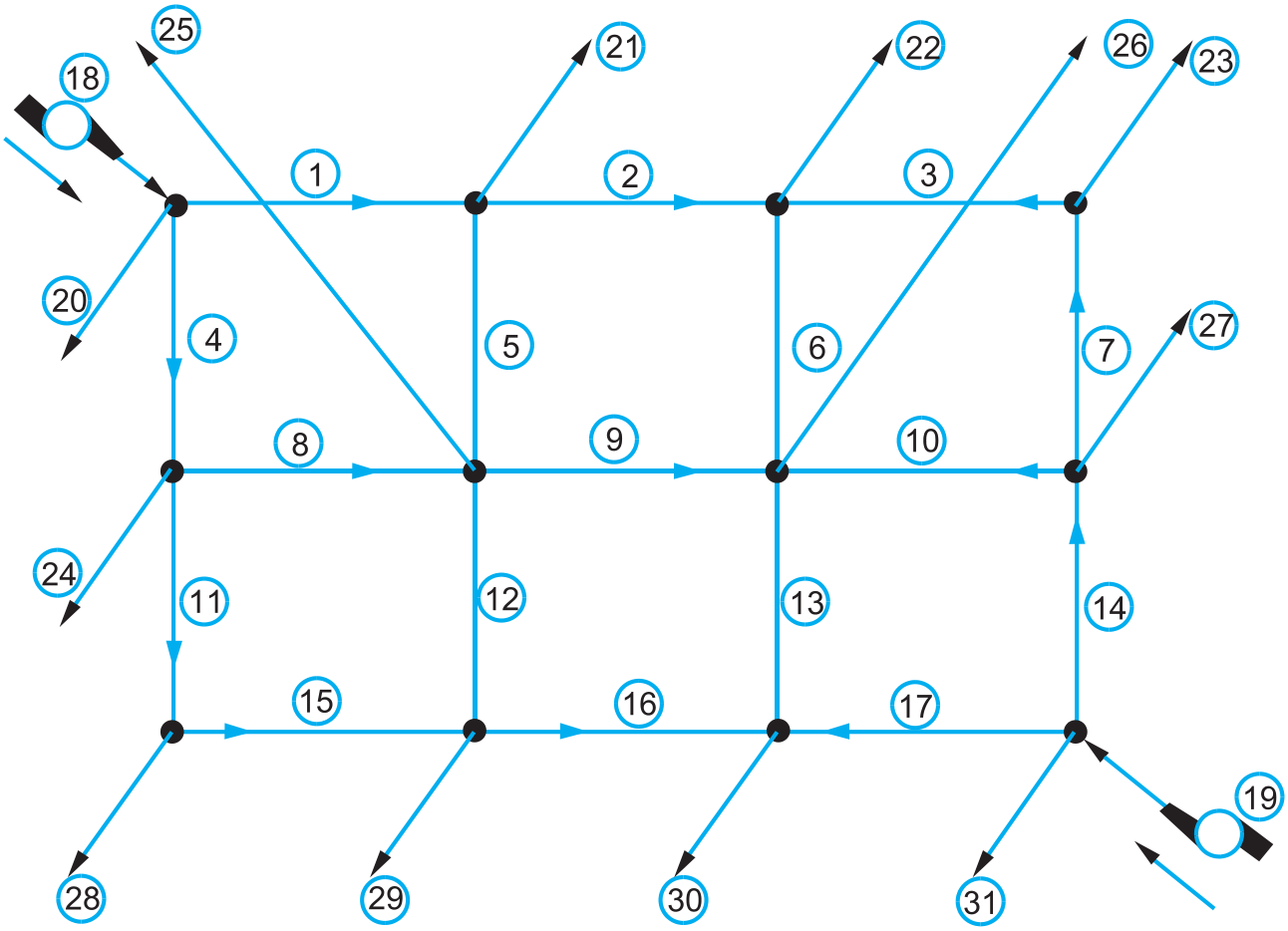



Рис. 1.2. Пример графа водопроводной сети и иллюстрация разбиения его на три непересекающихся подмножества

Пусть множество $E$ дуг графа водопроводной сети состоит из трех подмножеств: реальных дуг $M$, соответствующих участкам трубопровода; фиктивных активных дуг $L$, соответствующих входам сети (насосные станции); фиктивных пассивных дуг $N$, соответствующих выходам сети (потребители).

$M = \{1, \ldots, 17\}$ $\quad m = 17;$

$L = \{18,19\}$ $\quad l = 2;$

$N = \{20, \ldots, 31\}$ $\quad n = 12;$

$E = M \cup L \cup N$

$E = \{1, \ldots, 31\}$ $\quad e = 31.$

Пусть любая вершина графа — вход или выход (подача или забор воды в водосеть). Нулевая вершина является начальной (входом) для насосной станции и конечной — для подачи или забора воды в водосеть потребителей (фиктивные). Тогда

$$h_j = -P_j \qquad (j \in L), \tag{1.26}$$

$$h_j = P_j \qquad (j \in N). \tag{1.27}$$

Каждый из участков $j$ $(j \in L \cup N)$ будем характеризовать двумя величинами $q_j$ и $P_j$ и называть их входным узловым расходом и давлением, если $j \in L$, или выходным узловым расходом и давлением, если $j \in N$, т.е. номер узла совпадает с номером участка соответствующего входа или выхода сети. Если на участке $j$ $(j \in L \cup N)$ задано давление, то будем рассматривать этот участок как источник разности давлений $h_j = -P_j$ $(j \in L)$ и $h_j = P_j$ $(j \in N)$ с внутренним сопротивлением $S_j = 0$. Если на этом участке задан расход, то будем считать его источником тока $q_j$ с внутренним сопротивлением $S_j = \infty$.

Приведем сравнение с формулой потерь напора на водосети

$$h_j = S_j q_j^n,$$

где $S_j$ — гидравлическое сопротивление участка.

Для реального участка трубопровода предполагается справедливым соотношение

$$h_j = S_j \operatorname{sgn} q_j \left|q_j\right|^{\chi_j} \qquad (j \in M). \tag{1.28}$$

С учетом выражений (1.26) — (1.28) рассматриваемая математическая модель примет вид

$$\begin{aligned} f_r = S_r \operatorname{sgn} q_r \left|q_r\right|^{\chi_r} + h_r^{(\Gamma)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri}(S_i \operatorname{sgn} q_i \left|q_i\right|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) - \sum_{i \in L_1} b_{1ri} P_i + \\ + \sum_{i \in N_1} b_{1ri} P_i = 0 \quad (r \in M_2); \end{aligned} \tag{1.29}$$

$$f_r = -P_r + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i \left|q_i\right|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) - \sum_{i \in L_1} b_{1ri} P_i + \sum_{i \in N_1} b_{1ri} P_i = 0 \quad (r \in L_2); \tag{1.30}$$

$$f_r = P_r + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i \left|q_i\right|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) - \sum_{i \in L_1} b_{1ri} P_i + \sum_{i \in N_1} b_{1ri} P_i = 0 \quad (r \in N_2); \tag{1.31}$$

$$q_i = \sum_{r \in E_2} b_{1ri} q_i \qquad (i \in E_1). \tag{1.32}$$

Теперь перейдем к математической формулировке задачи оптимизации режима работы насосных станций при их совместной работе на водосеть:

$$y = \sum_{j \in N} (P_j^{(H)} - P_j^{(H)+}) \to \min_{\Omega}, \tag{1.33}$$

где $\Omega$ характеризуется уравнениями (1.29) — (1.31);

$$q_i = \sum_{r \in M_2 \cup L_2 \cup N^{(\sigma)}} b_{1ri} q_i + Q_i^+ \qquad (i \in E_1). \tag{1.34}$$

Здесь

$$Q_i^+ = \sum_{r \in N} b_{1ri} q_i^+ = \text{const} \qquad (i \in E_1); \tag{1.35}$$

$$q_j = q_j^+ \qquad (j \in N); \tag{1.36}$$

$$P_j^{(H)} \geq P_j^{(H)+} \qquad (j = N). \tag{1.37}$$

Значение $S_j$ определяется здесь по одной из известных формул или эмпирически, как результат измерений и решения задачи параметрической идентификации [61]. Математически это задача нелинейного программирования при ограничениях в виде равенств и односторонней ограниченности переменных. Будем решать ее следующим образом: сначала решим эту задачу при условии, что на насосных станциях известны расходы; затем на базе этой программы осуществим поиск в сетке расходов по $(l-1)$-й насосной станции, где $l$ — число этих станций.

Исходными данными для оптимизации режима работы проектируемых насосных станций при их совместной работе в сети являются:

структура сети;

местоположение входов и выходов сети, а также подача и расход воды в них;

параметры магистральных участков: длина трубопровода, диаметр трубопровода, геодезические отметки начала и конца участка трубопровода;

зависимость между потерями напора и расхода соответствующего участка водосети;

минимально допустимые свободные напоры на фиктивных участках (выходах сети).

Цель расчета — определить давление на входах сети и водораспределение в ней, обеспечивающие заданные расходы воды на входах и выходах этой сети. Очевидно, что такая задача имеет бесконечное множество решений. Для однозначного решения (самого экономичного) необходимо определить так называемую диктующую точку сети, в которой свободный напор, полученный в результате решения, должен быть равен минимально допустимому.

Сформулируем эту задачу математически:

$$y = \sum_{j \in L} h_j^{(a)} q_j \to \min_{\Omega}, \tag{1.38}$$

$$\Omega: \qquad f_r = S_r \operatorname{sgn} q_r |q_r|^{\chi_r} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} = 0 \quad (r \in M_2); \tag{1.39}$$

$$f_r = h_r^{(H)} - h_1^{(a)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) = 0 \quad (r \in N); \tag{1.40}$$

$$\begin{aligned} f_r &= S_r \operatorname{sgn} q_r |q_r|^{\chi_i} - h_r^{(a)} + h_r^{(\Gamma)} + h_1^{(a)} + \\ &+ \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) = 0 \quad (r \in L_2); \end{aligned} \tag{1.41}$$

$$q_i = \sum_{r \in M_2} b_{1ri} q_i + Q_i \qquad (i \in E_1), \tag{1.42}$$

где

$$Q_i = \sum_{r \in L_2 \cup N \cup N^{(\sigma)}} b_{1ri} q_i^{+} = \text{const} \qquad (i \in E_1); \tag{1.43}$$

$$h_j^{(H)} \geq h_j^{(H)+} \qquad (j = N). \tag{1.44}$$

Здесь уравнения математической модели (1.39) — (1.42) сформулированы при следующем кодировании сети: дерево графа выбрано таким образом, чтобы фиктивные участки сети, участки с активными источниками стали хордами. При этом реальные участки частично станут хордами, а частично — ветвями дерева. Ветви дерева с насосом присвоен номер 1; $L$, $M$ и $N$ обозначены множества индексов участков: с активными источниками, магистральных (участки водосети) и фиктивных соответственно. При этом $L = L_1 \cup L_2$, $M = M_1 \cup M_2$,

$N = N_2$, $L_1 = \{1\}$, (1 и 2 — соответственно индексы ветви дерева и хорды), а

$$h_r^{(\Gamma)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} h_i^{(\Gamma)} = 0 \quad (r \in M_2) \tag{1.45}$$

по любому замкнутому циклу $B$, содержащему магистральные участки сети; $q_j = q_j^+ = \text{const}$ $(j \in L \cup N)$; $h_j^{(\Gamma)} (j \in M)$ — разность геодезических отметок между концом и началом $j$-го магистрального участка.

В приведенной математической модели предполагается, что участки с активными источниками направлены от фиктивного узла к сети, а фиктивные участки — наоборот.

Итак, рассматриваемая задача (1.38) — (1.44) является задачей нелинейного математического программирования, сложность которой резко возрастает с ростом размерности подсистем подачи и распределения воды.

Покажем, что эту сложную оптимизационную задачу при произведенном кодировании можно значительно упростить и свести к последовательности решения трех задач:

1) увязка колец сети — решение уравнений (1.39) при условии (1.42);

2) выбор диктующей точки и определение напора на выходе насосной станции в первой ветви дерева;

3) определение остальных напоров насосных станций и свободных напоров в узлах сети.

Рассмотрим алгоритм решения этой задачи.

Произведем увязочный расчет, т.е. решим систему нелинейных алгебраических уравнений (1.39) при $(\upsilon - 1)$-м линейном уравнении связи (1.42).

Определим требуемый напор на выходе первой насосной станции. Для этого в уравнение (1.40) подставим полученные в результате увязочного расчета потери напора и найдем значения $f_r$ $(r \in N)$ при условии, что $h_r^{(H)} = h_r^{(H)+}$, а $h_1^{(a)} = 0$, т.е.:

$$H_r = h_r^{(H)+} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) \qquad (r \in N) \ . \tag{1.46}$$

Величины $H_r$, найденные по формуле (1.46), и соответствуют потерям напора от начала ветви 1 до узла с узловым расходом $q_r$ плюс потери напора, учитывающие минимальные свободные напоры в узлах.

Сравнивая полученные величины $H_r$ $(r \in N)$, определим путь с максимальной потерей напора $H_k$ и выберем $h_1^{(a)}$, равной этой потере напора:

$$h_1^{(a)} = \max_{r \in N} \{H_r\} = H_k \, . \tag{1.47}$$

Узел $k$ при этом будет диктующей точкой.

Найдем истинные свободные напоры, требуемые значения напора на выходе остальных насосных станций, подставив значение $h_1^{(a)}$ из формулы (1.47) в уравнения (1.40), (1.41):

$$h_r^{(H)} = h_1^{(a)} - \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) \quad (r \in N); \tag{1.48}$$

$$h_r^{(a)} = S_r \operatorname{sgn} q_r |q_r|^{\chi_i} + h_r^{(\Gamma)} + h_1^{(a)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} (S_i \operatorname{sgn} q_i |q_i|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)}) \quad (r \in L_2). \tag{1.49}$$

Покажем теперь, что изложенная здесь последовательность решения трех задач есть одновременно решение оптимизационной задачи (1.39) — (1.44).

Очевидно, что такое решение допустимо, поскольку оно является решением уравнений (1.39) — (1.41) и одновременно удовлетворяет неравенству (1.42). Более того, оно

соответствует минимуму линейной относительно $h_j^{(a)}$ $(j \in L)$ функции (1.38), поскольку положительная величина $h_1^{(a)}$, полученная согласно выражению (1.47) (особенность рассматриваемой задачи) — наименьшая, которая может обеспечить требуемое водораспределение без нарушения условия (1.44).

Согласно же (1.49)

$$h_r^{(a)} = h_1^{(a)} + A_r, \tag{1.50}$$

где

$$A_r = S_r \operatorname{sgn} q_r \left|q_r\right|^{\chi_i} + h_r^{(\Gamma)} + \sum_{i \in M_1} b_{1ri} S_i \operatorname{sgn} q_i \left|q_i\right|^{\chi_i} + h_i^{(\Gamma)} \quad (r \in L_2), \tag{1.51}$$

т.е. при наименьшем $h_1^{(a)}$ и $h_r^{(a)}$ $(r \in L_2)$ будут наименьшими, а данное решение будет соответствовать наименьшему значению минимизируемой функции (1.48), что и требовалось доказать.

Таким образом, вместо решения сложной задачи математического программирования (1.38) —(1.44), с учетом специальных свойств рассматриваемой задачи, предложен несоизмеримо более простой способ, который сводится к решению системы уравнений (1.39), (1.42), имеющей, несмотря на нелинейность, единственное решение, и к простому вычислению по формулам (1.48), (1.49).

Более того, можно показать, что предлагаемая процедура решения рассматриваемой задачи является решением и другой оптимизационной задачи, минимизируемой функцией которой является критерий суммарных избыточных напоров

$$y = \sum_{j \in N} \left( h_j^{(H)} - h_j^{(H)+} \right), \tag{1.52}$$

заданный на той же области допустимых решений Ω, определяемой ограничениями (1.39) — (1.44).

Действительно, согласно (1.48) значения $h_r^{(H)}$ $(r \in N)$ будут наименьшими при минимальном $h_1^{(a)}$, что соответствует минимуму функции (1.52), т.е. оба критерия (энергетические затраты и суммарные избыточные напоры) достигают минимума на множестве (1.39) — (1.44) в одной точке, которая может быть найдена в результате решения этой задачи.

Подготовительные работы по созданию модели для реальной системы ПРВ зависят от объема имеющейся информации о водосети: диаметр, длина, геодезическая высота, статистика потребления воды отдельными микрорайонами и крупными потребителями и пр. Требуется проведение анализа реальных условий расхода воды и давлений. Точность моделирования водораспределения в результате решения рассмотренных ранее задач оптимизации во многом будет определяться точностью исходных данных задачи, т.е. степенью адекватности математической модели реальному водораспределению.

Решение последней проблемы сводится к задаче идентификации состояния водораспределения в реальной сети, позволяющей по замерам давлений и расхода воды в некоторых узлах сети оценить их значения, потери напора и расход воды на магистральных участках этой сети.

Постановка задачи и ее решение более подробно изложены ранее [61].

Задача идентификации состояния водораспределения представляет собой задачу оценки значений расходов воды во всех участках сети и давлений во всех узлах на основании измерения только некоторых из них. Сформулируем ее математически.

Исходные данные:

геометрическая структура сети;

параметры ее магистральных участков:

сопротивления $S_j$ $(j \in M)$ или длины участков и диаметры $l_j$, $D_j$ $(j \in M)$ совместно с зависимостью $S_j(l_j, D_j)$,

коэффициенты нелинейности $\chi_j$ $(j \in M)$,

разности геодезических отметок $h_j^{(\Gamma)}$ $(j \in M)$;

местоположение и величины замеров давлений $P_j^*$ $(j \in L \cup N)$ и расходов $q_j^*$ $(j \in L \cup N)$ на ряде входов и выходов сети;

зависимости $h_j(q_j)$, раскрытые для всех $j \in M$.

Пусть $\varepsilon_i$ и $\delta_i$ — ошибки измерений давления и расхода воды соответственно. Тогда

$$P_i^* = P_i + \varepsilon_i \quad \left(i \in L^P \cup N^P\right) ; \; q_i^* = q_i + \delta_i \quad \left(i \in L^q \cup N^q\right) ,$$

где $L^P$, $N^P$ — множество индексов дуг, соответствующих входам и выходам сети, где измерялось давление;

$L^q$, $N^q$ — множество индексов дуг, соответствующих входам и выходам сети, в которых измерялся расход воды.

Полагаем, что $\varepsilon_i$, $\delta_i$ распределены по нормальному закону и нам известны значения дисперсий $\sigma_{P_i}^2$, $\sigma_{q_i}^2$.

Необходимо получить оценки измеренных величин и функционально связанных с ними давления, расхода воды и потерь напора в остальных участках подсистемы подачи и распределения воды, т.е. найти $\tilde{P}_j$, $\tilde{q}_j$ $\left(j \in L \cup N\right)$ и $\tilde{h}_j$, $\tilde{q}_j$ $\left(j \in M\right)$.

Для получения искомых оценок воспользуемся методом максимального правдоподобия. При этом функция максимального правдоподобия примет вид:

$$\begin{aligned} L = 2\pi^{-\frac{l_1+n_1+l_2+n_2}{2}} \prod_{j \in L^P \cup N^P} \sigma_{P_j}^{-1} \prod_{j \in L^q \cup N^q} \sigma_{q_j}^{-1} \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{j \in L^P \cup N^P} \sigma_{P_j}^{-2} \left(P_j - \tilde{P}_j\right)^2\right] \times \\ \times \exp\left[-\frac{1}{2} \sum_{j \in L^q \cup N^q} \sigma_{q_j}^{-2} \left(q_j - \tilde{q}_j\right)^2\right], \end{aligned} \tag{1.53}$$

где $l_1$, $n_1$, $l_2$, $n_2$ — мощности множеств (количество элементов) $L^P$, $N^P$, $L^q$, $N^q$ соответственно.

Как известно [64], максимум функции (1.53) достигается в случае, если

$$y = \sum_{j \in L^P \cup N^P} \sigma_{P_j}^{-2} \left(P_j - \tilde{P}_j\right)^2 + \sum_{j \in L^q \cup N^q} \sigma_{q_j}^{-2} \left(q_j - \tilde{q}_j\right)^2 \to \min_{q_j, P_j \in \Omega}, \tag{1.54}$$

где $\Omega$ — область, определяемая системой уравнений (1.29) — (1.34).

Таким образом, задача идентификации состояния потокораспределения в водопроводной сети является задачей нелинейного математического программирования при ограничениях в виде нелинейных равенств, число переменных и уравнений которой резко увеличивается с ростом размерности сети. Если нам заведомо известно, что какие-то давления или расходы на входах или выходах сети ограничены сверху или снизу, то задача оценки состояния потокораспределения становится задачей математического программирования при ограничениях в виде равенств и двусторонней ограниченности переменных.

Существующие модели управления системами ПРВ имеют значительные недостатки:

а) необходимость постоянной оценки адекватности узловых расходов, что на практике невозможно;

б) огромное количество измеряемой и обрабатываемой информации, резко усложняющее и удорожающее систему управления;

в) большое количество решаемых задач (сбор и обработка информации, прогнозирование выходных потоков, прогнозирование входных параметров, определение управляющих воздействий и их реализация и т. д.) для значительного числа объектов;

г) нереальная оценка сильного взаимного влияния работы насосных станций на общую систему ПРВ и др.

Самое же главное, что при таком подходе никто не гарантирует (из-за многочисленности случайных факторов), что будет найдено правильное решение, поэтому необходимо создание интерактивной системы для принятия решения, и для реальной эксплуатации систем ПРВ должен быть реализован более простой подход на базе замеров параметров в действующих системах ПРВ в городах.

## 1.3. ВЛИЯНИЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ

Из поколения в поколение люди неразумно распоряжались водными ресурсами Земли. Огромное количество водных запасов расходовалось нерационально, загрязнялось. Последствия такого расточительства и техногенного загрязнения дают о себе знать уже сегодня [9, 29, 105, 121, 136, 273, 323, 359]. Вместе с тем к проблеме увеличения водопотребления и одновременного ухудшения качества пресной воды внимание мировой общественности привлечено недостаточно, в то время как данная проблема представляет более значительную угрозу для народов, чем, скажем, наводнение или засуха в отдельных регионах планеты [127, 251, 324, 340].

Климатологи мира уже работают над проблемой оценки этого явления. Поскольку в настоящее время происходит медленное потепление и в то же время невозможно прогнозировать даже знак флуктуаций на обозримое будущее, необходимо иметь аппарат, который позволил бы оценить водопотребление в городах.

Еще в XIX веке некоторые ученые мира высказывали предположение, что в процессе развития цивилизации на планете могут произойти серьезные изменения климата, а в начале 70-х годов XX века ученый-климатолог М.И. Будыко опубликовал первый конкретный прогноз глобального потепления на ближайшее столетие вследствие увеличения содержания углекислого и других «парниковых» газов в атмосфере. Однако тогда мало кто поверил в реальность такого прогноза. Наблюдения, проведенные за последние два десятилетия, когда глобальная температура ежегодно беспрецедентно повышалась и была самой высокой за весь период наблюдений (с 1850 г.), убедили ученых, что это отнюдь не случайность [270, 314, 324, 353].

Изменение гидробиологического и солевого состава воды в связи с повышением температуры уже наглядно демонстрирует растущие проблемы для систем водоснабжения, в том числе и для пресноводных экосистем [37, 193]. Прогнозирование антропогенных изменений климата и комплексное изучение возможных последствий глобального потепления стали предметом пристального внимания ученых и правительств многих стран мира. Исследования и наблюдения в этой области проводятся в рамках национальных и международных программ. В то же время проблемы водопотребления в условиях изменения климата обсуждаются лишь на уровне дискуссий. Большинство моделей будущего климата указывает на то, что количество зимних осадков будет возрастать в Северной и Центральной Европе, в летний период возможна и засуха. Изменение климата вызовет соответствующую реакцию во многих системах, в том числе в сельском хозяйстве, пищевой промышленности, энергетике. В связи с этим спланированные действия прежде всего должны основываться на прогнозировании изменения климата, оценке последствий того, к чему могут привести те или иные естественные и антропогенные изменения климата, кроме того, необходимы рекомендации, которые смягчили бы негативные последствия изменения климата [76, 127, 165, 349].

Особое внимание проблеме глобального изменения климата было уделено на Второй Всемирной климатологической конференции в Женеве (ноябрь, 1990 г.) [314, 340] и на 21-м Международном конгрессе по водоснабжению в Мадриде (сентябрь, 1997 г.) [325]. В частности, было отмечено, что в ближайшие 20–40 лет прогнозируется повышение глобальной температуры воздуха на 2–3 °С. Наибольшее потепление (до 5–6 °С) будет иметь место в высоких широтах и зонах умеренного и холодного климата. Возможные последствия изменения климата неизбежно скажутся на состоянии водных ресурсов планеты, как наиболее чувствительных к климатическим изменениям и немедленно реа-

гирующих на них. Это вызывает наибольшее беспокойство ученых [327, 333, 334, 337, 338, 339, 340, 346, 347, 348, 350, 353, 355, 357].

Изменения гидрологического режима вызывают изменения пространственного и временного распределения осадков, их величины и продолжительности и, следовательно, влияют на характеристики стока поверхностной воды, а также водные ресурсы в почве. Например, при повышении годовой температуры воздуха на 1–2 °С и уменьшении осадков на 10 % можно ожидать уменьшения годового стока рек в районах недостаточного увлажнения на 40–70 %. Аналогичные выводы оказываются справедливыми и для водных ресурсов крупных экономических регионов. Так, ученые США подсчитали, что при потеплении климата на 2 °С и уменьшении осадков на 10 % для водохозяйственных районов страны, расположенных в засушливом климате, возможно сокращение ресурсов в 1,5–2 раза [314]. В отчете Тихоокеанского института Министерства внутренних дел США сделан вывод о том, что изменение климата в ближайшие сто лет может серьезно отразиться на гидроресурсах США. Предсказывается, что к 2010 г. температура повысится на 3–6 °С [314].

Гидрологи мира относят страны, в которых на человека приходится от 1000 до 2000 м$^3$ воды в год, к государствам с недостаточными водными ресурсами. К примеру, во Франции в год на каждого жителя приходится 8,5 тыс. м$^3$ природной воды, в США — 6,8 тыс. м$^3$, в Англии — 5 тыс. м$^3$, в Украине же эта цифра составляет 0,67 тыс. м$^3$.

Запасы воды в Украине меньше, чем в США, почти в 10 раз и в целом не обеспечивают необходимого стратегического развития. В таких странах, как Украина, для экономического развития необходимо проводить жесткое нормирование воды, ее учет и контроль, предусмотреть государственные компенсации за экономию воды, тепла, электроэнергии. Централизованные системы водоснабжения — одна из стратегических систем, имеющих целью обеспечить достаточное количество и качество обслуживания, гарантировать максимальный срок службы существующих сооружений и их пропускную способность, активно проводить работы по эксплуатации и содержанию сооружений, учитывая при этом объемы, время и издержки. Эффективность определяется уровнем наличия ресурсов (воды, энергии и т. д.) [165, 193].

К основным недостаткам существующей системы управления водным хозяйством следует отнести ее перенапряженность, недостаточную управляемость, низкую эффективность реализации новейших достижений водоохранной науки и практики, ведомственную разобщенность, экономическую нестабильность.

Предприятия жизнеобеспечивающей отрасли — водопроводно-канализационного хозяйства городов Украины, вступили в XXI век, находясь в критическом (более чем кризисном) состоянии по износу основных фондов, возможностям систем очистки воды, финансово-экономическому состоянию, по внедрению современных технологий и обновлению оборудования с целью реализации программ ресурсосбережения и улучшения качества услуг. Так, по данным Минжилкомхоза Украины, четвертая часть водопроводных сооружений (в денежном выражении) отработала нормативный срок амортизации. Полностью исчерпала свой амортизационный ресурс каждая пятая насосная станция. Почти 40 % находящегося в эксплуатации насосного оборудования физически изношено [156, 236].

В крайне неудовлетворительном состоянии находятся системы подачи и распределения воды, что приводит к потерям питьевой воды и возможности ее вторичного загрязнения. Больше половины наружных сетей и все внутридомовые сети — стальные, срок эксплуатации которых превышает 15–20 лет, в системах горячего водоснабжения — 10 лет. Около 30 % существующих водопроводных сетей (25 тыс. км) требуют незамедлительной перекладки и санации, для чего необходимо капитальных вложений около 50 млрд грн. Количество аварий на водопроводных сетях (до двух аварий за год на 1 км сетей) на порядок превышает соответствующий показатель в странах Европы [156, 193, 236].

Многообразие явлений и процессов, происходящих в гидросфере с далеко не всегда разумным, а нередко хищническим использованием воды, приводит к обострению водной проблемы. В странах с ограниченными водными ресурсами количественное и качественное

истощение природных вод уже сегодня стало реальной угрозой, а в странах, богатых водой, проблемы ее комплексного использования и охраны приобретают огромное значение [54, 151, 226]. Потребление воды в народном хозяйстве превосходит суммарное потребление всех видов ресурсов и продукции. Например, для добычи одной тонны нефти необходимо затратить не менее 10 м$^3$ воды, для производства тонны стали — 100, тонны бумаги — 250, тонны ацетатного шелка — 2600, лавсана — 4200, капрона — 5600 м$^3$ воды [226].

В условиях возможного влияния изменения климата на состояние гидроресурсов рациональное их использование станет определяющим в жизнедеятельности многих государств. Производство питьевой воды должно быть подготовлено к различным сценариям изменения климата на Земле. Вместе с тем огромное значение приобретает и интенсивное обучение потребителей воды культуре водопользования в связи с ограничением предложений воды и возрастающим ее спросом в будущем. Должна быть тщательно оценена инфраструктура систем водоснабжения.

Мировое сообщество постепенно превращается в единый экономический и социальный организм, для которого проблемы запасов пресной воды, ее качества, загрязнения окружающей среды, сбережения пресных водных ресурсов и начала изменения климата на планете в XXI столетии будут иметь важнейшее значение, определять во многом жизнедеятельность грядущих поколений. Работы по компьютерному моделированию динамики изменения природно-климатических и других условий и их влияния на водопотребление в городах должны сыграть важную роль не только в оценке дефицита или избытка воды, во внедрении новых технологий для улучшения водопотребления и повышения его культуры, но и в определении пути эффективного развития водоснабжения городов при изменении климатических условий [80, 193, 314, 340].

В настоящее время эту работу можно осуществлять, сочетая квалифицированный мониторинг водопотребления в городах, расположенных в различных природно-климатических условиях, с компьютерным анализом состояния водоснабжения и последствий тех или иных сценариев изменения климата в городах, тенденции этих изменений для разработки организационно-технических мер, направленных на развитие и модернизацию системы водоснабжения. Важен анализ уязвимости водохозяйственных систем, их планирования и реагирования на условия изменения климата. Системы водоснабжения в будущем должны быть готовы к необходимости повышать эффективность водообеспечения населения [80, 193, 272].

Сегодня наука делает очередные шаги в формировании комплексного представления о биосфере и ее законах. Кроме того, существуют и естественные факторы изменчивости (колебания солнечной инсоляции, извержение вулканов и т. д.), с которыми нельзя не считаться [52, 109, 122, 353]. Тем не менее компьютерная имитация является сейчас единственным средством оценки ключевых параметров тенденции изменения водопотребления в городах с учетом природно-климатических условий [193, 216, 272].

Прогнозирование водоснабжения городов должно опираться на научное понимание основных параметров, оказывающих влияние на водопотребление. Необходимо пересмотреть предпосылки будущих проектов водоснабжения, их коэффициент полезного использования воды, правила эксплуатации и многое другое. У специалистов, осуществляющих водоснабжение городов, должна появиться методика прозрачной и объективной оценки процента неучтенной воды и утечек в системах водоснабжения для составления действенной программы водосбережения, а с этим — энергосбережения и т. д.

Потери воды в системах водоснабжения при ее транспортировании потребителю являются одной из причин неудовлетворительного водообеспечения населения. Сложившаяся практика занижения фактических потерь и неучтенных расходов воды в системах водоснабжения многих городов приводит к недооценке мер повышения эффективности работы систем водоснабжения не только в СНГ. Нужно четко представлять себе, что суммарные потери воды и нерациональные расходы в городах могут достигать от 15 до 60 % всего количества поданной потребителю воды. Следует заметить, что системы с утечками до 10–15 % в США, Германии, Франции относят к высокоэффективным [193, 330].

В ближайшие годы под воздействием многоплановых водных проблем начнет коренным образом меняться представление о функциональном назначении водопроводных

сооружений лишь как о «штатной» системе: добывающей, транспортирующей, очищающей, подающей, хранящей и распределяющей воду. Государственные деятели стран будут обращать все большее внимание на то, что системы водоснабжения могут влиять на многие процессы:

темпы, ритм и состояние развития экономической интеграции в государстве, сбережение минерально-сырьевых ресурсов Земли;

снижение материализации труда многих отраслей, связанных с проектированием, участвующих в строительстве и эксплуатации водохозяйственных систем;

состояние здоровья и продолжительность жизни человека;

процесс эффективности водосбережения и уменьшение загрязнений водных ресурсов от возвратных стоков городов, сельского хозяйства, промышленности;

снижение межрайонной переброски водных ресурсов и др.;

на межгосударственные отношения;

благоприятный рост социально-политической активности населения в странах;

на усиление гражданской обороны водообеспечения стран, защиту населения в экстремальных ситуациях на водохозяйственных системах [165].

Всесторонний анализ и хорошо организованная оценка работы водохозяйственных систем и состояния использования водных ресурсов способны обеспечить ключевой информацией, расширить знания для принятия компетентных решений, направленных на развитие их КПД, для оправдания государственных и иных капитальных расходов, повышения уровня управления процессами водосбережения и водоохраны.

Специалистам водоснабжения нужно действовать в соответствии с новым подходом к вопросам водосбережения, извлекать уроки из реальных условий растущей деградации нашей экологии, поставить преграду необоснованному приросту водопотребления, безвозвратным, нерациональным и другим потерям воды в водохозяйственных системах, загрязнению водных ресурсов и сокращению водоносности рек. Следует вовлечь в оборот стран нетрадиционные источники — минерализованные и морские воды, уменьшать стоимость их опреснения, ускоренно осуществлять разработку и создание безотходных технологий. Необходимо каждой каплей сэкономленной воды сокращать скорость изъятия воды из природы. Важнейшим условием практического водосбережения и водоохраны в промышленных центрах должно стать научное развитие прогнозирования и нормирования водообеспечения городов — суперпотребителей водных ресурсов. Развитие учения о закономерности формирования удельного среднесуточного (за год) водопотребления в городах позволяет не только выявить дефицит воды и ее резервы, но и направить водохозяйственную деятельность на путь интенсификации и сбалансированное развитие во времени, оценить корректность привлечения дополнительных водных ресурсов для городов, а значит, и экономическую целесообразность многоплановых затрат [156, 165].

По прогнозам, численность населения на планете в 2090 г. будет составлять около 14 млрд человек, т.е. столько, сколько ресурсы планеты способны прокормить и напоить. Негативное влияние на состояние здоровья людей, продолжительность их жизни будет оказывать растущее загрязнение городов и как следствие — увеличение зон загрязнения (ореолов) вокруг них, которые являются территориями основного производства сельхозпродуктов и где, как правило, расположены открытые источники водоснабжения городов и их водозаборы.

Забота о воде должна быть в мыслях, словах и делах человека. Он обязан научиться относиться к воде с гражданской ответственностью и должным уважением, так как это определяет его дальнейшую судьбу. Беречь и ценить воду, охранять окружающую среду, бесценное сокровище, данное людям природой, становится законом номер один нашей жизнедеятельности [136, 193, 216].

Поэтому проблемы прогнозирования водопотребления в городах с учетом изменения природно-климатических условий, выявления резервов, повышения надежности и устойчивости систем водоснабжения чрезвычайно актуальны. Решение их в настоящем и в будущем необходимо для цивилизованного развития человечества, охраны окружающей среды, бережливого использования ограниченных запасов пресных водных ресурсов Земли.

## 1.4. АНАЛИЗ РАБОТЫ СИСТЕМ ПОДАЧИ И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ

В монографиях [1, 2, 4, 6, 8, 18, 44, 59, 60, 63, 117, 124, 140, 159, 193, 219, 305] изложены теоретические основы и результаты рационального управления инженерными сетями жизнеобеспечения населения. Существующая практика развития систем водообеспечения населенных мест, связанная с покрытием дефицита воды, как правило, базируется на освоении и вводе в эксплуатацию новых мощностей. Это связано с дополнительными финансовыми, материальными и другими затратами. В то же время в самих водопроводных системах скрыты большие резервы, использование которых позволяет добиться существенного снижения непроизводительных материальных и энергетических затрат во многих отраслях народного хозяйства, улучшить обеспечение населения и промышленности водой и получить в результате значительный народнохозяйственный эффект [2, 24, 25, 58, 77, 193]. Реализация этих резервов в первую очередь должна основываться на новых методах эксплуатации систем ПРВ и управления этими системами в процессе их эксплуатации и развития. Данные методы позволяют [2, 49, 58, 79, 117, 193, 318]:

максимально снижать непроизводительные потери ресурсов благодаря анализу режимов функционирования систем ПРВ и повышению оперативности принятия решений в процессе их эксплуатации и развития;

повышать надежность и живучесть систем ПРВ путем их оптимизации с помощью имитационного моделирования;

тестировать варианты возможных решений по управлению системой ПРВ в процессе ее эксплуатации с помощью имитационного параметрического и структурного моделирования;

оперативно идентифицировать текущее состояние системы ПРВ в зависимости от положения запорно-регулирующих устройств и т. п., графически интерпретировать и визуализировать на экране монитора (статическая идентификация), идентифицировать изменение текущего состояния ПРВ в зависимости от изменения положения одного или группы регулирующих органов (динамическая идентификация);

уменьшать ущербы от аварий в водораспределительной сети благодаря более оперативной локализации аварийной зоны, а также разумному взаимодействию с диспетчерами служб эксплуатации других инженерных систем города (например, с системами теплообеспечения и горячего водоснабжения, энергоснабжения).

Наиболее важную роль в рациональном использовании водных ресурсов региона играет система ПРВ, которая непосредственно связана с эксплуатацией насосных станций, резервуаров, водопроводной сети города [120, 193, 294]. Водосети относятся к классу непрерывно эволюционирующих систем, развитие которых осуществляется как во времени, так и в пространстве. Основное функциональное назначение системы ПРВ — обеспечить потребителей целевым продуктом — водой требуемого количества и качества и под заданным давлением с минимальными потерями напора на сетях. Водопотребление является, как правило, нестационарным стохастическим процессом, содержащим детерминированные монотонно возрастающие тренды и периодические компоненты, параметры которых изменяются во времени [60, 61].

Уровень обслуживания, обеспечиваемый системой водоснабжения и водораспределения, — одна из основных проблем, с которыми сталкиваются водопроводные хозяйства [58, 193, 293, 295].

Основной характеристикой любой существующей или планируемой системы водоснабжения или водораспределения является ее способность адекватно функционировать, т.е. должным образом выполнять поставленную перед ней задачу при самых разных возможных условиях работы, в частности при тех, которые ожидаются на протяжении срока ее службы [193, 291, 316].

При оценке вероятного функционирования системы водоснабжения зачастую выпускают из виду ее многоплановый характер. Для водопроводов нет четкого определения понятия характеристики системы. Здесь к решению задачи подходят с относительной фрагментарной перспективой и испытывают трудности при разработке методов функционирования системы

для всей совокупности условий работы, с которыми в действительности она сталкивается. Традиционный технический подход основан на минимизации стоимостных факторов с соблюдением некоторых упрощенных ограничений. Так, оптимальным обычно считается повышение эффективности работы системы насосных станций, эффективности режимов на водосетях или дезинфекции воды, обеспечивающей безопасность водообеспечения населения. В практике эксплуатации гидродинамическим характеристикам системы ПРВ уделяется недостаточное внимание. Вместе с тем они играют значительную роль в оценке сбалансированного комплексного подхода к рациональному управлению системой водораспределения.

В Украине, как и во многих странах бывшего СССР, наметилась ориентированная на рынок водопотребителя тенденция обеспечивать за минимальную оплату услуг более высокий уровень обслуживания, включая улучшение качества воды [11, 193, 215, 273]. Такая тенденция требует изменения методов и способов оперативного управления системой ПРВ.

Современные системы управления водоснабжением нельзя считать эффективными, если они не имеют информационной технологии. Как правило, для внедрения в водопроводных хозяйствах информационных систем требуется около 10 лет. Обычно те, кто внедряет АСУ ТП, могут лишь частично, по блокам, обсуждать результаты внедрения АСУ.

В системе ПРВ существует принцип, который мотивируется очевидной необходимостью обеспечить достаточный расход воды с требуемым напором и удовлетворительным качеством воды. Критериями качества работы водосети на практике является соблюдение двух условий — напор в каждой точке подачи воды должен находиться между минимальным и максимальным допустимыми значениями, составляющими 20 и 60 м вод. ст. соответственно, а колебание напора в сети не должно превышать 45–50 % максимально допустимого напора [193, 294].

В таких условиях работы водораспределительной сети большое значение имеет контроль скорости потока в ее трубопроводах. Это важно потому, что ударное давление при гидроударах изменяется прямо пропорционально номинальному значению средней скорости в трубе. Предельная скорость потока в воде — это первый показатель, ограничивающий скорость потока в трубопроводе сверху. С другой стороны, низкая скорость воды в сети может привести к чрезмерным отложениям осадков и ухудшению качества воды в водосети. Поэтому существует показатель, ограничивающий скорость потока в трубопроводе снизу [100, 140, 193]. Скорость в трубопроводе системы ПРВ должна быть не менее 0,2 м/с и не более 1,3 м/с, т.е. для $j$-го трубопровода $0{,}2 \le V_j \le 1{,}3$ м/с. Это тем более важно, что при таких скоростях еще не происходит существенного ухудшения качества воды из-за повышения ее мутности при транспортировании воды к потребителю [102, 193].

При анализе систем ПРВ проверяется и совершенствуется уже имеющаяся информация о системах, а также устанавливаются неизвестные до этого момента данные, характеризующие основные гидродинамические и прочие параметры системы. Могут быть обнаружены слабые места системы ПРВ и предложены соответствующие меры по их предотвращению.

В современных условиях перехода водоканализационных предприятий к работе в рыночных условиях особое значение приобретают вопросы технико-экономического обоснования работы системы ПРВ. Решение технико-экономических задач водопроводных сетей в общем виде было получено В.Г. Лобачевым, Л.Ф. Мошниным, М.В. Кирсановым, В.П. Сироткиным. Практически все они при решении рассматриваемых задач использовали такие критерии, как затраты на строительство и транспортирование воды [91, 124, 140, 240]. При этом Л.Ф. Мошнину принадлежит исключительно важная роль в разработке методов определения экономически наивыгоднейших диаметров водоводов при известных из начального потокораспределения участковых расходах. Метод Л.Ф. Мошнина базируется на проведении полного технико-экономического расчета для заданного режима водопотребления, с принятием в качестве обобщенного критерия экономичности приведенных ежегодных затрат. Учет дискретности задачи стандартных диаметров труб здесь производится с помощью так называемых предельных расходов, значения которых табулированы [124, 139, 159].

Задача реконструкции сетей совместно с задачей технико-экономического расчета проектируемой сети в работах Н.Н. Абрамова выражается как задача дискретного математи-

ческого программирования, которая трудноразделима и при использовании приближенных методов может дать далеко не оптимальное решение [1, 2, 4, 8].

В работах А.Г. Евдокимова, А.Д. Тевяшева показано, что оптимизация водопроводных сетей на множестве диаметров по критерию капитальных и эксплуатационных затрат является задачей нелинейного математического программирования [59, 60, 63]. Ее решение с помощью ЭВМ является приближенным, так как точное решение не может быть получено из-за дискретности значений стандартных диаметров труб. В основе математической модели лежат первый и второй законы Кирхгофа. Однако формулируемая задача дискретной нелинейной оптимизации не решается в общем виде, а заменяется вспомогательной задачей непрерывного математического программирования. Поэтому при использовании данной модели может быть получен лучший, но не самый лучший вариант сети.

Задача оптимизации диаметров в инженерных сетях решается Е.П. Григоровским путем кусочно-линейной аппроксимации участка длиной $l$ через участки стандартной длины со стандартными диаметрами [49, 51]. Здесь задача определения экономичных диаметров сводится к определению таких длин участков, при которых приведенные затраты на строительство и эксплуатацию водопроводных сетей с учетом некоторых ограничений будут минимальными.

При выполнении работ по структурной оптимизации сетей базируются на двух подходах. Первый, получивший название проблемы Штейнера–Вебера, сводится к поиску наивыгоднейшей конфигурации трубопроводных сетей при заданном множестве точек ветвления с нахождением их оптимальных соединений [26, 138, 153, 213]. Другим подходом является предварительное построение так называемой избыточной схемы сети, учитывающей все ограничения по трассировке и содержащей возможно большее число вариантов конфигураций с реально допустимыми связями между точками ветвления. Оптимизация сети достигается отбрасыванием ненужных связей с выделением оптимального подграфа с наивыгоднейшим вариантом потокораспределения [133, 148, 149, 267]. Считается, что решение проблем структурной оптимизации сетей может быть сведено к исследованию возможностей метода избыточных проектных схем. В развитие данного подхода С.В. Сумароковым разработан метод многоконтурной оптимизации, включающий в качестве составной части метод динамического программирования, позволяющий выполнять технико-экономический расчет кольцевых водопроводных сетей [267]. Основным недостатком данного метода является его сложность и необходимость четкого взаимодействия проектировщиков и программистов.

В работах Г. Е. Кикачейшвили при решении задачи оптимизации диаметров водоводов выбран аппарат линейного программирования [89, 90]. При этом линеаризация происходит путем соответствующего подбора искомых переменных задачи, позволяющего построить линейную математическую модель. К недостаткам данного направления следует отнести большую размерность возникающих задач и значительное увеличение времени их решения.

Заслуживает внимания метод расчета, разработанный А.Е. Беланом и П.Д. Хоружим, в котором гидравлически неувязанная сеть рассматривается как неравновесная система, стремящаяся к равновесному (увязанному) состоянию [25, 159, 294]. При этом сеть увязывается путем определения контурных поправок расходов, вычисляемых с использованием инерционной составляющей напора, в результате чего для многокольцевой сети получается каноническая система линейных уравнений, что облегчает решение. Алгоритм технико-экономического расчета, предложенный П.Д. Хоружим [291, 293], способствует выбору оптимального потокораспределения с учетом требований надежности системы водоснабжения и является одним из наиболее приемлемых.

В работах И.Н. Рябченко предложены алгоритмы решения задачи технико-экономического расчета водораспределительных сетей, представляющие собой модификацию многошаговых алгоритмов решения задачи многокритериальной оптимизации [78, 231, 232, 233]. Эти алгоритмы могут быть использованы для расчета водосетей. Вместе с тем представление о том, что при аварии на действующей сети может возникнуть нулевое давление воды в трубе [193, 238], является ошибочным. При аварии в действующей водосети расходы воды увеличиваются, что зафиксировано с помощью ультразвуковых расходомеров. Следствием этого является падение давления воды в трубе, однако оно никогда не достигает нулевого значения. Предлагается оценивать прямые потери воды при аварии по форму-

ле $W = 3600\mu Ft\sqrt{2qH}$, в которой величины $F$, $H$, $\mu$ неизвестны и требуют проведения дополнительных исследований. Например, в Харькове аварии в водосети измеряются треугольным водосливом. Некорректно определяется средняя мгновенная скорость в водопроводной сети по формуле

$$Y = \frac{\sum_{i \in M} \frac{D_i}{4q_i}}{M}, \tag{1.55}$$

а также некорректно рассчитывается средний диаметр сети при изменении диаметров трубопроводов

$$Y = \frac{\sum_{i \in M} D_i}{M}. \tag{1.56}$$

Согласно [141] повышение эффективности систем ПРВ должно базироваться на всестороннем анализе условий работы систем, основанном на результатах гидравлических расчетов как при нормальном техническом состоянии систем ПРВ, так и в различных аварийных ситуациях. При проведении гидравлических расчетов должно учитываться взаимодействие всех элементов системы, в том числе и распределительных (внутриквартальных) сетей. Включение в расчетную схему внутриквартальных сетей дает возможность определить реальную величину отборов воды из сети.

В работах [86, 141, 143] представлен метод гидравлического расчета систем ПРВ. По методу последовательных приближений решается полная исходная система уравнений. Расходы воды по линиям сети, пьезометрические напоры в узлах, потери напора по линиям, а также напоры станций регулирования рассматриваются как равноправные независимые переменные. Этим они отличаются от существующих увязочных методов (контурного и узлового). Основным недостатком данного метода является большое число определяемых переменных.

В исследованиях Е.М. Гальперина [38, 219] показано, что надежность кольцевых систем ПРВ является основным требованием потребителя. Практика показывает, что ради достижения высокой надежности водоподачи в существующих системах диаметры труб значительно превосходят рекомендуемые. Существующая методика расчета кольцевых систем ПРВ и соответствующие разделы СНиП [249] практически не отражают это требование жизни.

За последние 20 лет создано много систем управления ПРВ [79, 103, 120, 294], позволяющих в той или иной степени повысить эффективность работы насосных станций, большинство из которых далеки от совершенства, так как с созданием и развитием комплекса новых технических средств, развитием социально-рыночных и финансово-кредитных отношений между отраслями повышаются требования как к качеству, так и к количеству предоставляемых населению услуг водоснабжения.

В настоящее время в управлении процессом водоснабжения в городах преобладает одноконтурная система, основанная на одном управляющем воздействии — изменении выходной производительности насосной станции (выходного давления и расхода). При этом зональная пьезометрия системы ПРВ при совместной работе насосных станций в системе ПРВ, как правило, слабо контролируется. Не используется для оперативного управления системой автоматическое регулирование двигателей на насосах.

Первый в истории автоматический регулятор, служащий для поддержания скорости вращения мельничного жернова, был изобретен еще 1588 г. Рамелли и в дальнейшем усовершенствован и использован Понселе для регулирования скорости вращения паровой машины. Этот принцип — «принцип Понселе», получивший название принципа управления «по возмущению», используется в современной теории автоматического регулирования [27, 322] и заключается в том, что управляющее воздействие в системе вырабатывается в зависимости от результатов измерения возмущения, действующего на объект.

В 1765 г. И.И. Ползуновым был построен автоматический регулятор для поддержания уровня воды в котле паровой машины, а в 1784 г. Уаттом изобретен центробежный регулятор скорости вращения вала паровой машины [27]. В этих регуляторах управляющее воздействие вырабатывалось на основе информации об отклонении управляемой величины от требуемого значения. Такой принцип в современной теории автоматического регулиро-

вания известен под названием принципа регулирования «по отклонению», или принципа Ползунова–Уатта.

Попытки построения системы управления насосным агрегатом, как основным элементом системы ПРВ, неоднократно предпринимались с 1950-х годов, но заметного эффекта они не дали, в основном из-за отсутствия средств регулирования производительности самого насосного агрегата и отсутствия надежных датчиков контроля технологических параметров. Кроме того, попытки автоматизировать работу насосного агрегата сводились к дублированию ручного управления, что не могло дать требуемого эффекта, так как не сочеталось органически с возможностями технологического оборудования. До начала 1970-х годов единственными способами регулирования подачи насоса были дросселирование и регулирование путем включения — отключения насосного агрегата. Первый способ, хотя и был наиболее простым, давал большие потери мощности на самой задвижке и значительно снижал КПД насосной станции. Второй способ приводил к быстрому износу пусковой аппаратуры и значительным электро- и гидравлическим толчкам в системе.

Только с 1980-х годов, с появлением преобразователей частоты [88, 284], стало возможным плавное регулирование режима работы насосного агрегата посредством изменения частоты вращения рабочего колеса насоса. В настоящее время этот способ регулирования является единственным эффективным способом, полностью исключающим гидроудары в трубопроводах, позволяющим производить плавный запуск и остановку насосного агрегата, тем самым снижая гидромеханические нагрузки на оборудование. Экономия электроэнергии в зависимости от режима работы насосного агрегата и его места в технологической схеме ПРВ при данном способе регулирования составляет 20–53 % [114, 229, 276]. Кроме того, регулирование с помощью преобразователя частоты сделало возможным синтез нового технологического процесса в органическом сочетании с управлением и без коренной реконструкции технологического оборудования.

Как уже отмечалось, попытки автоматизировать режим работы насосного агрегата в системе ПРВ на заре автоматизации сводились к дублированию ручного управления на более высокой ступени. Естественно, что прогресс в управлении режимом работы насосного агрегата не мог опередить развитие теории автоматического управления. До 60-х годов в автоматике изучались и рассматривались только одноконтурные системы управления, основанные, как правило, на стабилизации одного параметра и работающие по одному из принципов — либо «по возмущению», либо «по отклонению». Такие системы внесли определенный технический вклад в развитие автоматизации процесса ПРВ и принесли ощутимый экономический эффект, но они не могут обеспечить требуемого качества управления, так как строятся на положениях, учитывающих свойства одноконтурной обратной связи, и на ошибочном представлении о возможности свести, сохраняя все свойства, систему при любом количестве внешних возмущений к одноконтурной [75].

Еще в 1939 г. профессор В.Г. Щипанов доказал, что системы управления должны строиться с одновременным использованием принципов «по отклонению» и «по возмущению», т.е. только в этом случае регулируемая величина будет инвариантна к возмущению. Эта теория инвариантности стала теоретической основой современной теории комбинированных и многоконтурных систем управления, в которой утверждается, что увеличение числа контуров обратных связей придает системе управления качественно новые свойства, а все регуляторы, не использующие инвариантность, следует признать непригодными [275]. Современные системы управления, лежащие в основе управления летательных аппаратов и другой сложной техники, строятся на основе комбинированных систем управления, сочетающих в себе принципы «по возмущению» и «по отклонению». Благодаря реализации в таких системах условий инвариантности гораздо проще решать вопросы, связанные с обеспечением точности, оптимальности и быстродействия системы управления.

Однако современное состояние управления насосными агрегатами и процессами ПРВ в целом характеризуется использованием лишь концепции одноконтурного управления. Все системы управления основываются на поддержании (стабилизации) одного параметра давления (либо расхода) на выходе насосной станции или давления в диктующей точке сети [229]. Такие системы удовлетворительно работают в нормальных условиях, но при возникновении экстремальных ситуаций в водопроводной сети они становятся совершенно

неработоспособными, так как не имеют возможности получать дополнительную информацию и проводить ее анализ.

Рассматриваемая в настоящей работе система управления процессом ПРВ включает в себя двухконтурную систему управления, реализующую условия инвариантности.

Первый контур осуществляет управление производительностью насосного агрегата посредством изменения частоты вращения приводного двигателя насоса от преобразователя частоты по величине давления в диктующей точке сети. Этот контур управления использует принцип «по отклонению».

Второй контур управления, в зависимости от скорости изменения давления в диктующей точке, определяет и задает величину и скорость управляющего воздействия, уменьшая тем самым время реакции системы на произошедшее изменение и повышая точность поддержания контролируемого параметра. Кроме того, система позволяет производить вычисления и анализ скорости изменения сопротивления в сети ПРВ, этот контур обнаруживает и фиксирует экстремальные ситуации (аварию и др.) в водопроводной сети.

Подобная система дает возможность сделать первый шаг на пути к полной автоматизации системы управления процессом ПРВ, в отличие от автоматизированной, и наиболее полно использовать возможности применяемой современной микропроцессорной и компьютерной техники, которая описана в главе 5.

В зависимости от величины города, его топографии, протяженности зональных водопроводных сетей, транспортирующих воду от насосных станций к потребителям (система ПРВ), эквивалентного сопротивления системы ПРВ и требуемых свободных напоров у потребителей воды, для оптимизации режима водоснабжения все системы ПРВ в городах подразделяются на вертикальные и горизонтальные зоны [1, 290]. Практика водоснабжения в городах различна по культуре эксплуатации сооружений, управления системой ПРВ и насосными станциями, культуре водопотребления. Она зависит прежде всего от новаторского подхода коллектива к совершенствованию управления системой ПРВ, его понимания необходимости внедрения новых научно-технических решений для повышения безопасности водообеспечения населения и надежности водоснабжения.

Поскольку для многопараметрических систем ПРВ характерна стохастичность водопотребления, резонно в параметры управления ввести величины, позволяющие уменьшить ошибки управления, вызванные этими случайными факторами. Это аварии в водопроводных сетях, несанкционированные отборы воды, состояние запорной арматуры в водосети, течи в квартирных бачках и пр. [67, 81, 98, 235, 296].

Теоретические разработки и предложенные математические модели расчета сетей ПРВ [61, 79], хотя и предназначены для автоматизированных расчетов проектируемых систем ПРВ и оценки фактического состояния системы, тем не менее не могут отражать реальную картину состояния системы во времени (на протяжении суток, месяца, года и т. д.). Только сейчас, при наличии современных технических средств, появилась экспериментальная база, которая позволила увидеть и понять реальную жизнь системы ПРВ.

Поэтому проблема интенсификации работы систем ПРВ остается актуальной и требует проведения теоретических и экспериментальных исследований.

## 1.5. ПРИМЕНЕНИЕ АСУ В СИСТЕМАХ ВОДООБЕСПЕЧЕНИЯ

Широкое распространение за рубежом получили как АСУ ТП водоснабжения, так и организационно-экономическое управление. Исходя из соображений безопасности, фирмы, осуществляющие проекты АСУ ТП водоснабжения городов, не раскрывают своих методов и способов, программ контроля и управления системой кондиционирования, подачи и распределения воды. В источниках информации, как правило, сообщается лишь конечный результат АСУ ТП: значительное выравнивание напоров в системе ПРВ, снижение водопотребления и утечек из водосети, уменьшение численности обслуживающего персонала, в том числе операторов насосных станций, автоматический контроль по приборам учета воды и т. д. Имея возможность изучить работу водопроводов многих стран мира (США, Великобритании, Японии, Германии, Франции, Италии, Финляндии, Норвегии, Голландии

и др.) и руководя созданием первой в СССР АСУ ТП в Харькове, автор пришел к выводу, что в области водоснабжения в бывшем СССР не перенимались эффективные методы оперативного управления и ресурсосбережения, принятые в названных странах. Мнимая экономия средств при строительстве и реконструкции объектов водоснабжения в то время не только не допускала создания корпоративной автоматизированной системы водоснабжения, но и изолировала специалистов СССР от зарубежного технического опыта, способного с течением времени принести государству значительный экономический эффект. Такая изоляция привела к тому, что в странах Европы и Америки существует совершенно иной подход не только к составу сооружений кондиционирования воды, но и к составу систем ее подачи и распределения, в том числе и к вопросам, касающимся АСУ. За рубежом не допускается создание ПРВ без устройства водонапорных башен или резервуаров, расположенных в диктующих точках системы. Это же касается и строительства башен и резервуаров при транспортировании воды от систем кондиционирования до города. Благодаря водонапорным башням в системах ПРВ стабилизируются напоры в водосети и давление воды в них значительно ниже, чем в системах ПРВ городов Украины. За рубежом широко развита локальная подкачка воды к домам, имеющим высоту от 20 до 25 м. Отсутствие таких условий в Украине обуславливает различные подходы к АСУ ТП и понуждает искать новые методы и способы решения задач повышения эффективного оперативного управления системами ПРВ в городах, приближаясь к решениям, близким к существующим в государствах ЕС.

Вопросам автоматизации и создания АСУ ТП ПРВ в городах СНГ в последнее десятилетие уделялось недостаточное внимание. Об этом свидетельствуют материалы, опубликованные в журналах «Водоснабжение и санитарная техника», «Городское хозяйство Украины», а также материалы международных конгрессов «ЭКВАТЭК» в Москве в 1998 и 2000 гг. и в Ялте в 1997, 1999, 2001, 2007 гг.

Сложившееся положение объясняется также значительным сокращением разработок в этом направлении из-за финансовых трудностей, испытываемых всеми водопроводами в связи с ограниченной платежеспособностью потребителей воды и отсутствием рыночных условий в системах водоснабжения. Обзор существующих публикаций по вопросам АСУ ТП, а также некоторые описания действующих систем и их сравнение с предлагаемыми автором и апробированными в настоящей работе подходами свидетельствуют о следующем.

В статье [69] приводится описание созданной в 1995 г. автоматизированной системы диспетчерского управления водоснабжением Ульяновска, которая охватывает 8 насосных станций и 12 контрольных точек водосети. В системе имеется ряд недостатков: не используется метод управления стабилизацией напоров в диктующих точках, а также двухконтурное управление, применяется телемеханика интегрированного управления по выделенным телефонным линиям. Более современные системы, такие, как функционирующая на коммунальном предприятии «Производственно-технологическое предприятие «Вода» (КП «ПТП «Вода»), используют интеллектуальные микроконтроллеры (например, КОМКОН), позволяющие работать как по выделенным телефонным линиям, так и по радиоканалу.

В работах [116] и [277] рассматривается программа EPANET, которая с успехом использована во Львове и Таллинне для реконструкции и зонирования сетей водопровода, наладки работы артезианских водозаборов. В то же время данная программа не использовалась для оперативного управления системой ПРВ в режиме реального времени, т.е. в совокупности с АСУ ТП ПРВ, как это реализовано на харьковском водопроводе.

В.М. Куранда [115] рассматривает проблемы повышения эффективности управления водоснабжением на основе создания АСУ. К сожалению, в работе не содержатся примеры создания таких систем на практике.

Регулирование производительности насосных станций с применением систем автоматического управления на базе регулируемого электропривода рассмотрено в работе [300]. Однако методы использования таких систем совместно с АСУ ТП ПРВ в работе не предложены.

М.Ю. Юдин с соавторами [321] приводят результаты применения программного обеспечения фирмы ИВЦ «Поток» для водопроводных сетей Санкт-Петербурга, с помощью которого решаются задачи выявления участков сети с аномально высоким сопротивлением. В то же время указанные модели в оперативном управлении АСУ ТП ПРВ не используются.

В статье [46] рассмотрены вопросы совершенствования работы операторов ПРВ в автоматизированной системе диспетчерского контроля и управления (АСДКУ) Зеленограда. Одним из главных звеньев системы является автоматический контроль и регулирование напоров в сети на базе регулируемого электропривода. Предложен эффективный способ оперативной оценки устойчивости и экономичности системы водоснабжения по режимам работы водоисточников, запасам воды в резервуарах, напорам в контрольных точках водосети, экономичности режимов работы насосных станций, балансу подачи воды в сеть и водопотреблению. Однако в работе не предлагаются методы оптимизации режимов работы ПРВ, отсутствуют предложения, касающиеся совместной работы регулируемого электропривода и АСДКУ по одноконтурной и двухконтурной схемам, как это внедрено на КП «ПТП «Вода», отсутствуют данные об оперативном управлении при внештатных ситуациях.

Э.Н. Муслимов, Н.И. Пстыга [144] описывают разработанную для Слонима (Беларусь) АСУ ТП ПРВ. В системе применены проводные линии связи, микроконтроллеры Advantech, частично — радиоканал с использованием радиостанции «Сирень». Микроконтроллеры работают под управлением центральной ПЭВМ, установленной на ЦДП предприятия. Программное обеспечение Process Manager позволяет реализовать основные классические функции АСУ ТП. Вместе с тем в АСУ ТП не используется регулируемый электропривод, отсутствуют как одноконтурное, так и двухконтурное управление, а также оптимизация работы ПРВ, что является недостатками этой системы.

В настоящее время в Украине и странах СНГ действуют следующие АСУ ТП водоснабжения.

1) АСУ водоснабжением и водоотведением Киева. Система создана в 1985 г. В настоящее время функционирует и развивается АСУ ТП ПРВ города, охватывающая артезианские водопроводные насосные станции и насосные станции перекачки воды IV и V подъемов, около 100 контрольных точек давления на водосети, в также канализационные насосные станции. Водоочистные станции (Днепровская и Деснянская) в АСУ ТП не включены. Система построена на базе комплекса технических средств нижнего уровня «Гранит», на верхнем уровне (ЦДП) использовались управляющие мини-ЭВМ типа СМ-1420, которые в настоящее время заменяются на ПЭВМ типа IBM. Система функционирует в информационном режиме. В качестве совета диспетчеру система определяет рациональные режимы работы насосных станций и сетей левобережной части города и района «Оболонь», основанные на оптимизации энергозатрат и гидравлического расчета сетей. Передача информации в системе осуществляется по выделенным телефонным линиям. Задачи АСУ организационно-экономического управления реализованы отдельными АРМ на базе ПЭВМ. Необходимо отметить, что в системе нет полноты охвата объектов и функционального набора задач, управляющий режим в системе также не обеспечивается.

В АСУ ТП ПРВ Киева не используется регулируемый электропривод, отсутствует двухконтурное управление, которое разработано и апробировано автором в АСУ ТП ПРВ Харькова.

2) АСУ ТП водоснабжения Ялты функционирует более пяти лет. За последние два года в рамках модернизации технических средств АСУ ТП на предприятии внедрена радиотелемеханика АКВА-Р. Отличительной чертой АСУ ТП ПРВ Ялты является то, что в контур управления работой трех насосных станций включены два водоразделительных узла, которые являются своего рода контрольными точками и одновременно решают задачи зонно-районного распределения воды. Контрольные диктующие точки, расположенные в зонах действия насосных станций, уже позволяют осуществить одноконтурное управление. Для диспетчера подачи и распределения воды на ЦДП решается ряд вспомогательных учетно-аналитических задач, в частности задача учета выполнения аварийно-восстановительных работ. У диспетчера есть информация, включающая суточные графики подачи воды, графики давлений на выходах насосных станций и в контрольных точках, информация о расходе воды по направлениям в водораспределительных узлах. В работе системы АСУ ТП оперативный персонал пользуется информацией о расходе энергоресурсов. В то же время в АСУ ТП ПРВ не используются регулируемый электропривод, а также двухконтурный режим управления.

3) АСУ водоснабжением получили развитие в ряде городов СНГ, но упомянутые АСУ не обладают полнотой охвата объектов и полнотой функциональности. Примерами могут служить АСУ водоснабжением городов: в России — Москвы, С.-Петербурга, Челябинска, Нижнего Новгорода, Тулы, Уфы, Екатеринбурга, Кисловодска, Волгограда, Златоуста, Перми и др.; в Украине — Львова, Ивано-Франковска, Тернополя, Днепропетровска, Одессы, Запорожья, Мариуполя, Николаева, Ялты, Донецка и др.; в Беларуси — Минска, Гродно, Витебска, Бреста, Слонима.

Приведем характерные черты данных систем.

Развитие этих систем идет преимущественно по пути компьютеризации организационно-экономического управления. АСУ ТП развивается слабо (за исключением Москвы и Санкт-Петербурга, где АСУ ТП охватывает практически все водоочистные станции). Это объясняется тем, что создание АСУ ТП гораздо дороже и более трудоемко, чем компьютеризация отдельных отделов и служб предприятий.

Большинство систем строилось на базе устаревших средств телемеханики (ТК-210, ТМ-320, «Гранит» и т.п.), использующих выделенные телефонные линии (что достаточно дорого) и имеющих низкое быстродействие, надежность и ремонтнопригодность. Лишь незначительное число систем использует современные микроконтроллеры и радиоканалы передачи данных.

Крайне неэффективно применяются современные методы оптимизации управления технологическими процессами подъема, обработки, подачи и распределения воды, модели прогнозирования водопотребления и современные методы регулирования производительности насосных установок (регулируемый электропривод), не используется двухконтурное управление, которое успешно функционирует в Харькове.

Практически все действующие АСУ ТП работают в информационном режиме. Лишь некоторые из них используют режим телеуправления и непосредственного цифрового регулирования либо локальные системы автоматического регулирования на базе микроконтроллеров и регулируемого электропривода.

До настоящего времени ни одна из АСУ водоснабжением в СНГ (как интегрированная система управления предприятием) не приблизилась к созданию на ее базе корпоративной информационной системы (КИС) — как новому этапу автоматизации управления.

Практически все внедренные системы до сих пор являются одноконтурными.

В АСУ водоснабжением Харькова, в отличие от большинства описанных систем, на основе полученных в работе результатов используются: принцип рационального сочетания централизации и децентрализации управления; управляющий режим АСУ ТП, а не только информационно-советующие функции; радиоканал передачи информации в АСУ ТП (наряду с проводными линиями связи); совместная работа систем регулирования на базе регулируемого электропривода с АСУ ТП; интеграция АСУ ТП и системы организационно-экономического управления, с ее логическим преобразованием в корпоративную информационную систему; реализованный режим двухконтурного управления в АСУ ТП ПРВ.

Основные идеи и технические решения развития АСУ водоснабжением, разработки новых методов, моделей и средств представлены автором в настоящей работе.

## 1.6. ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ

Целью работы, проведенной автором, являлась разработка теоретических и экспериментально обоснованных методов интенсификации работы систем подачи и распределения воды, направленных на решение важной народнохозяйственной задачи — повышение эффективности водообеспечения городов.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие задачи и направления исследования:

— провести комплексное исследование стальных магистральных водоводов диаметром

1200–1600 мм, не имеющих внутреннего защитного покрытия, с целью определения роста макрошероховатости и причин ее образования. На основании натурных исследований получить эмпирические зависимости, связывающие коэффициент сопротивления трения с числом Рейнольдса и относительной шероховатостью, изменяющейся в процессе эксплуатации;

— разработать методику расчета коэффициента гидравлического сопротивления, отражающую реальную картину коррозионных процессов с образованием макрошероховатостей;

— выполнить анализ отечественных и зарубежных данных о водопотреблении городов, расположенных в различных природно-климатических условиях, систематизировать и оценить состояние водопотребления в населенных пунктах Украины и в СНГ, определить факторы, от которых оно зависит; построить функциональные зависимости между удельным среднесуточным водопотреблением и каждым из выявленных факторов;

— разработать методику расчета удельного среднесуточного водопотребления, позволяющую оценивать характер его изменения и активно воздействовать на принятие рациональных управленческих решений с учетом стратегической весомости населенных пунктов;

— с целью интенсификации работы действующих систем ПРВ провести исследования, разработать и внедрить метод двухконтурного автоматического управления насосными станциями, отличающийся простотой, обеспечивающий стабилизацию напоров в диктующей точке, дающий возможность выявлять аварии и другие внештатные ситуации;

— разработать методику определения интенсивности отказов в водосети, позволяющую адресно выявлять участки сети, где необходима замена труб или их санация;

— создать нормативно-технологическую базу для реализации задач интенсификации работы систем подачи и распределения воды. Для этого предусмотреть разработку и выпуск нормативно-справочной документации, апробировав ее на ряде объектов городов Украины, подготовить пособия и внедрить их в проектных организациях и в учебный процесс вузов.

# ГЛАВА 2

# ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 2.1. МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ λ

Натурные исследования на стальных водоводах диаметром 1200–1600 мм проводились на протяжении 37 лет. В 1963–1970 гг. автором было исследовано значение коэффициента λ на водоводах с небольшим сроком эксплуатации (до 9 лет), и основное внимание уделял значениям $\lambda_{кв}$ в режиме работы водовода в квадратичной зоне, где величина $Re$ для всех водоводов принималась постоянной [173, 175]. В то время не была установлена зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от времени, а лишь констатировался факт его увеличения с течением времени эксплуатации $T$. Не проводились исследования при существенно изменяющихся числах $Re$, что не позволяло выявить зависимости $\lambda = f(Re)$, $\lambda = f\left(\overline{\Delta}\right)$, $\lambda = f(T)$ и т. д. В главе 3 настоящей работы представлена зависимость $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$. При натурных исследованиях водовода коэффициент гидравлического сопротивления λ определялся по известной формуле Дарси–Вейсбаха [157, 308, 345]

$$H = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g}, \tag{2.1}$$

где λ — коэффициент гидравлического трения по длине водовода;

$l$ — длина водовода, м;

$d$ — диаметр водовода, м;

$V$ — средняя скорость потока воды в водоводе, м/с;

$H$ — потери напора, м.

При исследовании водоводов выдерживались следующие условия:

а) длина опытных участков была более 7000 м и достигала 109 000 м;

б) на опытных участках производились вырезки элементов стенок труб для исследования абсолютной макрошероховатости внутренней поверхности водовода;

в) на опытных участках имелась возможность проводить пьезометрические измерения и измерения расхода воды (применялись образцовые манометры, обеспечивающие точность измерений давления, и ультразвуковые расходомеры UFM 610 p, обеспечивающие точность измерений расхода воды).

Потери напора на участке водовода определялись по формуле

$$H_{L+M} = \left(Z_1 + B_1 + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + B_2 + \frac{P_2}{\gamma}\right), \tag{2.2}$$

где $Z_1$ и $Z_2$ — отметки штуцера в начале и в конце исследуемого участка водовода;

$B_1$ и $B_2$ — расстояние от верха штуцера до оси манометра в начале и в конце участка водовода;

$\frac{P_1}{\gamma}$ и $\frac{P_2}{\gamma}$ — манометрический напор в начале и в конце участка водовода.

На всех участках на время исследований были установлены образцовые и контрольные манометры. Результаты замеров показателей манометрического напора во время проведения опытных работ заносились в специальные анкеты. Замеры расходов и скоростей в водоводах осуществлялись как стационарными ультразвуковыми расходомерами, установленными на насосных станциях, так и накладными ультразвуковыми расходомерами.

Особое значение придавалось измерению расходов воды с помощью ультразвуковых накладных расходомеров типа UFM 610 p (рис. 2.1–2.5).



Рис. 2.1. Ультразвуковые накладные расходомеры UFM 610 p



Рис. 2.2. Измерение скорости и расхода воды с помощью накладных расходомеров UFM 610 p



Рис. 2.3. Измерение скорости и расхода воды в водоводе диаметром 1200 мм



Рис. 2.4. Измерение скорости и расхода воды в водоводе диаметром 1600 мм



Рис. 2.5. Измерение скорости и расхода воды в водоводе диаметром 1400 мм

Переносной прибор UFM 610 p предназначен для применения в нестационарных условиях и оборудован аккумулятором питания, местным дисплеем, устройством для накопления данных и интерфейсом RS 232 для связи с ПЭВМ. Он позволяет достаточно точно измерять расход чистых и однородных жидкостей с малым содержанием газовых включений и твердых частиц, таких, как вода, предназначенная для нагрева или охлаждения, вода на выходе очистных сооружений и т. д.

Применяемая система измерения является бесконтактной, не требует врезки в трубопровод, не создает перепада давления и не вносит изменения в поток. Параметры жидкости, такие, как электропроводность, давление, плотность, не влияют на результаты измерений. Накладные ультразвуковые расходомеры просты в установке, не нуждаются в обслуживании, потребляют мало электроэнергии. Ультразвуковым накладным расходомером можно измерять объемный расход воды в металлических, пластиковых, асбоцементных трубопроводах, а также в трубопроводах с внутренними или внешними покрытиями.

Два ультразвуковых датчика устанавливали на трубопроводе в точке, где водовод полностью заполнен водой. Датчики были расположены таким образом, чтобы измерительный луч имел горизонтальное положение. Точку контакта датчика и трубопровода очищали от ржавчины, отслоения покрытий.

Принцип работы накладных расходомеров UFM 610 p основан на том, что звуковая волна, проходящая через среду в направлении, совпадающем с направлением потока жидкости, распространяется быстрее, чем в противоположном направлении. Измерением прямого и обратного прохождения ультразвуковой волны определяется скорость потока. Работа расходомеров UFM 610 p осуществлялась в режиме «диагональ» (рис. 2.6).

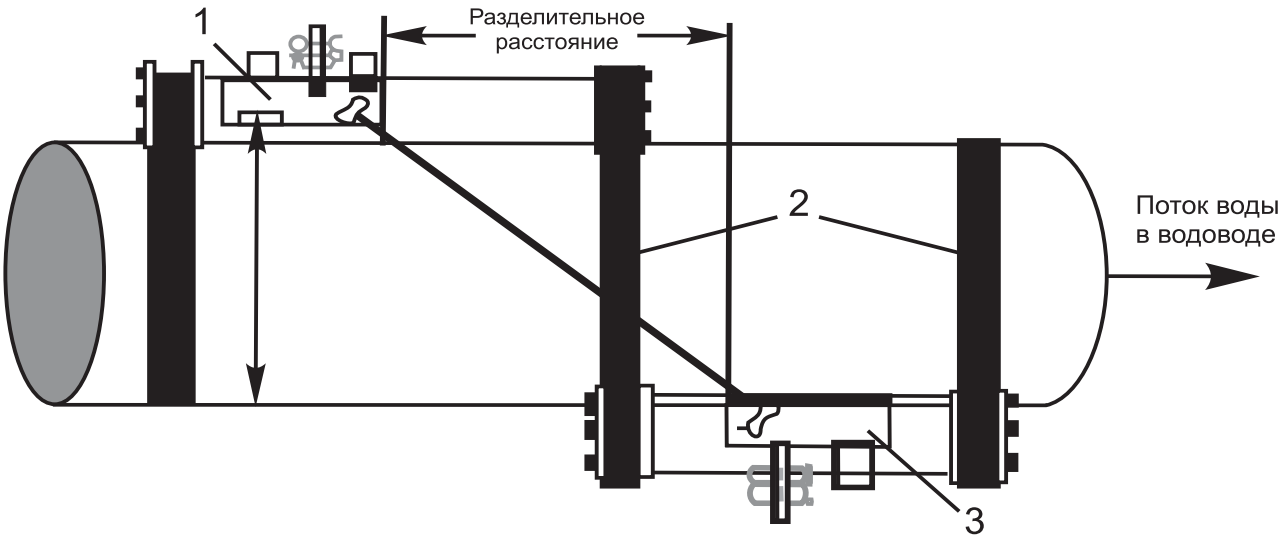



Рис. 2.6. Крепление для диагонального замера:
*1* — неподвижный блок; *2* — ремни; *3* — подвижный блок

Скорость распространения ультразвуковой волны из точки $A$ в точку $B$

$$V_{AB} = C_0 + V_m \cos\varphi\,. \tag{2.3}$$

Скорость распространения ультразвуковой волны из точки $B$ в точку $A$

$$V_{BA} = C_0 - V_m \cos\varphi\,. \tag{2.4}$$

Время распространения волны из точки $A$ в точку $B$

$$t_{AB} = \frac{L}{C_0 + V_m \cos\varphi}\,. \tag{2.5}$$

Время распространения волны из точки $B$ в точку $A$

$$t_{BA} = \frac{L}{C_0 - V_m \cos\varphi}\,, \tag{2.6}$$

где $C_0$ — скорость распространения ультразвука в жидкости;
$V_{AB}$ — скорость распространения ультразвука из точки $A$ в точку $B$;
$V_{BA}$ — скорость распространения ультразвука из точки $B$ в точку $A$;
$V_m$ — средняя скорость потока жидкости;
$t_{AB}$ — время распространения ультразвука из точки $A$ в точку $B$;
$t_{BA}$ — время распространения ультразвука из точки $B$ в точку $A$;
$L$ — расстояние между датчиками.

Приведем техническую спецификацию расходомера UFM 610 p: применение — измерение объемного расхода жидких сред; данные трубопроводов: диаметр — 13–5000 мм; толщина стенки — до 75 мм; материал трубопровода — металл, пластик, чугун, любые сплошные внутренние (внешние) покрытия. Первичные устройства — два ультразвуковых датчика с монтажным комплектом.

Датчики типа B использовались для исследования труб диаметром 90–1000 мм. Датчики типа C — для труб диаметром 1000–5000 мм. Погрешность измерений при $V$ >1 м/с не превышала 2 %, при $V$<1 м/с — 0,02 м/с. Число Рейнольдса $Re$ > 10000. Постоянная времени мала и составляет лишь 5 с.

Программное обеспечение прибора дает возможность передавать экспериментальные данные, накопленные в приборе, через интерфейс RS 232 на ПЭВМ и сохранять данные о калибровке прибора. Заводские номера применявшихся приборов UFM 610 P: 09200, 09100, 06400, 00098, 05700.

Толщина стенки трубы измерялась контактным способом с помощью переносного ультразвукового толщиномера УТ-93П ТУ25-7761.007-86, №94.91.4 (рис. 2.7 и 2.8), при этом обеспечивалась акустическая контактность путем прижатия контактной поверхности преобразователя к поверхности водовода. Толщиномер позволяет производить измерение стенки трубопровода, в том числе с корродированными поверхностями, обеспечивая точность измерения в диапазоне температур от −10 °С до +50 °С. Предел допустимой погрешности толщиномера ±0,1 мм. Дискретность цифрового отсчетного устройства — 0,1 мм.



Рис. 2.7. Переносной ультразвуковой толщиномер УТ-93 П



Рис. 2.8. Измерение с помощью толщиномера УТ-93 П толщины инкрустированного образца, взятого с водовода диаметром 1400 мм

Наросты инкрустированной полости трубопровода измеряли с помощью специально подготовленных штангенциркулей (ШЦ-1 ГОСТ 166-89 и ШЦ-1-125-0,1 ГОСТ 166-89) и контактного измерителя толщины макрошероховатости (рис. 2.9). Диапазон измерения — 0−125 мм; значения отсчета по нониусу — 0,1 мм; предел допустимой погрешности — 0,1; класс точности — 2.

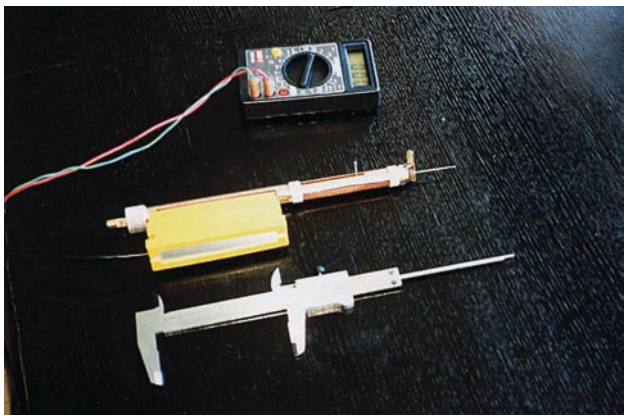


Рис. 2.9. Штангенциркуль ШЦ-1, контактный измеритель толщины макрошероховатости ИТМ-1

Полагая, что коэффициент гидравлического сопротивления λ зависит лишь от двух безразмерных параметров: числа Рейнольдса [14, 15, 17, 345]

$$Re = \frac{dV}{\nu}, \tag{2.7}$$

где $\nu$ — коэффициент кинематической вязкости воды;
$V$ — скорость течения в водоводе;
$d$ — диаметр водовода,
и относительной шероховатости

$$\overline{\Delta} = \frac{\delta}{d}, \tag{2.8}$$

где $\delta$ — абсолютная шероховатость на внутренней поверхности водовода.

В натурных условиях (рис. 2.10, 2.11) измерялись все параметры, необходимые для определения λ. При этом использовалась формула (2.1).



Рис. 2.10. Устройство лаза для контрольных замеров толщины стенок, макрошероховатости и степени зарастания внутренней поверхности водовода





Рис. 2.11. Натурные исследования магистральных водоводов

Зависимость λ от упомянутых безразмерных параметров определялась в два этапа.

На первом этапе исследовали парные зависимости:

1) величины λ от числа $Re$ при фиксированном значении $\overline{\Delta}$ (при нынешнем состоянии водоводов) $\lambda = f(Re)$;

2) временной зависимости абсолютной и относительной шероховатости от времени $\delta = f(T)$ и $\overline{\Delta} = f(T)$, где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.;

3) временной зависимости гидравлического сопротивления $\lambda = f(T)$;

4) зависимости величины λ от относительной шероховатости $\lambda = f(\overline{\Delta})$.

На данном этапе исследований применялся метод парного регрессионного анализа [286]. В основу было положено предположение о линейной зависимости и различные виды нелинейных зависимостей, допускающих линеаризацию (внутренне линейных). В случае

линейной зависимости или зависимостей, нелинейных только по независимой переменной, коэффициенты регрессии оценивали с помощью классического метода наименьших квадратов. Для регрессионных функций, нелинейных по зависимой переменной, метод наименьших квадратов использовался в целях получения начального приближения для коэффициентов регрессии. Далее коэффициенты регрессии уточняли путем решения системы линейных уравнений по методу наименьших квадратов, чтобы потом решать нелинеаризованные уравнения методом последовательных приближений.

Выбор оптимальной регрессионной зависимости осуществляли по максимуму коэффициента корреляции или по минимуму остаточной дисперсии.

Доверительный интервал для линии регрессии рассчитывали в предположении нормального распределения остатков регрессии. С учетом этого предположения для доверительных границ регрессии можно записать выражения

$$\lambda_{\text{в}} = \lambda_p + K_p\sigma;\ \lambda_{\text{н}} = \lambda_p - K_p\sigma, \tag{2.9}$$

где $\lambda_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{н}}$ — верхняя и нижняя доверительные границы соответственно;

$K_p$ — доверительный множитель для заданной доверительной вероятности $P$ (для $P = 0{,}95$ $K_p = 1{,}96$);

$\sigma$ — стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение фактических значений $\lambda$ от $\lambda_p$).

Для характеристики точности выбранной регрессионной модели определяли остаточную дисперсию по формуле [246]

$$\sigma^2 = \frac{\sum_j \left(\lambda_{\text{Р}j} - \lambda_{\text{ф}j}\right)^2}{n-1}, \tag{2.10}$$

где $\lambda_{\text{р}}$ и $\lambda_{\text{ф}}$ — рассчитанные и фактические значения величины $\lambda$. Кроме того, для характеристики точности выбранной модели использовали коэффициент корреляции, который находили по формуле

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_\lambda^2}}, \tag{2.11}$$

где $\sigma_\lambda^2$ — дисперсия величины $\lambda$.

На втором этапе строили двухфакторную регрессионную модель $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$. С этой целью применяли метод множественного нелинейного регрессионного анализа [129]. В качестве двухфакторной регрессионной модели принимали регрессионную зависимость вида

$$\lambda(Re, \overline{\Delta}) = \varphi_1(Re)\varphi_2\left(\overline{\Delta}\right), \tag{2.12}$$

где $\varphi_1$ и $\varphi_2$ — нелинейные функции, вид которых был определен на этапе парного регрессионного анализа:

$$\varphi_1(Re) = a_1 + \left(\frac{b_1}{Re}\right)^n; \tag{2.13}$$

$$\varphi_2\left(\overline{\Delta}\right) = \exp\left(a_2 + b_2\overline{\Delta}\right). \tag{2.14}$$

Коэффициенты $a_1$, $b_1$ и показатель степени $n$ в (2.13) и (2.14) брали равными соответствующим величинам, найденным на этапе парного регрессионного анализа, а коэффициенты регрессии $a_2$ и $b_2$ определяли методом наименьших квадратов после линеаризации формулы (2.12) путем логарифмирования.

Для характеристики точности двухфакторной регрессионной модели рассчитывали остаточную дисперсию и коэффициент множественной корреляции по формулам, аналогичным (2.10) и (2.11). Для построения доверительного интервала регрессии по формуле (2.9) определяли доверительные границы для величины $\ln\lambda$: $(\ln\lambda)_{\min}$ и $(\ln\lambda)_{\max}$.

Расчеты выполняли на ПЭВМ с помощью интегрированной системы статистического анализа и обработки данных STATISTICA [30].

## 2.2. МЕТОД РАСЧЕТА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРОДОВ

Исследование зависимости водопотребления городов стран СНГ от различных природно-климатических, градостроительных и других факторов проводилось на основе статистической обработки данных водоканалов о фактическом удельном среднесуточном водопотреблении на человека в городах, литературных источников и ведомственных данных о факторах, влияющих на водопотребление [12, 82, 92–95, 154, 158, 221, 263, 266, 274, 280, 319].

Удельное среднесуточное водопотребление на одного жителя города принималось общим, с учетом потерь воды на водопроводных сетях, в жилом фонде, расходов воды на собственные нужды водопровода и т. д. Удельное водопотребление вычислялось как

$$q_{i\text{факт}} = \frac{W_i^{\Gamma}}{n_i N_i}, \tag{2.15}$$

где $W_i^{\Gamma}$ – годовая подача воды городу в 1984 г., млн м$^3$;

$n_i$ — количество дней в базовом (1984) году, равное 366;

$N_i$ — численность населения города, млн чел.

Методика исследований включала три этапа.

На первом этапе применяли метод парного корреляционного анализа [286], позволяющий выявить значимые корреляционные связи между удельным среднесуточным водопотреблением городов $q$ и различными факторами $x_i$ ($i$ — номер фактора), определить их направленность и оценить тесноту корреляции. Основной характеристикой, которая вычислялась при корреляционном анализе данных, являлся коэффициент парной линейной корреляции между величиной $q$ и каждым из исследуемых факторов, который по определению равен

$$R_{q,x_i} = \frac{S_{q,x_i}}{\sigma_q \sigma_{x_i}}, \tag{2.16}$$

где $\sigma_q$ и $\sigma_{x_i}$ — среднеквадратические отклонения величин $q$ и $x_i$ от среднего значения;

$S_{q,x_i}$ — ковариация этих величин, т.е. математическое ожидание произведения отклонений этих величин от среднего;

$$\sigma_q = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(q_j - \overline{q}\right)^2}; \tag{2.17}$$

$$\sigma_{x_1} = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(x_{ij} - \overline{x}_i\right)^2}; \tag{2.18}$$

$$S_{q,\,x_1} = \frac{1}{n-1}\sum_{j=1}^{n}\left(q_j - \overline{q}\right)\left(x_{ij} - \overline{x}_i\right), \tag{2.19}$$

где $n$ — число точек данных (объем выборки);

$\overline{q}$ и $\overline{x}_i$ — средние значения величин $q$ и $x_i$;

$q_j$ и $x_{ij}$ — текущее значение величин в точке с номером $j$. Для расчета коэффициентов корреляции использовали стандартную формулу, получаемую из (2.16) — (2.19):

$$R_{q,x_i} = \frac{n\sum_{j=1}^{n}\left(q_j x_{ij}\right) - \left(\sum_{j=1}^{n} q_j\right)\left(\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\right)}{\sqrt{\left(n\sum_{j=1}^{n} q_j^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} q_j\right)^2\right)\left(n\sum_{j=1}^{n} x_{ij}^2 - \left(\sum_{j=1}^{n} x_{ij}\right)^2\right)}}. \tag{2.20}$$

Значимость коэффициентов корреляции проверяли по критерию Стьюдента [286]. Для этого рассчитывали статистику

$$t = \frac{R}{\sqrt{1-R^2}}\sqrt{f}\ , \qquad (2.21)$$

где $f$ — число степеней свободы; для коэффициента парной корреляции $f = n-2$. Рассчитанную $t$-статистику сравнивали с табличным значением распределения Стьюдента при заданном уровне значимости $\alpha$ и числе степеней свободы $f$: $t_{f;\alpha}$. Если $t \geq t_{f;\alpha}$, то гипотеза о существовании корреляционной связи между величинами $q$ и $x_i$ принималась на уровне значимости $\alpha$ (с доверительной вероятностью $P = 1-\alpha$).

На этапе корреляционного анализа данных вычисляли также коэффициенты парной корреляции между различными факторами $x_i$ и $x_j$ $(i \neq j)$. Результаты парного корреляционного анализа были представлены в виде матрицы коэффициентов корреляции.

Расчет коэффициентов корреляции не только между величиной $q$ и факторами $x_i$, но также между различными факторами $x_i$ и $x_j$ был необходим для выявления скрытых корреляционных связей между величиной удельного среднесуточного водопотребления и факторами, на нее влияющими. Такие скрытые связи могут наблюдаться в тех случаях, когда существуют сильные корреляционные связи между величиной $q$ и некоторым фактором $x_i$, а также между фактором $x_i$ и другим фактором $x_j$; в то же время между величиной $q$ и фактором $x_j$ также существует значимая, но более слабая связь противоположной направленности. В данной ситуации коэффициент корреляции $R_{q,x_j}$ может иметь такой же знак, как и коэффициент корреляции $R_{q,x_i}$, и, следовательно, не будет адекватно описывать объективно существующую связь между величинами $q$ и $x_j$. Для выявления описанных выше скрытых корреляционных связей и определения их направленности рассчитывали коэффициенты частной корреляции $R_{q,x_j,x_i}$ [286], характеризующие связь между величинами $q$ и $x_j$ при фиксированном значении $x_i$. Расчеты выполняли по формуле

$$R_{q,x_j,x_i} = \frac{R_{q,x_j} - R_{q,x_i}R_{x_i,x_j}}{\sqrt{\left(1-R^2_{q,x_i}\right)\left(1-R^2_{x_i,x_j}\right)}}. \qquad (2.22)$$

Значимость коэффициента частной корреляции также оценивали по критерию Стьюдента на основе расчета $t$-статистики по формуле (2.21), однако количество степеней свободы в (2.21) определялось как $f = n - 2 - k$, где $k$ — количество факторов с фиксированными значениями.

На втором этапе исследований применялся метод парного регрессионного анализа [129, 286]. На данном этапе выполнялся поиск парных регрессионных зависимостей величины $q$ от тех факторов, с которыми для нее были выявлены значимые корреляционные связи. Рассматривались различные гипотезы о форме регрессионной связи: линейная $q = a_0 + a_1 x$, полиномиальная $q = \sum_{j=0}^{k} a_j x^k$, различные виды внутренне линейных зависимостей (нелинейных зависимостей, для которых возможно линеаризующее преобразование). Коэффициенты регрессии $a_j$ в случае линейной зависимости и зависимостей, нелинейных по факторным переменным (т.е. зависимостей вида $q = a_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \varphi_j(x)$, где $\varphi_j(x)$ — некоторые нелинейные функции), рассчитывали по методу наименьших квадратов [129]. В случае зависимостей нелинейных по переменной $q$ (существенно нелинейных, т.е. зависимостей вида $f(q) = a_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \varphi_j(x)$, где $\varphi_j$ — некоторые нелинейные функции) коэффициенты регрессии вычисляли с помощью весового метода наименьших квадратов.

Минимизировалась сумма [13]:

$$S = \sum_{i=1}^{n}\left[\frac{1}{\left(f'(x_i)\right)^2}\left(f(q_i) - \left(a_0 + \sum_{j=1}^{k} a_j \varphi_j(x_i)\right)\right)^2\right]. \qquad (2.23)$$

Для характеристики точности выбранной регрессионной модели рассчитывали остаточную дисперсию

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1}\sum_j \left(q_{\text{Р}j} - q_{\text{ф}j}\right)^2 , \qquad (2.24)$$

где $q_{\text{р}j}$ и $q_{\text{ф}j}$ — соответственно рассчитанные и фактические значения величины $q$ для каждого значения фактора $x_{ij}$. Кроме того, для характеристики точности выбранной модели использовали также коэффициент корреляции, определяемый по формуле, аналогичной (2.11).

Выбор оптимальной формы регрессионной зависимости осуществляли по минимуму остаточной дисперсии (максимуму коэффициента корреляции).

На третьем этапе выполнялось построение многофакторной регрессионной модели вида

$$q = a_0 + \sum_{i=1}^{k} a_i \varphi_i (x_i), \qquad (2.25)$$

где $a_0$, $a_i$ — коэффициенты регрессии;

$x_i$ $(i=1...k)$ — факторы, включенные в модель, для которых на первом этапе были выявлены значимые корреляционные связи;

$\varphi_i$ — нелинейные функции, вид которых был определен на втором этапе.

Оценку коэффициентов регрессии производили методом множественного регрессионного анализа. Чтобы исключить ошибки, обусловленные мультиколлинеарностью (зависимостью между факторами), применяли один из вариантов метода шаговой регрессии — алгоритм включения переменных [129]. Для оценки точности построенной многофакторной регрессионной модели рассчитывали следующие характеристики: остаточную дисперсию по формуле (2.24) и коэффициент множественной корреляции по формуле, аналогичной (2.11), а также строили доверительный интервал регрессии $q_{\min} < q < q_{\max}$, где $q_{\min}$ и $q_{\max}$ — соответственно нижняя и верхняя доверительные границы. Доверительные границы рассчитывали по формулам

$$q_{\min} = q - K_p\sigma, \quad q_{\max} = q + K_p\sigma, \qquad (2.26)$$

где $K_p$ — доверительный множитель. В предположении нормальности распределения $K_p$ представляет собой квантиль нормального распределения и для доверительной вероятности $P = 0{,}95$ (уровень значимости 0,05) $K_p = 1{,}96$.

Все расчеты выполняли на ПЭВМ с помощью программы, составленной на языке программирования Object Pascal в системе Delphi-5 [21].

## 2.3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗА ВОДОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ

В основу расчета взяты статистика повреждений в водопроводных сетях Харькова за 1993–2000 гг. и ежемесячные статистические данные о температуре наружного воздуха и воды, транспортируемой в водосети за этот же период. Методика расчета отказа водопроводных сетей основана на статистической обработке результатов наблюдений за сезонной динамикой количества отказов. Была установлена устойчивая сезонная повторяемость количества отказов. Таким образом, функция зависимости количества отказов водопроводных сетей от времени является периодической с минимальным периодом $T = 12$ мес. В связи с этим аппроксимация данной зависимости аналитической функцией выполнялась на основе метода разложения функции в ряд Фурье [288]

$$P(M) = a_0 + \sum_j a_j \cos\left(\frac{2\pi}{T} jM\right) + \sum_j b_j \sin\left(\frac{2\pi}{T} jM\right), \qquad (2.27)$$

где $M$ — номер месяца в году;

$P(M)$ — количество отказов в данном месяце;

$a_0$ — среднее количество отказов в месяц за год;

$j$ — номер гармоники в ряду Фурье;

$a_j$ и $b_j$ — амплитуды гармоник, определяемые по стандартным приближенным формулам разложения в ряд Фурье, которые получают по формулам Эйлера–Фурье [288]:

$$a_j = \frac{1}{6}\sum_{j=1}^{12} P_j(M)\cos\left(\frac{2\pi}{T} jM\right), \quad (2.28)$$

$$b_j = -\frac{1}{6}\sum_{j=1}^{12} P_j(M)\sin\left(\frac{2\pi}{T} jM\right), \quad (2.29)$$

где $P_j(M)$ — фактические данные о количестве отказов водопроводных сетей за данный месяц.

Проведенные расчеты показали, что в формуле (2.27) достаточно ограничиться гармониками 1–3-го порядков. Расчеты проводили на ПЭВМ с помощью системы статистической обработки и анализа данных Statistica [30]. Расчетные значения количества отказов сопоставляли с графиками сезонной динамики изменения температур атмосферы и водопроводной воды, что позволило качественно объяснить наблюдающуюся сезонную динамику отказов.

## 2.4. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ИЗМЕНЕНИЙ ДАВЛЕНИЯ В СЕТИ ПРВ НАСОСНОЙ СТАНЦИИ № 25А ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ УДАРЕ

Особенность эксперимента заключается не только в том, что до сих пор поведение пьезометрии системы ПРВ описывалось только теоретически и реальное поведение сети в динамике при обычной жизни города было видно лишь по контрольным точкам водосети, но и в том, что при эксперименте производилось автоматическое управление системой ПРВ и одновременно автоматически осуществлялась запись 13 параметров работы насосной станции, а также узловых расходов и давлений в колодцах, давления в диктующей точке и давления в различных точках водосети.

Записи всех параметров проводили с применением микропроцессорной техники с периодичностью десять измерений в секунду, хотя возможности используемой аппаратуры позволяли обеспечить скорость записи 100 измерений в секунду.

Кроме того, учитывая участившиеся случаи отключения электроэнергии, во время эксперимента исследовали явление гидроудара, который создавали искусственно, резким отключением энергоснабжения насосной станции, а шаговым открытием задвижки на выпуске с водосети в удалении от насосной станции имитировали аварию и исследовали при этом изменение параметров водосети. Эксперимент проводили в течение суток (рис. 2.12).

В ходе эксперимента в течение 22 ч поддерживали стабильное давление в диктующей точке сети при совместной работе двух насосных станций по вертикальной и горизонтальной зонам влияния путем изменения числа оборотов насосного агрегата с помощью преобразователя частоты.

Технически эксперимент с гидроударом обеспечивался следующими аппаратными средствами:

на насосной станции 25А был установлен микроконтроллер харьковского производства КОМКОН-микро, имеющий в своем составе 16-канальный блок аналого-цифрового преобразования, который снимал показания с датчиков станции по 13 основным параметрам (рис. 2.13):

$P_{дт}$ — давление в диктующей точке;
$P_{вых1}$ — давление на 1-м выходе насосной станции;
$P_{на3}$ — давление на выходе насосного агрегата 3;
$Q_{вых1}$ — расход воды на 1-м выходе насосной станции;
$n$ — число оборотов насосного агрегата 4;
$P_{вых2}$ — давление на 2-м выходе насосной станции;
$Q_{вых2}$ — расход воды на 2-м выходе насосной станции;
$P_{на4}$ — давление на выходе насосного агрегата 4;
$I_{на3}$ — ток насосного агрегата 3;
$I_{на4}$ — ток насосного агрегата 4;
$W_{а1}$ — активная мощность на вводе 1;
$U_1$ — напряжение на вводе 1;
$U_2$ — напряжение на вводе 2.




Рис. 2.12. Блок-схема системы измерений



Рис. 2.13. Комплекс технических средств сбора, накопления и обработки информации при проведении экспериментов «Гидроудар» и «Авария» на насосной станции № 25А Харькова. Слева — аппаратура микроконтроллера КОМКОН

Блок АЦП контроллера с частотой 10 раз в секунду преобразовывал в шестнадцатиричный код поступающую на его входы информацию, упаковывал ее в посылку и передавал полученные данные на два компьютера типа Pentium. Использование двух компьютеров обеспечивало требуемую скорость съема, передачи, обработки и визуализации получаемой информации (вычислений и построения графиков), а также архивирование данных без потери информации. Для одновременного поступления информации в компьютеры они были соединены с контроллером КОМКОН-микро с помощью интерфейса типа «токовая петля».

На одном из компьютеров на экране монитора отображались принятые данные, создавались архивные файлы с последующей записью на жесткий диск, на другом — в среде Windows с помощью программы обработки электронных таблиц EXCEL 2000 строились графики измерений текущих параметров и вычислялись результаты практических воздействий по заданным формулам.

Результаты воздействия на водопроводную сеть (показатели давления и расхода воды) регистрировались в контрольном пункте по улице Ахсарова (рис. 2.14).

Для измерения расхода воды использовали ультразвуковые расходомеры UFM 610 p (производства Германии), а для измерения давления — тензорезисторные датчики давления типа ДД (производства Харькова, Украина). Все датчики располагались в колодцах (рис. 2.15 и 2.16).



Рис. 2.14. Измерение узловых расходов воды в контрольном водопроводном колодце по ул. Ахсарова (Харьков) с помощью расходомеров UFM 610 p



Рис. 2.15. Монтаж приборов учета расхода воды типа UFM 610 p в колодце контрольного пункта по ул. Ахсарова (Харьков)

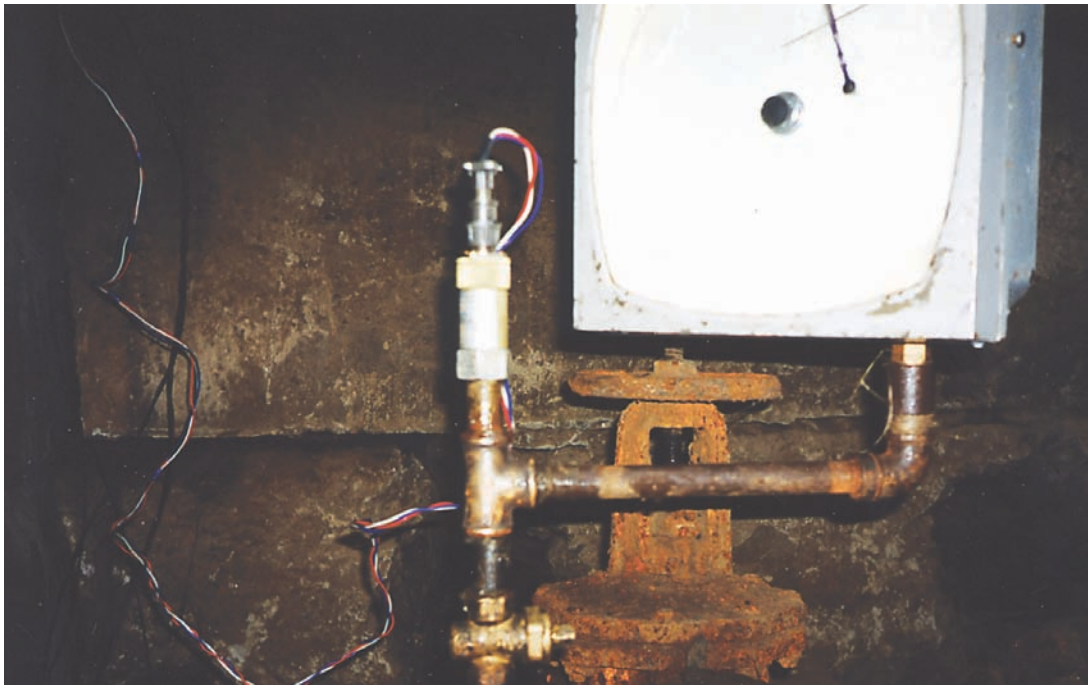


Рис. 2.16. Измерение давления воды тензорезисторным датчиком ДД и манометром МТС 712.Ч в диктующей точке сети по пр. Победы, 76 (Харьков)

Информация с датчиков поступала в аналогичный контроллер типа КОМКОН, где в блоке АЦП она масштабировалась, с частотой 10 раз в секунду преобразовывалась в шестнадцатиричный код и передавалась в компьютер типа Notebook. В компьютере информация аналогичным способом архивировалась, записывалась на жесткий диск и отображалась на экране дисплея для визуального контроля параметров.

Поскольку на контрольном пункте отсутствовало напряжение питания сети переменного тока 220 В, вся аппаратура (датчики, контроллер и компьютер) питалась от источника бесперебойного питания в течение всего времени эксперимента (рис. 2.17).

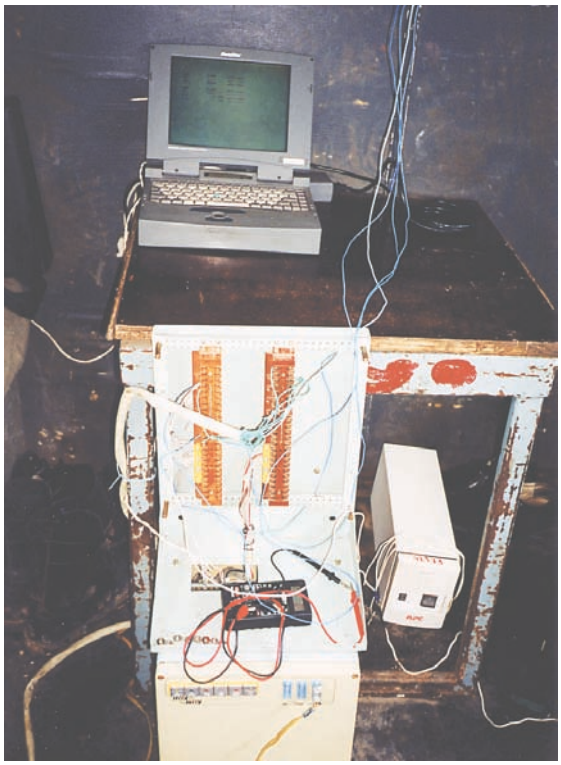


Рис. 2.17. Микропроцессорные устройства сбора, накопления и передачи информации с узловых точек контрольного пункта по ул. Ахсарова, размещенные в кузове автомашины

Синхронизация работы компьютеров по времени осуществлялась с насосной станции № 25А по радиоканалу при помощи радиомодемов, входящих в состав контроллеров КОМКОН и радиостанций типа «Лен».

В результате эксперимента получено более 23 миллионов измерений, которые были обработаны и представлены в виде графического материала. Значительный объем полученных данных не позволяет полностью привести их в настоящей работе, но анализ результатов эксперимента дал возможность качественно изменить представление о поведении гидроударов в водопроводной сети и подтвердить параметры новых контуров в управлении системой ПРВ.

Методика расчета изменений давления в сети ПРВ при гидравлическом ударе базировалась на предположении (основанном на наблюдениях) о том, что при гидравлическом ударе изменение давления имеет характер затухающих гармонических колебаний. В соответствии с принятым предположением функция, описывающая изменение давления, представлялась в виде суперпозиции экспоненциально затухающих гармоник (ряд Фурье с экспоненциально затухающими амплитудами) [288]:

$$H(T) = a_0 + \left[ \sum \left( a_i \cos \frac{2\pi T}{T_i} + b_i \sin \frac{2\pi T}{T_i} \right) \right] \exp\left(-cT^n\right), \qquad (2.30)$$

где $H(T)$ — крайние значения линии давления в момент времени $T$;

$T_i$ — период $i$-й гармоники;

$a_0$ — постоянная составляющая ряда;

$a_i$ и $b_i$ — амплитуды гармоник;

$c$ и $n$ — коэффициенты, определяющие интенсивность затухания колебаний.

Расчеты показали, что достаточно точная аппроксимация зависимости достигалась при использовании четырех гармоник, периоды которых определялись на основе предварительного графического анализа исследуемой зависимости. Амплитуды гармоник и коэффициенты экспоненциального затухания, а также доверительный интервал регрессии определялись с помощью ординарных средств построения регрессионных зависимостей системы статистической обработки и анализа данных STATISTICA [30].

## 2.5. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ УТЕЧЕК ВОДЫ В ЖИЛОМ ФОНДЕ ГОРОДОВ

При проведении исследований, связанных с потерей воды в жилом фонде Харькова, в четырех административных районах города были обследованы квартиры с централизованным водоснабжением и выявлены утечки воды через несовершенные смывные бачки и сантехприборы.

В основу методики оценки утечки воды был положен статистический анализ данных об объеме утечек при разном количестве сантехнических устройств. Для оценки объема утечек методом парного нелинейного регрессионного анализа были построены регрессионные зависимости $B = f(A)$ и $C = f(A)$, где $A$ — количество обследованных квартир с централизованным водоснабжением, $B$ — количество квартир с утечками в сантехприборах, $C$ — количество квартир с утечками через смывные бачки.

Расчеты выполняли на ПЭВМ с помощью интегрированной системы статистической обработки STATISTICA [30] методами, аналогичными рассмотренным выше.

# ГЛАВА 3

# ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СТАЛЬНЫХ ВОДОВОДОВ И РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ЕГО РАСЧЕТА

## 3.1. ПРЕДПОСЫЛКИ К ИССЛЕДОВАНИЮ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Стальные магистральные водоводы, транспортирующие питьевую воду для населения от систем кондиционирования воды в городскую систему резервуаров и систему подачи и распределения воды (ПРВ), рассчитаны на длительный период эксплуатации — более 25 лет [1, 19, 85, 97, 156, 220, 249, 294, 336, 356, 359]. Основными условиями транспортирования воды является обеспечение ее качества, нормативного расхода и требуемого давления. При транспортировании воды в магистральных стальных трубопроводах происходят реакции между водой и материалом трубопровода [23, 71, 85, 87, 97, 137, 175, 330, 341]. Известно, что с повышением температуры воды в ней усиливаются химические и биологические процессы [72, 87, 341], и качество воды изменяется тем значительнее, чем дольше вода находится в трубопроводной системе. Это вызывает появление неровностей (шероховатости) на внутренней поверхности водовода, которые с течением времени увеличиваются. Существующими нормами [249] не предусматривается защита внутренней поверхности стальных труб и не учитывается увеличение гидравлических сопротивлений в магистральных водоводах с течением времени эксплуатации. В основе проектирования лежат технико-экономические обоснования себестоимости воды, подбор экономичного диаметра труб водовода, удельного расхода электроэнергии на 1 м$^3$ подаваемой воды и т. д., исходя из условий первоначального периода эксплуатации. После строительства магистральных водоводов и при их пуске наблюдаются отклонения действительных гидравлических сопротивлений водоводов от проектных. Эти отклонения возрастают с течением времени. Службы эксплуатации водоснабжения с момента пуска водоводов вынуждены постоянно искать способы ликвидации этих недостатков, с тем чтобы предупредить развитие дефицита воды.

При проектировании стальных водоводов принимается во внимание, что движение потока воды будет турбулентным и лишь в некоторых случаях могут возникать переходные режимы. Как указывалось ранее, при расчете магистральных водоводов больших диаметров применяется формула, предложенная Ф.А. Шевелевым [308, 309]:

$$\lambda_{кв} = \frac{0,021}{d^{0,3}}, \qquad (3.1)$$

где $\lambda_{кв}$ — коэффициент гидравлического сопротивления;

$d$ — диаметр водовода, м.

Такая форма записи коэффициента $\lambda$ предполагает наличие автомодельного турбулентного режима потока, поскольку зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса отсутствует. Несмотря на то что в работе Ф.А. Шевелева [308] указывается на факт увеличения шероховатости труб с течением времени вследствие коррозии, формула (3.1) этого не учитывает. Она получена в предположении, что так называемые неновые

водоводы имеют шероховатость, равную 1 мм. Результатов исследований или рекомендаций к расчету изменения коэффициента сопротивления трения во времени автор не приводит.

Специалисты проектных институтов учитывают этот фактор по-разному. Однако их расчеты могут приводить к значительным ошибкам и, как следствие, — к резкому снижению действительных расходов воды по сравнению с проектными. Ни формула (3.1) Ф.А. Шевелева, ни использование малообоснованных частных соображений проектировщиков не дают возможности принять решение относительно продолжительности эксплуатации водоводов или сроков проведения их санации. Именно это вызвало необходимость провести многолетние исследования, восполняющие указанный пробел.

Следует подчеркнуть, что изменения, связанные с ростом сопротивления водоводов с течением времени, ведут к повышению тарифов на воду для населения городов, так как увеличиваются затраты электроэнергии на транспортирование воды по трубам. График (рис. 3.1) дает представление о непрерывном росте со временем потерь энергии, затрачиваемой на транспортирование 1 м$^3$ воды. График построен по данным натурных измерений, которые проводились в течение 36 лет.

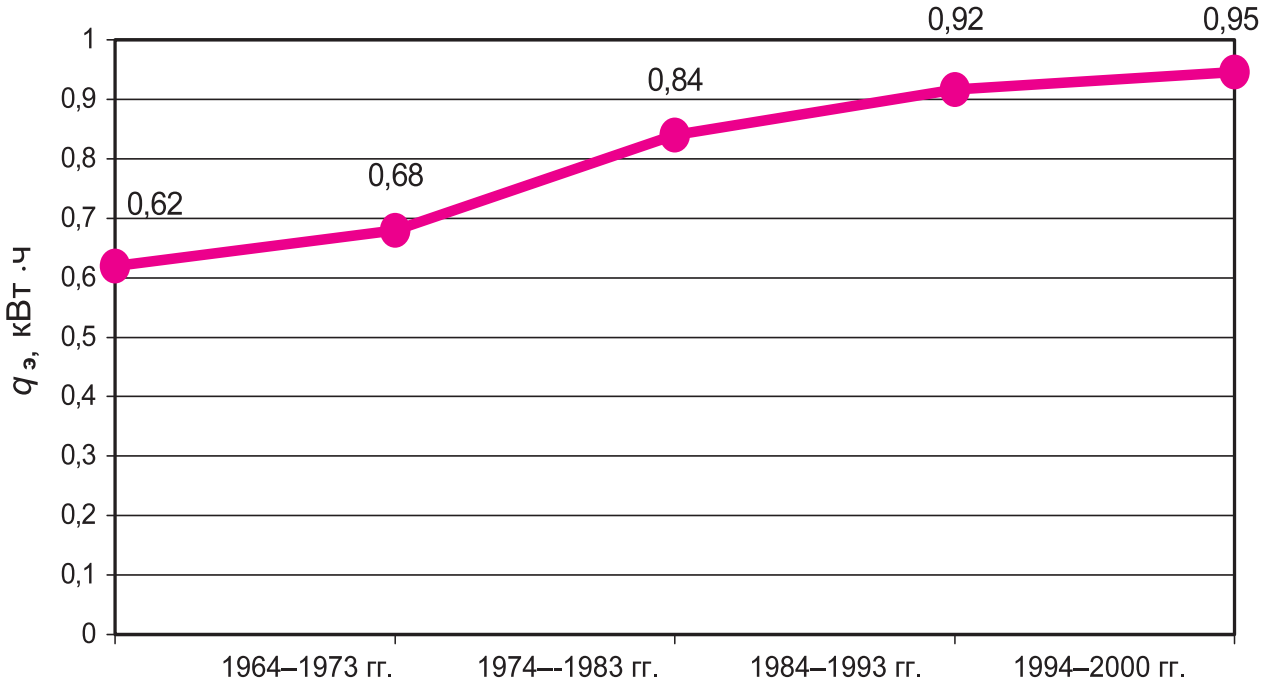



Рис. 3.1. Диаграмма роста удельных потерь электроэнергии $q_э$, кВт·ч на 1 м$^3$ воды с течением времени эксплуатации водоводов

Прогнозирование изменения коэффициента гидравлического сопротивления с течением времени имеет особо важное значение для магистральных водоводов диаметром 1200–1600 мм и протяженностью от 30 до 150 км, так как в этих условиях для компенсации снижения расхода воды реальным выходом является строительство промежуточных насосных станций различных подъемов или санация водоводов.

Измерения, которые были проведены на водоводах больших диаметров, позволили установить следующее: в Харькове в момент пуска на водоводе диаметром 1200 мм (ввод в действие осуществлялся участками с 1962 г. и закончился в 1964 г.) расход воды составил 103 тыс. м$^3$/сут вместо проектного расхода 150 тыс. м$^3$/сут, т.е. был меньше на 30 %; на водоводе диаметром 1400–1600 мм, введенном в эксплуатацию в 1967 г., расход воды составил 165 тыс. м$^3$/сут вместо проектного расхода 230 тыс. м$^3$/сут, т.е. был меньше проектного на 28 %. Таким образом, фактическая мощность третьей линии водовода диаметром 1200 мм отличалась от проектной на 47 тыс. м$^3$/сут, а водовода диаметром 1400–1600 мм — на 65 тыс. м$^3$/сут. Такое расхождение между действительным расходом воды и проектным можно объяснять двумя причинами: 1) институтом «Укргипрокоммунстрой» предусматривались местные потери с коэффициентом 1,05 от потерь по длине водовода; 2) рекомендации, содержащиеся в работе Ф.А. Шевелева [308], оказались недостаточными для необходимой точности расчетов.

Исследования гидравлических сопротивлений водоводов, проведенные в те годы, свидетельствовали о том, что поэтапный, на протяжении трех лет, ввод в эксплуатацию водоводов привел к росту инкрустации на их внутренней поверхности, следствием чего стало уменьшение расхода воды. Для компенсации дефицита воды в Харькове возникла необходимость строительства Роганской насосной станции перекачки с расчетной производительностью 750 тыс. м$^3$/сут (или 8,68 м$^3$/с), расположенной на середине трасс существующих водоводов (рис. 3.2, 3.3). Насосная станция стоимостью в 2,5 млн руб. была введена в эксплуатацию 12 октября 1976 г. При этом дополнительные затраты на электроэнергию составили 0,5 млн руб. в год.

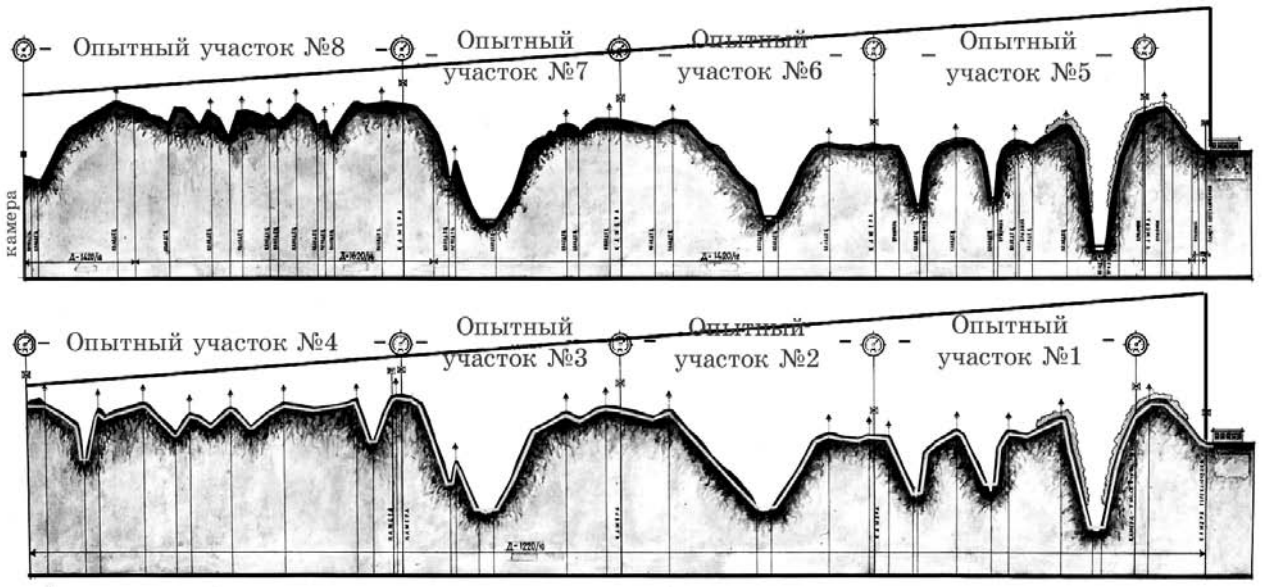



Рис. 3.2. Опытные участки магистральных водоводов диаметром 1200, 1400, 1600 мм (1964–1972 гг., до ввода в эксплуатацию Роганской насосной станции перекачки)

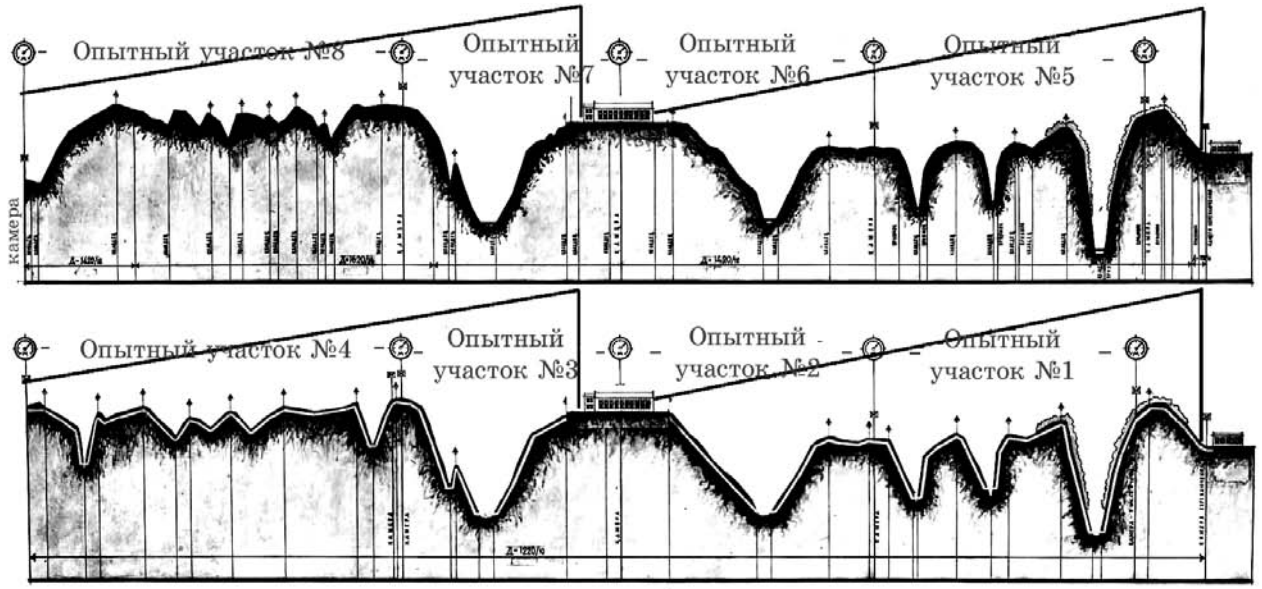



Рис. 3.3. Опытные участки магистральных водоводов диаметром 1200, 1400, 1600 мм (1972–2000 гг., после ввода в эксплуатацию Роганской насосной станции перекачки)

В Харькове стоимость транспортирования воды к потребителю составляет почти половину ее себестоимости (рис. 3.4).

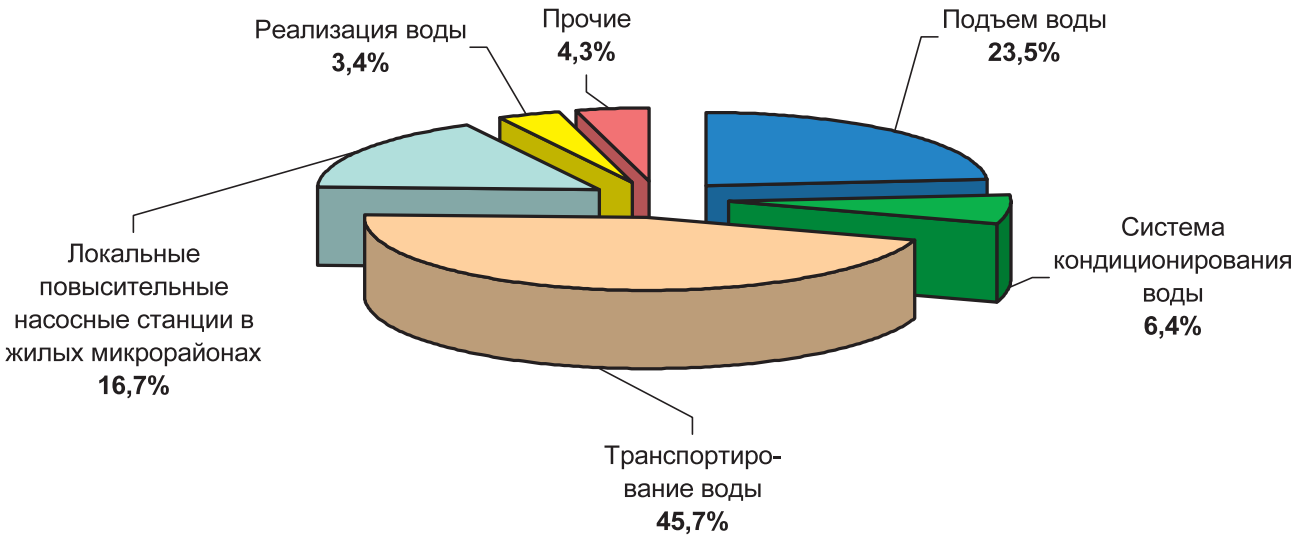



Рис. 3.4. Структура себестоимости питьевой воды

Обширные экспериментальные исследования гидравлического сопротивления водоводов, проведенные рядом ученых в 60–70-е годы, в том числе с участием автора данной книги, показали необходимость учета его повышения с течением времени эксплуатации водоводов. Однако введение Ф.А. Шевелевым условной шероховатости величиной 1 мм оказалось недостаточным для конкретизации роста гидравлического сопротивления с учетом местных сопротивлений, обусловленных стыковыми соединениями плетей трубопроводов большого диаметра. Эти недостатки расчетов выявились уже в самом начале эксплуатации водоводов.

В данной книге автором сделана первая попытка системного изучения результатов натурных исследований зависимости $\lambda = f\left[Re, \overline{\Delta}(T)\right]$, а далее зависимости $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$, где $Re$ — число Рейнольдса; $\overline{\Delta} = \dfrac{\delta}{d}$ — безразмерная величина шероховатости, меняющаяся со временем в ходе протекания физических процессов, возникающих и развивающихся в действующих водоводах, которые не имеют защиту внутренней поверхности труб от биохимической коррозии; $\delta$ — абсолютная шероховатость внутренней поверхности водоводов, мм [14, 15, 17, 345]. При исследовании зависимости $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$ автором использованы основные положения классической гидромеханики, теории подобия и размерностей, математической статистики.

Как известно, величина потерь напора в водоводе с достаточной точностью определяется уравнением Бернулли, связывающим основные параметры движения для двух концевых сечений трубопровода,

$$\frac{P_1}{\gamma} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_{L_{1-2}}, \qquad (3.2)$$

где $\dfrac{P_1}{\gamma}$, $\dfrac{P_2}{\gamma}$ — гидростатические напоры в концевых сечениях трубопровода;

$\dfrac{V_1^2}{2g}$, $\dfrac{V_2^2}{2g}$ — скоростные напоры в них;

$V_1$, $V_2$, $P_1$, $P_2$, $Z_1$, $Z_2$ — средние скорости, давления и координаты центра тяжести этих сечений соответственно;

$\alpha_1$, $\alpha_2$ — коэффициенты Кориолиса;

$H_{L_{1-2}}$ — потери напора.

Поскольку коэффициенты Кориолиса при режимах течения, имеющих место в водоводах, близки к единице [17, 73, 125, 157, 345], без особого ущерба для точности расчета считаем их равными единице.

Особый смысл при использовании уравнений Бернулли в расчетах водоводов приобретает оценка потерь энергии потока воды $H_{L_{1-2}}$, обусловленных диссипацией энергии потока при турбулентном движении воды в трубах и сопротивлением в местах соединения труб различных диаметров, возникновением вихрей, неровностей и др.

Фундаментальной системой уравнений при исследованиях потока воды в водоводе является система уравнений Рейнольдса [157] для осредненного турбулентного движения среды. Рейнольдсу принадлежит также определение двух режимов движения потоков — ламинарного и турбулентного [345]. Однако использование этой системы для расчетов водоводов возможно только с помощью полуэмпирических теорий турбулентности, которые требуют либо знания некоторых констант, которые можно получить из опытов, либо эмпирических зависимостей для гидравлических сопротивлений, возникающих при различных режимах движения. Представляется целесообразным получить не общие связи, пригодные для расчета любых режимов движения, но с зафиксированными значениями шероховатостей, как это делалось во многих работах, начиная с Никурадзе, а связи, учитывающие реальное состояние внутренней поверхности трубопроводов и изменение этого состояния во времени, поскольку при эксплуатации водоводов они существенно изменяются. Учитывая особую ответственность проектирования водоводов и установления их технико-экономических характеристик, можно использовать общепринятую формулу Дарси–Вейсбаха [157, 308, 345]

$$H = \lambda \frac{l}{d}\left(\frac{V^2}{2g}\right), \tag{3.3}$$

где $\lambda$ — коэффициент гидравлического сопротивления;

$l$ — длина водовода, м;

$d$ – диаметр водовода, м;

$\frac{V^2}{2g}$ — скоростной напор, м;

$H$ — потери напора в водоводе, м.

Приведенная формула (3.3) декларирует прямо пропорциональную зависимость между гидравлическими сопротивлениями, отнесенными к относительной длине трубопровода и кинетической энергии потока средних скоростей, когда одно неизвестное $H$ заменяется другим — $\lambda$. Тогда задача сводится к определению коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda$, как функции безразмерных параметров, часть которых зависит от времени. Поэтому экспериментальному исследованию этих коэффициентов со всеми особенностями их изменений во времени, включая развитие процессов биохимической коррозии и зарастание внутренней поверхности водоводов, образование биохимических пленок, обусловленных гидробиологическим и солевым составом воды, и т. д. в работе уделено особое внимание.

В данной главе приведены результаты многолетних исследований состояния водоводов и причин роста шероховатости их внутренней поверхности. Экспериментальные исследования проводились на стальных водоводах диаметром 1200, 1400, 1600 мм, предназначенных для транспортирования воды, качество которой определялось условиями второго источника водоснабжения Харькова — реки Северский Донец, а также на водоводах диаметром 1400 мм, эксплуатируемых в условиях третьего источника водоснабжения Харькова, использующего воды Днепра.

## 3.2. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДОВ ДИАМЕТРОМ 1200, 1400, 1600 мм

### 3.2.1. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1200 ММ

Результаты натурных исследований макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм, которые проводились на протяжении 37 лет эксплуатации, сведены в таблицу (табл. 3.1), исходные данные для расчета коэффициента гидравлического сопро-

тивления λ приведены в приложении А, табл. А.1. Там же даны значения гидравлического уклона и чисел Рейнольдса, соответствующие режиму транспортирования воды при проведении измерений.

Таблица 3.1

**Характер макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм с течением времени его эксплуатации**

| Время эксплуатации, *T*, мес. | Максимальная макрошероховатость, δ, мм | Относительная макрошероховатость, $\overline{\Delta}$ | λ |
|---|---|---|---|
| 4 | 3,3 | 0,00275 | 0,0248 |
| 13 (1 год 1 мес.) | 4,3 | 0,00360 | 0,0269 |
| 15 (1 год 2 мес.) | 2,32 | 0,00193 | 0,028 |
| 17 (1 год 5 мес.) | 5,4 | 0,00450 | 0,028 |
| 22–25 (1 год 10 мес. — 2 года 1 мес.) | 6,0 | 0,00502 | 0,0298 |
| 24 (2 года ) | 4,8 | 0,00402 | 0,0295 |
| 25 (2 года 1 мес.) | 6,0 | 0,00502 | 0,03 |
| 32 (2 года 8 мес.) | 6,6 | 0,00552 | 0,03 |
| 34 (2 года 10 мес.) | 7,2 | 0,00603 | 0,0327 |
| 34–37 (2 года 10 мес. — 3 года 1 мес.) | 7,2 | 0,00603 | 0,0327 |
| 44 (3 года 8 мес.) | 6,3 | 0,00525 | 0,0312 |
| 48–50 (4 года — 4 года 2 мес.) | 9,6 | 0,00803 | 0,0337 |
| 62 (5 лет 2 мес.) | 9,6 | 0,00803 | 0,0364 |
| 63 (5 лет 3 мес.) | 9,6 | 0,00803 | 0,0371 |
| 85 (7 лет 1 мес.) | 10,8 | 0,00903 | 0,0372 |
| 90 (7 лет 6 мес.) | 10,7 | 0,00895 | 0,037 |
| 108 (9 лет) | 13,3–13,4 | 0,01121 | 0,043 |
| 144 (12 лет) | 15,0–15,2 | 0,01272 | 0,0484 |
| 235 (19 лет 7 мес.) | 17,0–17,1 | 0,01420 | 0,0549 |
| 336 (28 лет) | 17,5–17,6 | 0,01473 | 0,0573 |
| 384 (32 года) | 18,0–18,4 | 0,01540 | 0,0608 |
| 444 (37 лет) | 18,9–19,0 | 0,01590 | 0,0634 |

Получена эмпирическая зависимость (рис. 3.5)

$$\delta = \frac{21,64T}{T + 70,2} \quad \text{при } 4 \le T \le 450, \tag{3.4}$$

где δ — абсолютная шероховатость, мм, по данным замеров;

$T$ — время нахождения магистрального водовода в эксплуатации, мес.

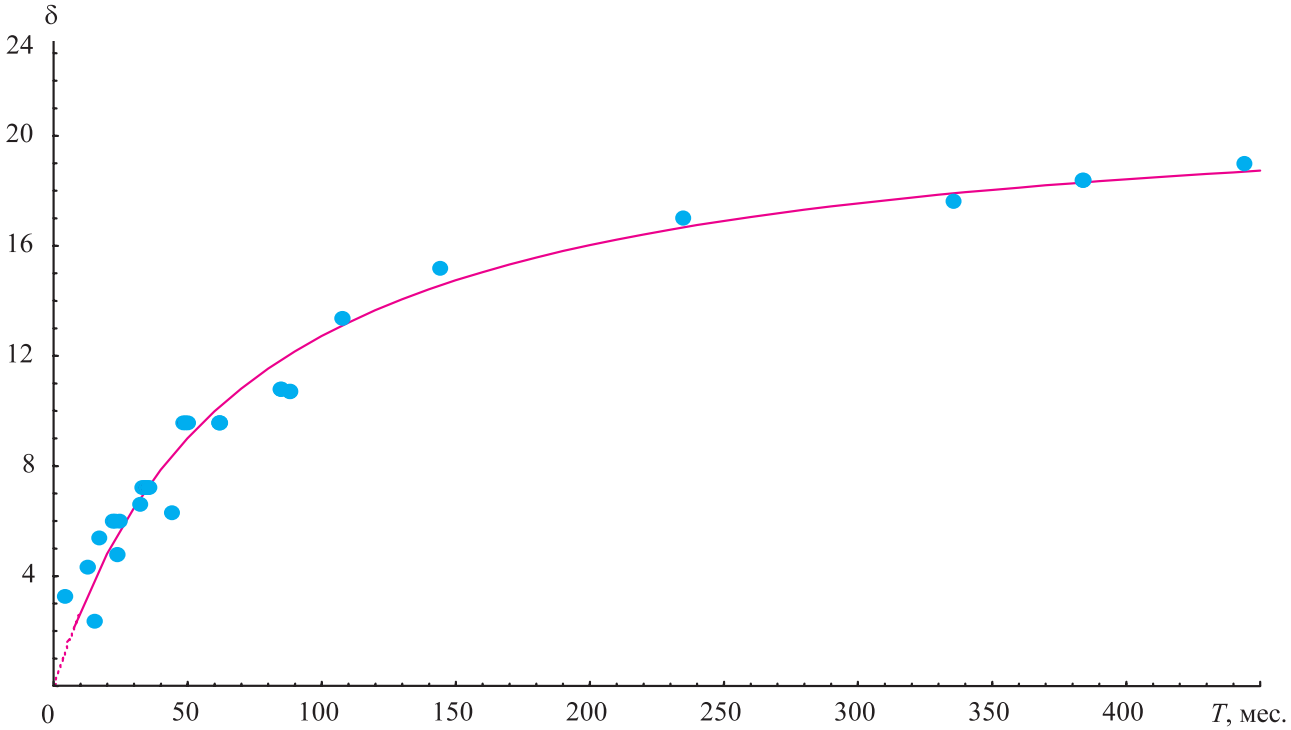



Рис. 3.5. Изменение величины абсолютной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм (L = 14 902 м) в процессе его эксплуатации

Следует отметить, что масса отложений на внутренней поверхности водовода (высота макрошероховатости 6,3 мм, эксплуатация водовода 44 мес.), снятых скребком со всего периметра водовода длиной 1 п. м, после просушивания составила 7,16 кг, или 2 % массы 1 п. м трубы, 357,5 кг. Анализ данных натурных измерений макрошероховатости (рис. 3.5) позволяет сделать вывод о том, что существуют три фазы роста макрошероховатости: I фаза — длительностью примерно до 8,3 года — фаза интенсивного роста отложений и макрошероховатости; II фаза — от 8,3 до 18,3 года — фаза замедленного роста макрошероховатости и III фаза — от 18,3 года до 37 лет — фаза стабилизации роста макрошероховатости.

Были исследованы различные виды регрессионной модели для зависимостей $\lambda = f(Re)$; $\lambda = f(\overline{\Delta})$; $\lambda = f(T)$; $\delta = f(T)$; $\overline{\Delta} = f(T)$; $i = f(V)$, где $i$ — гидравлический уклон. Оптимальные зависимости определяли по максимуму коэффициента корреляции или минимуму стандартной ошибки.

На основании табл. 3.2 построен график зависимости относительной шероховатости от времени (рис. 3.6). Для зависимости $\overline{\Delta} = f(T)$ выбрана модель

$$\overline{\Delta} = \frac{0,018T}{T + 70,2}, \qquad (3.5)$$

где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.

Таблица 3.2

**Характеристики регрессионной зависимости $\overline{\Delta} = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\overline{\Delta} = a + bT$ | 2. $\overline{\Delta} = aT/(T + b)$ | 3. $\overline{\Delta} = aT^n$ | 4. $\overline{\Delta} = a + bT + cT^2$ | 5. $\overline{\Delta} = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,005<br>$b$ = 0,00003 | $a$ = 0,018<br>$b$ = 70,2 | $a$ = 0,001475<br>$n$ = 0,402 | $a$ = 0,03122<br>$b$ = −0,00008<br>$c$ = $-1,2196 \cdot 10^{-7}$ | $a$ = −0,00571<br>$b$ = −0,00345 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,001687 | 0,000758 | 0,0009405 | 0,000877058 | 0,0010741 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,903 | 0,982 | 0,971 | 0,974 | 0,961 |

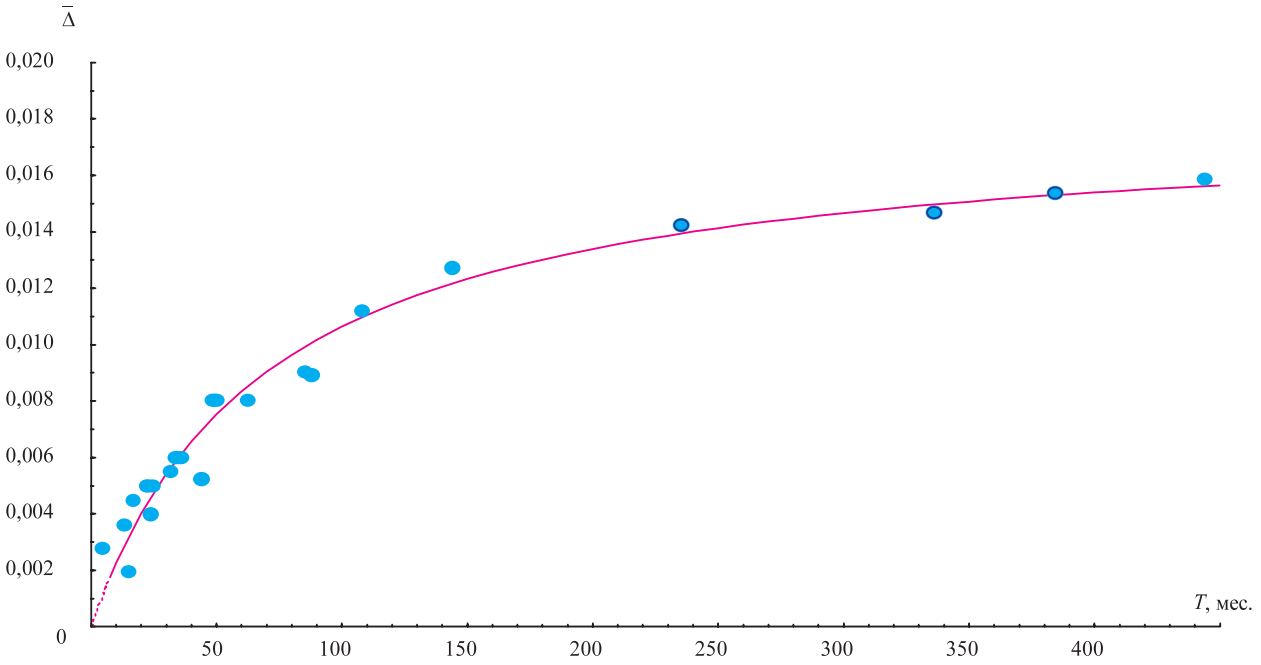



Рис. 3.6. Изменение величины относительной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм (L = 14 902 м) в процессе его эксплуатации

Формула (3.5) показывает, что с течением времени в первые 100 мес. (8,5 года) наблюдается интенсивный рост относительной шероховатости $\bar{\Delta}$, в последующие годы интенсивность роста уменьшается. На рис. 3.7–3.11 видно, что на внутренней поверхности действующих магистральных водоводов имеются макрошероховатости различной формы, разной высоты и ширины, напоминающие сталактиты. В сухом виде они представляют собой бурую рыхлую пористую массу плотностью 1,4–1,6 г/см$^3$, открытой пористостью 51–55 %, с водопоглощением 33–39 %. С течением времени химический состав отложений изменяется, массовая доля компонентов отложений к сроку 35–37 лет стабилизируется (табл. 3.3 и 3.8).

Таблица 3.3

**Химический состав отложений и массовая доля компонентов, %**
**(участок №2; $d$ = 1200 мм)**

| Срок развития инкрустации | Летучие после прокаливания | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | CaO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | MgO | $TiO_2$ | Прочие |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 года | 14,09 | 1,72 | 78,35 | 1,43 | 0,48 | 0,67 | 0,09 | Следы | Следы | 3,17 |
| 37 лет | 17,96 | 2,24 | 67,00 | 5,17 | 1,26 | 1,74 | 0,86 | – | – | 3,77 |
| В сравнении с 3-летним сроком эксплуатации | +3,87 | +0,52 | –11,35 | +3,74 | +0,78 | +1,07 | +0,77 | – | – | +0,6 |

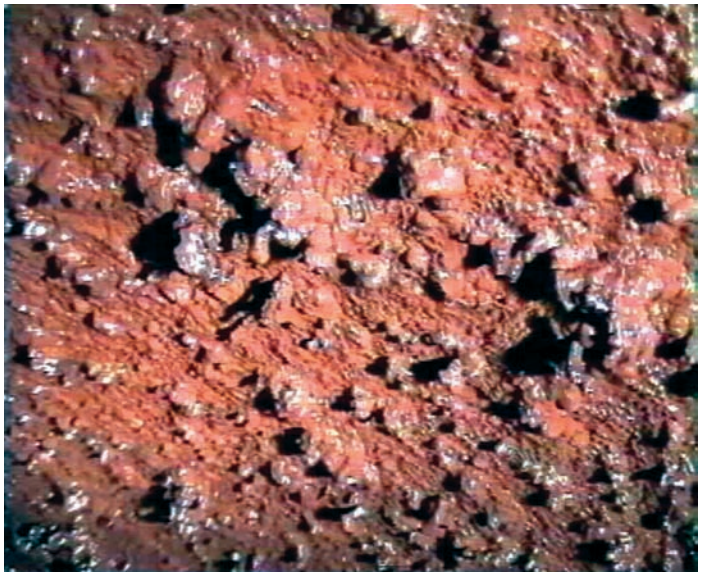


Рис. 3.7. Характер макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм (время эксплуатации водовода 37 лет)

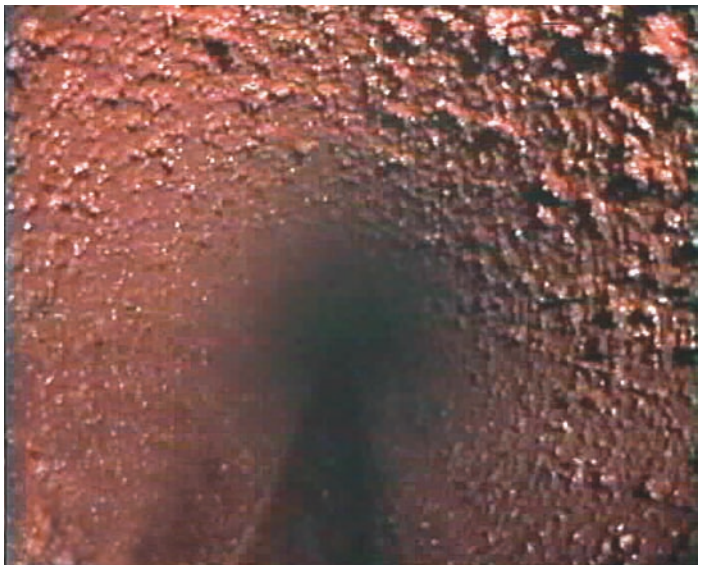


Рис. 3.8. Инкрустация на внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм (время эксплуатации водовода 37 лет)



Рис. 3.9. Макрошероховатость внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм (время эксплуатации водовода 37 лет)



Рис. 3.10. Пальпация макрошероховатости с анаэробными бактериями



*а*




*б*

Рис. 3.11. Соскоб наростов с внутренней поверхности водовода:
*а* — пятно соскоба; *б* — нарост в сравнении с высотой спичечной коробки

Как известно [71], инкрустация (зарастание) полости водоводов представляет собой идеальную среду для анаэробных бактерий, которые стимулируют коррозию металла и ухудшают качество воды [72]. Исследования биохимической коррозии внутренней поверхности водоводов свидетельствуют о том, что чем дольше труба была в эксплуатации, тем более разнородным и сложным становится слой нароста и тем труднее характеризовать реакции продуктов коррозии. Так, соответствующие реакции и факторы управления коррозией чистого металла являются относительно простыми, а на начальных стадиях образования нароста они хотя и менее выражены, но сравнительно понятны. Трансформации же, происходящие с инкрустацией полости трубы в течение длительного промежутка времени, гораздо сложнее и менее понятны. Поскольку срок эксплуатации трубы в системе транспортирования воды и водораспределения обычно составляет 50 и более лет, представляют интерес реакции, в которые вступают «старые» коррозионные отложения. В данной главе представлены наблюдения, касающиеся состава и структуры коррозионных отложений в стальных водоводах. Отметим, что поведение коррозионных отложений в чугунных трубах иное. Структура отложений в стальных водоводах влияет на скорость коррозии. Происходит эволюционное образование новых соединений, высвобождение из года в год солей железа трубы в нарост. Сама коррозия, как видно из табл. 3.3, представляет собой сложное явление, на которое оказывают влияние физические, химические и биологические процессы, происходящие в водоводе (табл. 3.4), с учетом качества транспортируемой воды. Характер влияния различных факторов на внутреннюю коррозию в водоводе виден из табл. 3.5.

Важнейшим условием объективной оценки инкрустации является быстрый осмотр водовода при опорожнении (не более суток для осмотра биопленки, которая на воздухе высушивается). Наличие слизистой биопленки (рис. 3.12) на наростах макрошероховатости говорит о росте популяции анаэробных микробов [71, 72], которые поглощают кислород в воде, ингибируют миграцию кислорода, снижая локальное содержание растворенного кислорода. Градиенты концентрации, развивающиеся под биопленкой, благоприятствуют инициации коррозии. Метаболические процессы некоторых микроорганизмов являются катализаторами реакций, стимулирующих коррозию [336].

Таблица 3.4

**Качество питьевой воды водовода диаметром 1200 мм после кондиционирования (среднее за период эксплуатации водовода)**

| Срок эксплуатации водовода | Мутность, мг/л | Цветность, град. | PH | Щелочность, мг-экв./л | Окисляемость, мг/л | Хлориды, мг/л | Аммиак, мг/л | Нитраты,мг/л | Общая жесткость, мг-экв./л | Гидрокарбонаты, $HCO_3$, мг/л | Кальций, мг/л | Магний,мг/л | Свободные углекислоты, мг/л | Плотный остаток, мг/л | Фтор, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952–1962 гг., до зарегулирования Северского Донца | 0,40 | 10,8 | 7,27 | 3,90 | 4,5 | 25,0 | 0,024 | Нет | 6,80 | 237,7 | 88,0 | 29,02 | 28,6 | 482 | 0,45 |
| 1963–2000 гг. | 0,41 | 10,0 | 7,55 | 4,13 | 4,4 | 35,0 | 0,050 | 11 | 5,13 | 251,9 | 74,6 | 17,03 | 15,6 | 473 | 0,40 |
| В сравнении с 1962 г. | +0,01 | −0,8 | +0,28 | +0,23 | −0,1 | +10,0 | +0,026 | +11 | −1,67 | +14,2 | −13,4 | −11,99 | −13,0 | −9 | −0,05 |

Таблица 3.5

**Факторы, влияющие на внутреннюю коррозию водовода**

| Фактор | Характер влияния |
|---|---|
| pH | Низкий pH увеличивает скорость коррозии. Высокий pH способствует защите внутренней полости водовода |
| Растворенный кислород | Ускоряет многие реакции коррозии, жизнь анаэробных и аэробных бактерий |
| Температура воды | Ускоряет многие реакции коррозии. Снижает растворимость карбоната кальция. Увеличивает биологическую активность |
| Высокая скорость потока воды в водоводах, или турбулентность | Повышает потенциальную возможность эрозионной коррозии |
| Низкая скорость потока воды в водоводах | Повышает потенциальную возможность коррозии с образованием волосных трещин и разъедания |
| Щелочность | Способствует образованию защитного слоя и амортизирует изменение pH |
| Кальциевая жесткость | Способствует образованию защитного слоя |
| Остаточный хлор в воде | Увеличивает большинство типов коррозии, уменьшает биологическую коррозию |
| Хлориды и сульфаты | Увеличивают коррозию железа, меди и оцинкованной стали. Способствует тенденции возникновения разъедающей коррозии |
| Сероводород | Увеличивает коррозию |
| Аммиак | Увеличивает коррозию медных элементов в системе оборудования водоснабжения |
| Магний | Может ингибировать осаждение карбоната кальция в воде |
| Общее солесодержание | Повышает проводимость воды, что способствует ускорению коррозии |

Под влиянием железобактерий происходит разрушение слоя металла, создаются повышенные концентрации $O_2$ и $CO_2$. Углекислый газ, как продукт конечного окисления органических соединений, способствует коррозии, при этом уменьшается толщина стенок труб [336]. Под инкрустациями создаются анаэробные условия, благоприятные для жизнедеятельности сульфатредуцирующих бактерий, которые играют исключительно важную роль в ускорении коррозии. Развитие микроорганизмов способствует восстановлению сульфатов до сульфитов и окислению серы и ее соединений до серной кислоты.

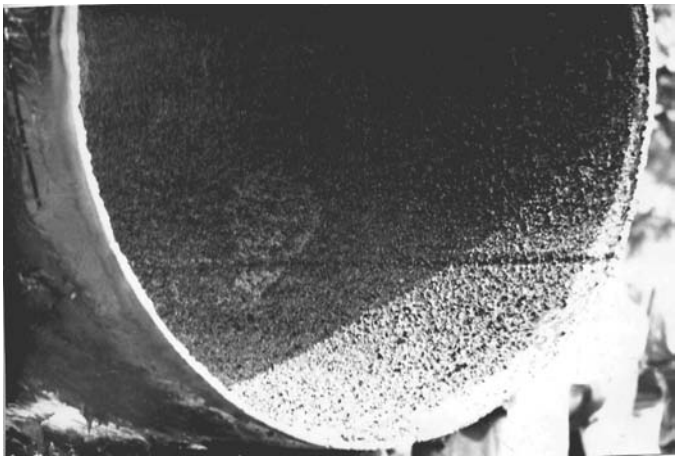


Рис. 3.12. Начало инкрустации внутренней поверхности магистрального водовода диаметром 1200 мм (время эксплуатации 3 года)

По данным табл. 3.3, в отложениях трубопровода трехлетней эксплуатации количество сульфитов меньше, чем в отложениях трубопровода 37-летней эксплуатации, т.е. идет накопление сульфитов с течением времени. С практической точки зрения небольшое восстановление сульфатов может привести к растворению значительного количества железа, так как известно, что 1 мг/дм$^3$ $SO_4$ может освободить 2 мг/дм$^3$ железа. Железобактерии ускоряют процесс окисления двухвалентного железа до трехвалентного. Нитрифицирующие бактерии оказывают коррозионное действие на железо, что связано с образованием азотистой и азотной кислот. Из анализа данных, приведенных в табл. 3.4, следует, что повышение содержания азотосодержащих веществ в воде происходит вследствие наличия хорошей питательной среды для нитробактерий.

Кальциевые отложения в трубопроводах обусловлены не только химическими свойствами воды, но и действием железобактерий, которые, поглощая закисные соли железа, выделяют гидрат окиси железа, откладывая его вокруг своего тела в большом количестве. Поверхность трубы покрывается буграми и выступами, что приводит к инкрустации труб, т.е. к макрошероховатости. Из-за неоднородности структуры металла может возникнуть гальваническая пара, в которой анодом служит деформированный участок (бугры и впадины), а катодом — неповрежденные участки, что приводит к ускорению процесса коррозии [271, 336]. Продуктом коррозии железа является ржавчина, состав которой можно представить в виде соединения $n\mathrm{FeO}\cdot m\mathrm{Fe_2O_3}\cdot k\mathrm{H_2O}$, где коэффициенты $n$, $m$, $k$ зависят от условий протекания процесса окисления.

В отложениях трубопровода с трехлетним сроком эксплуатации (рис. 3.12) преобладает форма $Fe_2O_3$, т.е. процесс коррозии идет более интенсивно. По мере роста слоя инкрустации трубопровода сам нарост постепенно выполняет защитную функцию, сдерживая процесс интенсивной коррозии трубы. Это находит свое подтверждение на приведенном ранее графике зависимости $\overline{\Delta} = f(T)$ (рис. 3.6).

В нейтральном растворе солей щелочных металлов (NaCI, KCI, $Na_2SO_4$), каким является питьевая вода, скорость коррозии железа вначале возрастает, а затем падает. Увеличение содержания хлоридов в питьевой воде может оказывать влияние на интенсивность процесса коррозии. В период с 1952 по 2000 год в химическом составе транспортируемой по водоводам воды наблюдалось повышение содержания хлоридов на 10 мг/л (табл. 3.4).

С ростом величины макрошероховатости замедляется образование новых слоев инкрустации, что связано с лимитированием количества пищевого субстрата. Химический анализ отложений на внутренней поверхности водоводов и легколетучих веществ после прокаливания отложений показал наличие серосодержащих соединений, что свидетельствует о возможности протекания биокоррозии под отложениями. Сами отложения затрудняют доступ деполяризатора (кислорода) к поверхности металла внутренней полости водовода, тормозят коррозионный процесс, однако значительным защитным эффектом они не обладают.

Изложенные результаты наблюдений, естественно, не могут быть использованы непосредственно в расчетах гидравлических сопротивлений. Тем не менее имеет смысл привести их в настоящей книге, так как они представляют самостоятельный интерес, поскольку позволят начать построение моделей временных связей, описывающих многообразные процессы биохимической коррозии. В исследовательской работе автор вынужден был ограничиться установлением влияния гидродинамического критерия — числа Рейнольдса и геометрического параметра — безразмерной величины шероховатости на величину интегрального параметра — коэффициента сопротивления трения и зависимость его от времени. Полученные формулы можно использовать для расчета и проектирования систем водоводов, а также для прогнозирования сроков их санации.

Исследования шероховатости и макрошероховатости и их изменения во времени на начальном этапе эксплуатации водоводов, когда абсолютная шероховатость незначительна, проводили при помощи фотопрофилографа по методу Цейтлина–Лозанского (рис. 3.13), а также другими приборами и инструментами. Состояние внутренней поверхности водоводов оценивали визуально, для чего было просмотрено более 7 км трубопроводов диаметром 1200, 1400, 1600 мм. Выступы макрошероховатости на внутренней поверхности каждого диаметра труб длиной 1 м измеряли по всему периметру (рис. 3.14). Значения выступов шероховатости осреднялись (табл. 3.1).

Следует отметить, что исследования проводили на стальных водоводах диаметром 1200, 1400, 1600 мм, не имеющих внутреннего покрытия (водоводы не санированы).

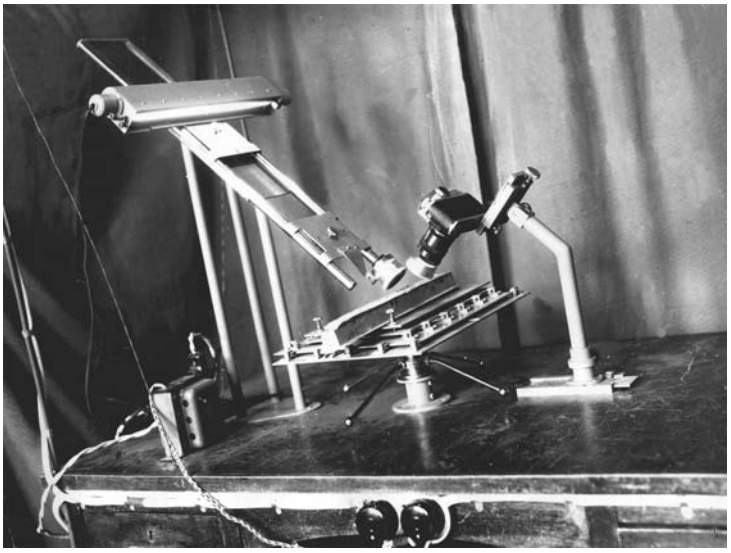


Рис. 3.13. Фотопрофилограф Цейтлина–Лозанского

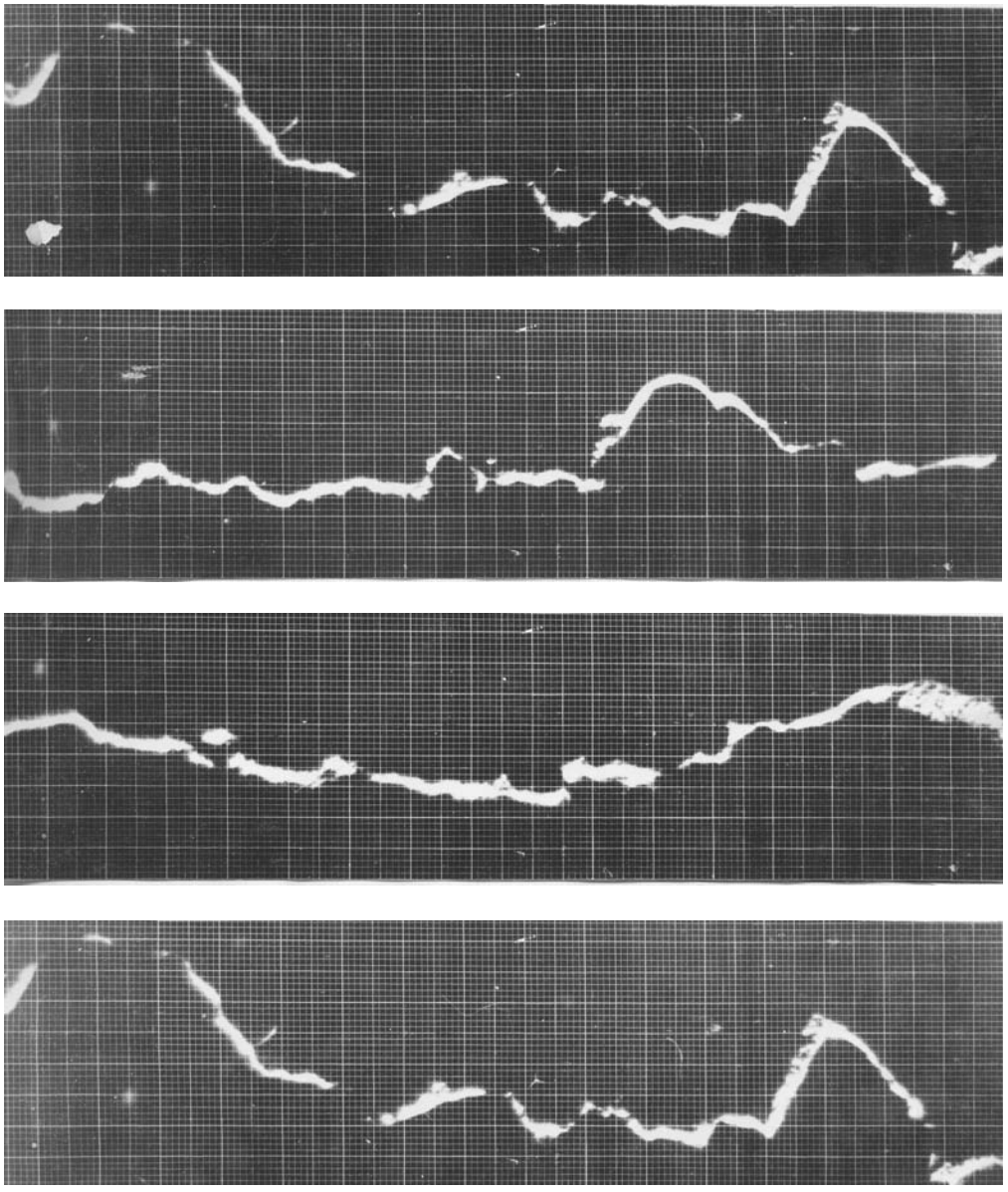


Рис. 3.14. Фотопрофилограммы внутренней поверхности водовода диаметром 1200 мм, находившегося в эксплуатации 12–16 мес. (горизонтальное увеличение х12; вертикальное — х17; средняя высота отложений 2,326 мм, шаг отложений 9,462 мм)

### 3.2.2. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1400 ММ (ИСТОЧНИК ВОДЫ — РЕКА СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ)

Результаты натурных исследований макрошероховатости внутренней поверхности стального водовода диаметром 1400 мм, проводившиеся на протяжении 35 лет его эксплуатации, сведены в таблицу (табл. 3.6). Трубы такого диаметра используются при групповом водоснабжении городов и в системах водоснабжения городов с населением свыше 800 тыс. человек. Исходные данные для расчета коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda$ водовода приведены в приложении А, табл. А.2.

Таблица 3.6

**Характер макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (1396 мм) с течением времени его эксплуатации (Кочетокская водопроводная станция Харькова; водовод № 4)**

| Время эксплуатации, $T$, мес. | Максимальная макрошероховатость, $\delta$, мм | Относительная шероховатость, $\bar{\Delta}$ | $\lambda$ |
|---|---|---|---|
| 22 (1 год 10 мес.) | 11,2 | 0,00802 | 0,0319 |
| 33 (2 года 9 мес.) | 13,2 | 0,00946 | 0,0350 |
| 35 (3 года 9 мес.) | 13,6 | 0,00974 | 0,0372 |
| 61 (15 лет 1 мес.) | 15,4 | 0,01103 | 0,0397 |
| 79 (6 лет 7 мес.) | 17,5 | 0,01250 | 0,0433 |
| 82 (13 лет 4 мес.) | 19,5 | 0,01397 | 0,0520 |
| 240 (20 лет) | 20,1 | 0,01440 | 0,0530 |
| 300 (25 лет ) | 21,3 | 0,01526 | 0,0583 |
| 360 (30 лет) | 21,4 | 0,01533 | 0,0604 |
| 361 (30 лет 1 мес.) | 21,4 | 0,01533 | 0,0605 |
| 420 (35 лет) | 22,3 | 0,01597 | 0,0632 |

С использованием данных табл. 3.6 выявлен характер изменения макрошероховатости во времени: в начале (первые 75 мес. эксплуатации) наблюдается интенсивный рост макрошероховатости, а далее процесс значительно замедляется.

Зависимость $\delta = f(T)$ (рис. 3.15) вполне удовлетворительно аппроксимируется эмпирической формулой

$$\delta = \frac{22,95T}{T + 26,43} \quad \text{при} \quad 22 \le T \le 420, \tag{3.6}$$

где $\delta$ — абсолютная шероховатость, мм, по данным замеров на водоводе;

$T$ — время эксплуатации магистрального водовода, мес.

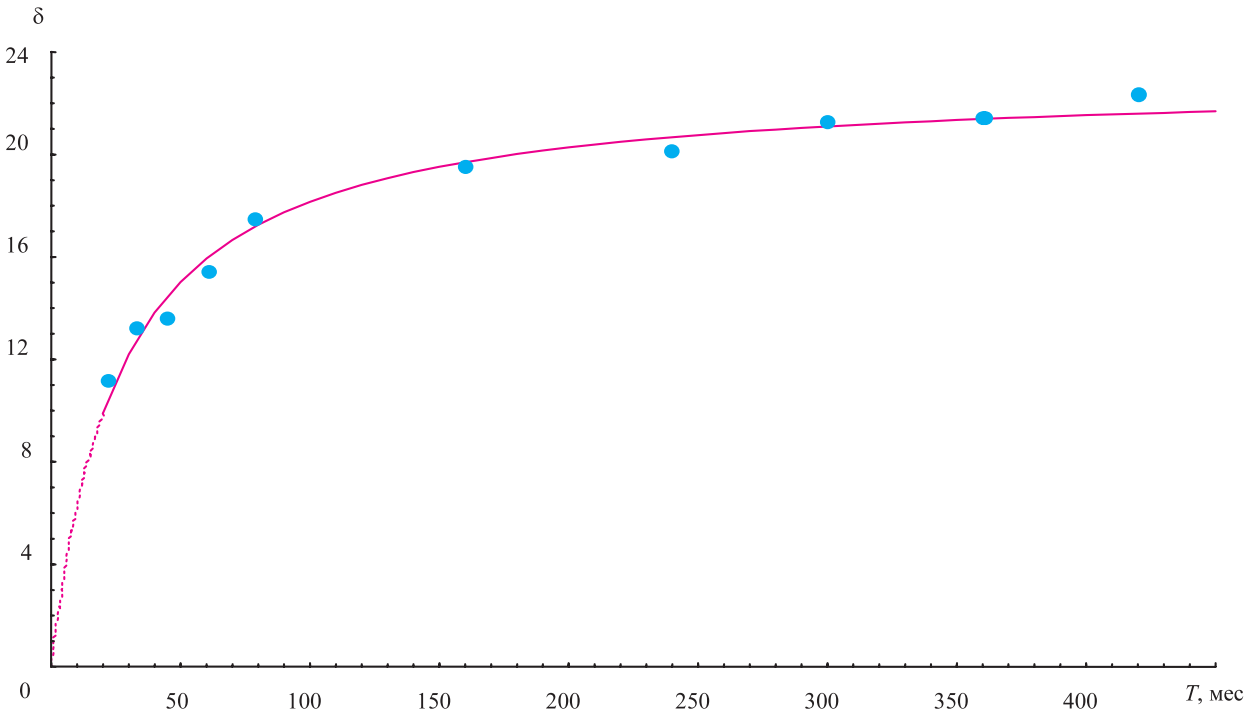



Рис. 3.15. Изменение величины абсолютной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (L = 14 973 м) в процессе его эксплуатации

Формуле (3.6) соответствует модель 2 (табл. 3.7), которая является оптимальной, поскольку имеет максимум коэффициента корреляции и минимум стандартной ошибки σ.

Таблица 3.7

**Характеристики регрессионной зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\bar{\Delta} = a + bT$ | 2. $\bar{\Delta} = aT/(T+b)$ | 3. $\bar{\Delta} = aT^n$ | 4. $\bar{\Delta} = a + bT + cT^2$ | 5. $\bar{\Delta} = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,00957<br>$b$ = 0,000017 | $a$ = 0,016<br>$b$ = 26,43 | $a$ = 0,004635<br>$n$ = 0,206882 | $a$ = 0,00815<br>$b$ = −0,000044<br>$c$ = −6,369·10$^{-7}$ | $a$ = 0,000298<br>$b$ = 0,00260 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,001082 | 0,000386 | 0,000525 | 0,000659 | 0,000379 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,923 | 0,991 | 0,982 | 0,972 | 0,991 |

На основании табл. 3.7 была выбрана модель вида

$$\bar{\Delta} = \frac{0,016T}{T + 26,43}, \qquad (3.7)$$

где T — время эксплуатации водовода, мес.

При выборе модели учитывалось то обстоятельство, что дробно-линейная функция (модель 2) лучше описывает зависимость $\bar{\Delta} = f(T)$ при $T \to \infty$, чем логарифмическая функция (модель 5). По формуле (3.7) построен график зависимости (рис. 3.16).

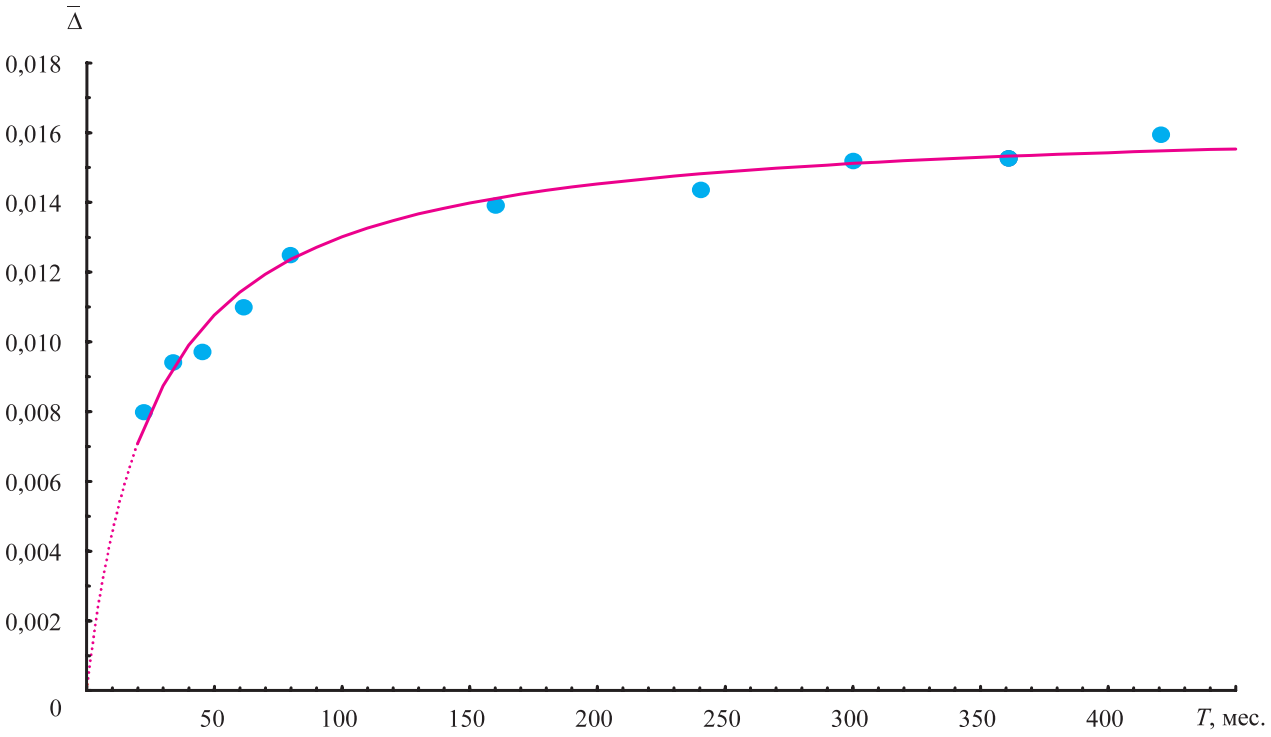



Рис. 3.16. Изменение величины относительной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (L=14 973 м) в процессе его эксплуатации

Полученная формула (3.7) показывает, что в первые 75 мес. (6,3 года) эксплуатации водовода интенсивно растет относительная шероховатость $\overline{\Delta}$, а в последующие годы процесс значительно замедляется.

На коэффициент гидравлического сопротивления λ существенно влияет образование на внутренней поверхности действующего магистрального водовода диаметром 1400 мм макрошероховатостей, напоминающих сталактиты различной формы и размеров (рис. 3.17 и 3.18), аналогично тому, как это происходит в водоводе диаметром 1200 мм. В сухом виде они представляют собой бурую рыхлую пористую массу различной формы плотностью 1,4–1,6 г/см$^3$, открытой пористостью 51–55 %, с водопоглощением 33–39 %. Химический состав компонентов отложений, а с ним и качество питьевой воды с течением времени эксплуатации водовода изменяются (табл. 3.8 и 3.9)

Таблица 3.8

**Химический состав отложений и массовая доля компонентов, %**
**(участок № 6, $d$ = 1400 мм)**

| Срок развития инкрустации | Летучие после прокаливания | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | CaO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | MgO | $TiO_2$ | Прочие |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 год 10 мес. | 18,10 | 1,64 | 64,7 | 7,20 | 1,20 | 1,90 | 0,10 | 0,4 | Следы | 4,76 |
| 35 лет | 17,96 | 2,24 | 67,0 | 5,17 | 1,26 | 1,74 | 0,86 | – | – | 3,77 |
| В сравнении с двухлетним сроком эксплуатации | +0,14 | −0,60 | −2,3 | +2,03 | −0,06 | +0,16 | −0,76 | +0,4 | – | +0,99 |

Таблица 3.9

**Качество питьевой воды водовода диаметром 1400 мм после кондиционирования (среднее за период эксплуатации водовода)**

| Срок эксплуатации водовода | Мутность, мг/л | Цветность, град. | pH | Щелочность, мг-экв./л | Окисляемость, мг/л | Хлориды, мг/л | Аммиак, мг/л | Нитраты, мг/л | Общая жесткость, мг-экв./л | Гидрокарбонаты, $HCO_3$, мг/л | Кальций, мг/л | Магний, мг/л | Свободные углекислоты, мг/л | Плотный остаток, мг/л | Фтор, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952–1962 гг., до зарегулирования Северского Донца | 0,40 | 10,8 | 7,27 | 3,90 | 4,5 | 25,0 | 0,024 | Нет | 6,80 | 237,7 | 88,0 | 29,02 | 28,6 | 482 | 0,45 |
| 1963–2000 гг. | 0,41 | 10,0 | 7,55 | 4,13 | 4,4 | 35,0 | 0,050 | 11 | 5,13 | 251,9 | 74,6 | 17,03 | 15,6 | 473 | 0,40 |
| В сравнении с 1962 г. | +0,01 | −0,8 | +0,28 | +0,23 | −0,1 | +10 | +0,026 | +11 | −1,67 | +14,2 | −13,4 | −11,99 | −13,0 | −9 | −0,05 |

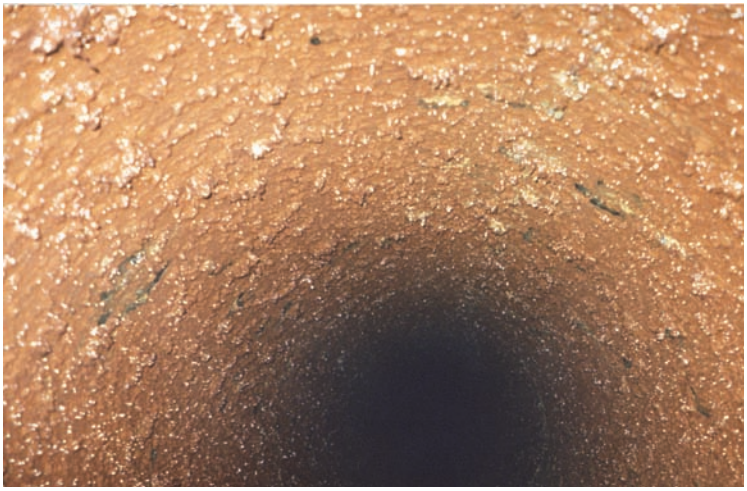


Рис. 3.17. Макрошероховатость внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (время эксплуатации водовода 34 года)



Рис. 3.18. Пальпация макрошероховатости с анаэробными бактериями

### 3.2.3. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1600 ММ (ИСТОЧНИК ВОДЫ — РЕКА СЕВЕРСКИЙ ДОНЕЦ)

Результаты натурных исследований макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (участок № 8), проводившихся на протяжении 33 лет его эксплуатации, сведены в таблицу (табл. 3.10). Исходные данные для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ водовода приведены в приложении А, табл. А.3.

Таблица 3.10

**Характер макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм с течением времени его эксплуатации**

| Время эксплуатации, $T$, мес. | Максимальная макрошероховатость, $\delta$, мм | Относительная макрошероховатость, $\bar{\Delta}$ | λ |
|---|---|---|---|
| 2 | 0,5 | 0,000314 | 0,0283 |
| 13 (1 год 1 мес.) | 4,1 | 0,002579 | 0,0317 |
| 41 (3 года 5 мес.) | 9,0 | 0,005660 | 0,0362 |
| 84 (7 лет) | 12,5 | 0,007862 | 0,0438 |
| 144 (12 лет) | 15,0 | 0,009433 | 0,0478 |
| 228 (19 лет) | 16,0 | 0,010062 | 0,0525 |
| 288 (24 года) | 17,0 | 0,010692 | 0,0544 |
| 396 (33 года) | 18,0 | 0,011321 | 0,0586 |

С использованием данных замеров получена зависимость $\delta = f(T)$ (рис. 3.19), которая может быть выражена эмпирической формулой

$$\delta = \frac{20,046T}{50,78 + T}, \qquad (3.8)$$

где δ — абсолютная шероховатость, мм;

Т — время эксплуатации магистрального водовода, мес.

В дальнейшем были исследованы различные виды регрессионных моделей для зависимостей: $\lambda = f(Re)$; $\lambda = f(\bar{\Delta})$; $\lambda = f(T)$; $\bar{\Delta} = f(T)$; $i = f(V)$, где $i$ – гидравлический уклон.

Оптимальные зависимости определяли по максимуму коэффициента корреляции или минимуму стандартной ошибки.

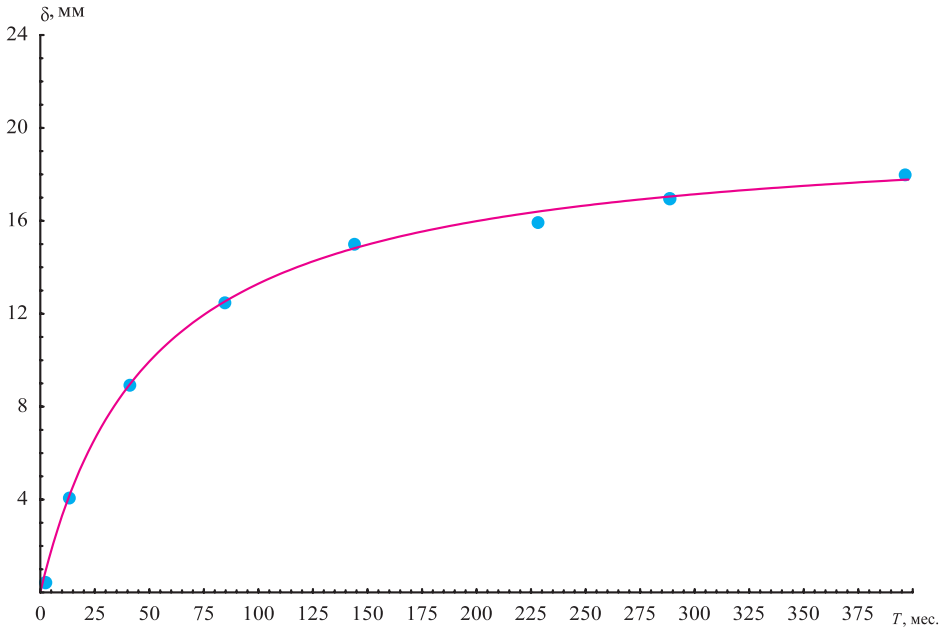



Рис. 3.19. Изменение величины абсолютной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (L = 6558 м) в процессе его эксплуатации

На основании табл. 3.11 для зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$ (рис. 3.20) была выбрана модель

$$\bar{\Delta} = \frac{0,0126T}{T + 50,78}, \qquad (3.9)$$

где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.

Таблица 3.11

**Характеристики регрессионной зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\bar{\Delta}=a+bT$ | 2. $\bar{\Delta}=aT/(T+b)$ | 3. $\bar{\Delta}=aT^n$ | 4. $\bar{\Delta}=a+bT+cT^2$ | 5. $\bar{\Delta}=a+b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,00359<br>$b$ = 0,000024 | $a$ = 0,0126<br>$b$ = 50,78 | $a$ = 0,001344<br>$n$ = 0,369 | $a$ = 0,001871<br>$b$ = −0,000065<br>$c$ = 1,1·10$^{-7}$ | $a$ = −0,00203<br>$b$ = 0,00222 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,002032 | 0,0001330 | 0,0009071 | 0,00111867 | 0,0005794 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,864 | 0,999 | 0,974 | 0,961 | 0,989 |

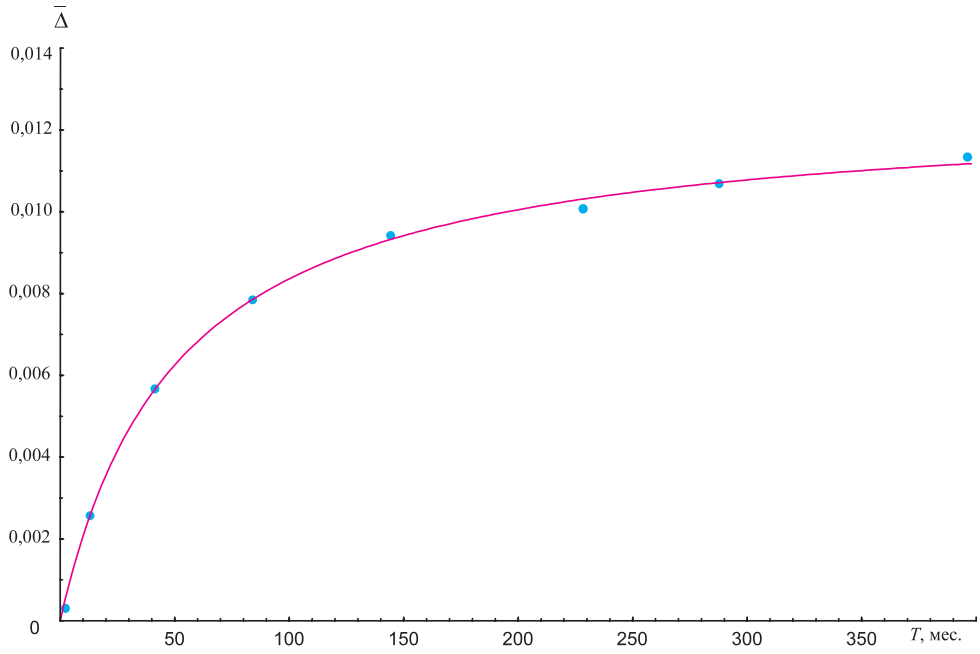



Рис. 3.20. Изменение величины относительной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (L = 6558 м) в процессе его эксплуатации

Полученная формула (3.9) показывает, что в первые 140 мес. (11,6 года) наблюдается интенсивный рост относительной шероховатости $\bar{\Delta}$ в водоводе, а в последующие годы интенсивность процесса уменьшалась. На коэффициент гидравлического сопротивления λ существенно влияет образование на внутренней поверхности действующих магистральных водоводов диаметром 1600 мм макрошероховатостей различной формы и размеров, напоминающих сталактиты, (рис. 3.21–3.23). В сухом виде они, так же как и в водоводах диаметром 1200 и 1400 мм, представляют собой бурую рыхлую пористую массу различной формы плотностью 1,4–1,6 г/см$^3$, открытой пористостью 51–55 %, с водопоглощением 33–39 %. С течением времени изменяются химический состав отложений (табл. 3.12), а также качество питьевой воды после прохождения ею системы кондиционирования (табл. 3.13).



Рис. 3.21. Макрошероховатость внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (время эксплуатации водовода 33 года)

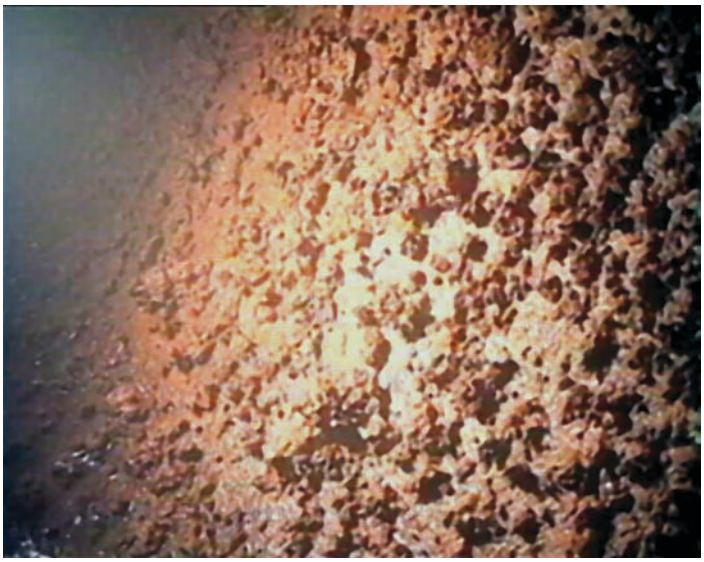


Рис. 3.22. Инкрустация на внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (время эксплуатации водовода 33 года)

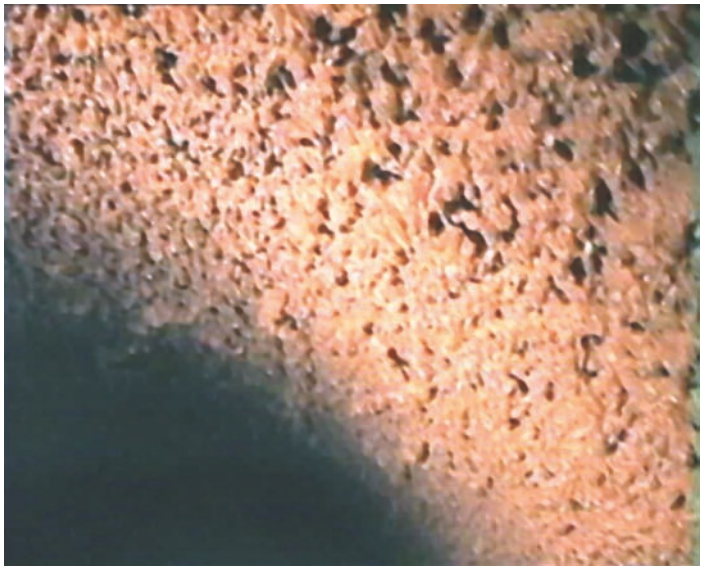


Рис. 3.23. Макрошероховатость с анаэробными бактериями на внутренней поверхности водовода диаметром 1600 мм (время эксплуатации водовода 33 года)

Таблица 3.12

**Химический состав отложений и массовая доля компонентов, %
(участок № 8, $d$ = 1600 мм)**

| Срок развития инкрустации | Летучие после прокаливания | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | CaO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | MgO | $TiO_2$ | Прочие |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 год 1 мес. | 15,2 | 1,74 | 76,4 | 2,2 | 0,5 | 0,81 | 0,09 | Следы | Следы | 3,06 |
| 33 года | 17,1 | 1,9 | 71,1 | 3,4 | 1,25 | 1,6 | 0,1 | – | – | 3,74 |
| За 32-летний срок эксплуатации | +1,9 | +0,16 | −5,3 | +1,01 | +0,75 | +0,79 | +0,01 | – | – | +0,68 |

Таблица 3.13

**Качество питьевой воды водовода диаметром 1600 мм после кондиционирования
(среднее за период эксплуатации водовода)**

| Срок эксплуатации водовода | Мутность, мг/л | Цветность, град. | pH | Щелочность, мг-экв./л | Окисляемость, мг/л | Хлориды, мг/л | Аммиак, мг/л | Нитраты, мг/л | Общая жесткость, мг-экв./л | Гидрокарбонаты, $HCO_3$, мг/л | Кальций, мг/л | Магний, мг/л | Свободные углекислоты, мг/л | Плотный остаток, мг/л | Фтор, мг/л |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1952–1962 гг., до зарегулирования Северского Донца | 0,40 | 10,8 | 7,27 | 3,90 | 4,5 | 25,0 | 0,024 | Нет | 6,80 | 237,7 | 88,0 | 29,02 | 28,6 | 482 | 0,45 |
| 1963–2000 гг. | 0,41 | 10,0 | 7,55 | 4,13 | 4,4 | 35,0 | 0,050 | 11 | 5,13 | 251,9 | 74,6 | 17,03 | 15,6 | 473 | 0,40 |
| В сравнении с 1962 г. | +0,01 | -0,8 | +0,28 | +0,23 | −0,1 | +10 | +0,026 | +11 | −1,67 | +14,2 | −13,4 | −11,99 | −13,0 | −9 | −0,05 |

Исследования зависимости коэффициента гидравлического сопротивления λ на водоводе диаметром 1600 мм проводились в широком диапазоне чисел $Re$ в течение 33 лет эксплуатации водовода. Число режимов и количество экспериментов было меньше, так как это было связано с необходимостью отключения водоснабжения части города с населением более 300 тыс. человек. Режимы экспериментальных исследований вполне отвечали условиям, в которых работают магистральные водоводы при водообеспечении городов (рис. 3.24).

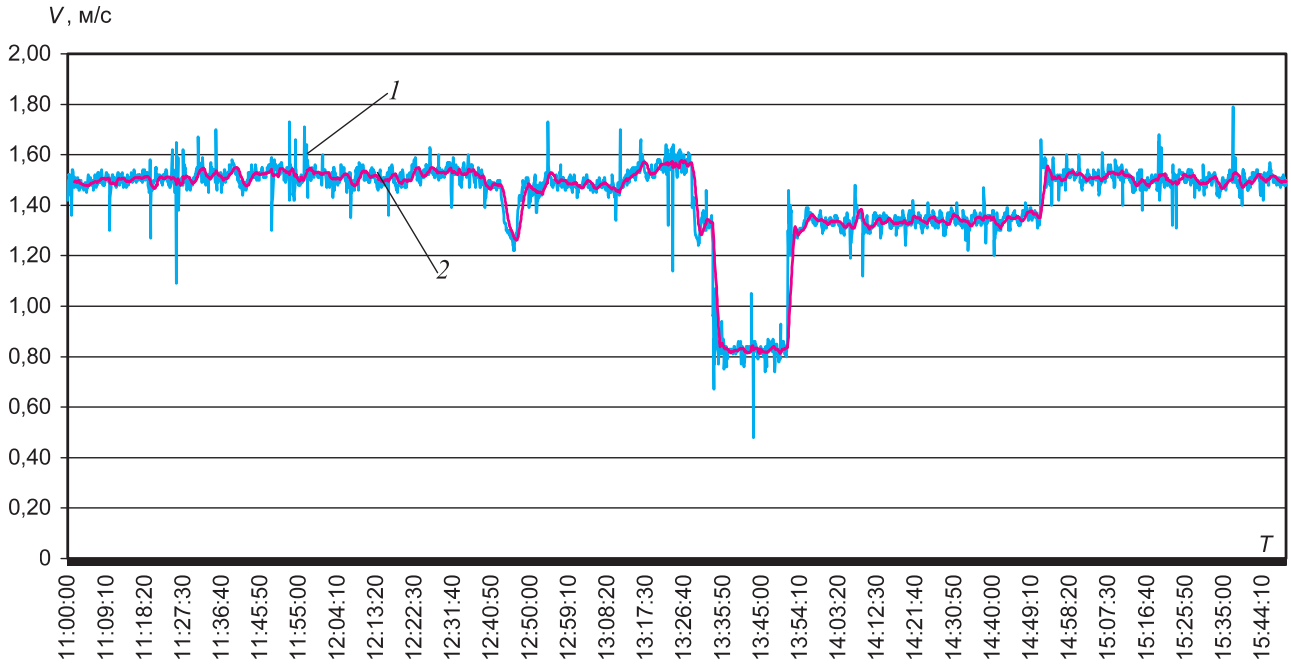



Рис. 3.24. График пульсации скорости потока воды в водоводе диаметром 1600 мм, работающем в различных режимах: 1 — пульсирующая скорость Vп; 2 — средняя скорость Vср

### 3.2.4. ИССЛЕДОВАНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1400 ММ (ИСТОЧНИК ВОДЫ — РЕКА ДНЕПР)

Результаты натурных исследований макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм, которые проводились на протяжении 16 лет его эксплуатации, сведены в таблицу (табл. 3.14). Исходные данные для расчета коэффициента гидравлического сопротивления λ приведены в приложении А, табл. А.4.

Таблица 3.14

**Характер макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (Днепр) с течением времени эксплуатации**

| Время эксплуатации, $T$, мес. | Максимальная макрошероховатость, $\delta$, мм | Относительная макрошероховатость, $\bar{\Delta}$ | λ |
|---|---|---|---|
| 0,33 (1 день) | 0,5 | 0,00036 | 0,025 |
| 2 (60 дней) | 3,0 | 0,00215 | 0,027 |
| 19 (1 год 7 мес.) | 11,9 | 0,00852 | 0,032 |
| 38 (3 года 2 мес.) | 16,0 | 0,01146 | 0,040 |
| 56 (4 года 8 мес.) | 17,1 | 0,01225 | 0,042 |
| 78 (6 лет 6 мес.) | 18,4 | 0,01318 | 0,046 |
| 108 (9 лет) | 18,6 | 0,01332 | 0,048 |
| 121 (10 лет 1 мес) | 19,0 | 0,01361 | 0,050 |
| 144 (12 лет) | 19,8 | 0,01418 | 0,053 |
| 192 (16 лет) | 20,5 | 0,01469 | 0,057 |

Анализ данных натурных измерений макрошероховатости приводит к выводу, что для водовода диаметром 1400 мм имеются три фазы роста макрошероховатости: I — длительностью примерно до 3,3 года — фаза интенсивного роста макрошероховатости; II — от 3,3 до 8,3 года — фаза замедленного роста макрошероховатости и III — от 8,3 до 16 лет — стабильного и медленного роста макрошероховатости.

На рис. 3.25 представлена зависимость $\delta = f(T)$, полученная по данным замеров в течение времени $T$ на водоводе диаметром 1400 (1396) мм. Выведена эмпирическая формула

$$\delta = \frac{21,64T}{T + 14,59}, \quad 0 \le T \le 200, \tag{3.10}$$

где $T$ — время нахождения в эксплуатации магистрального водовода, мес.;

$\delta$ — абсолютная шероховатость, мм.

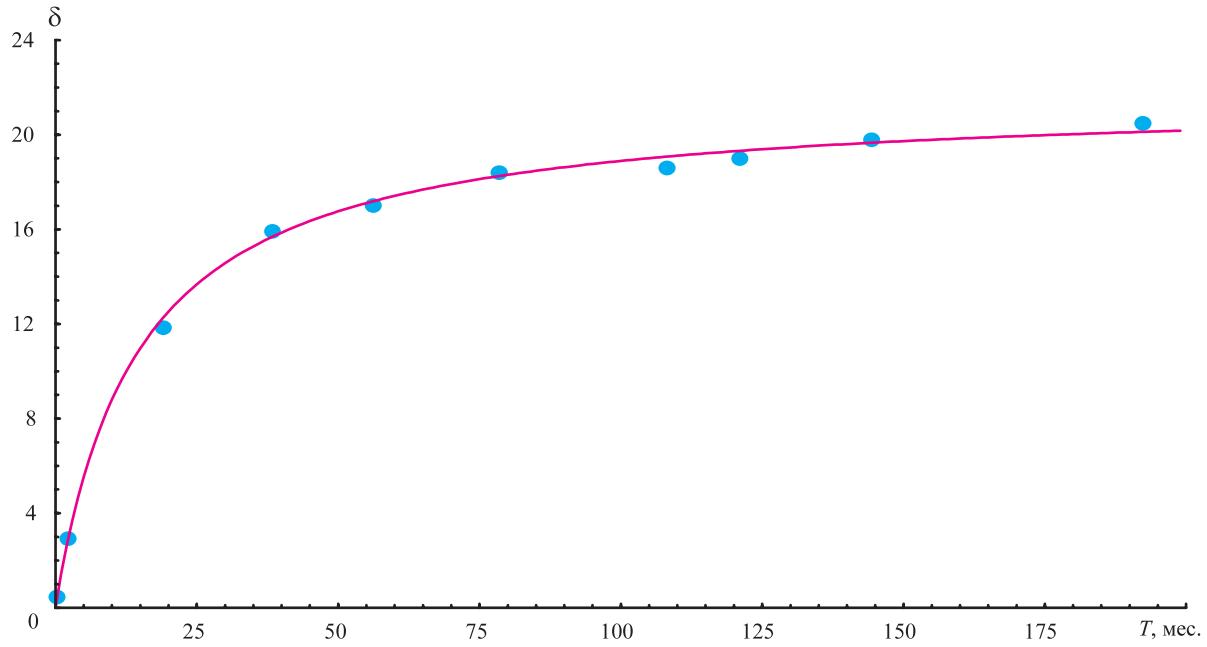



Рис. 3.25. Изменение величины абсолютной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (L = 47 197 м) в процессе его эксплуатации

В работе исследованы различные виды регрессионной модели для зависимостей: $\lambda = f(Re)$; $\lambda = f(\bar{\Delta})$; $\lambda = f(T)$; $\bar{\Delta} = f(T)$; $i = f(V)$. Оптимальные зависимости определялись по максимуму коэффициента корреляции или минимуму стандартной ошибки.

На основании табл. 3.15 для зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$ (рис. 3.26) выбрана модель

$$\bar{\Delta} = \frac{0,0155T}{14,59 + T}, \tag{3.11}$$

где $T$ — время нахождения водовода в эксплуатации, мес.

Таблица 3.15

**Характеристики регрессионной зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\bar{\Delta} = a + bT$ | 2. $\bar{\Delta} = aT/(T + b)$ | 3. $\bar{\Delta} = aT^n$ | 4. $\bar{\Delta} = a + bT + cT^2$ | 5. $\bar{\Delta} = a + b \ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,0055<br>$b$ = 0,000064 | $a$ = 0,0155<br>$b$ = 14,59 | $a$ = 0,0035<br>$n$ = 0,288 | $a$ = 0,002953<br>$b$ = −0,000181<br>$c$ = $-6,61 \cdot 10^{-7}$ | $a$ = −0,004613<br>$b$ = −0,001808 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,003018 | 0,000254 | 0,001105 | 0,001795 | 0,0015635 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,807 | 0,999 | 0,975 | 0,935 | 0,953 |

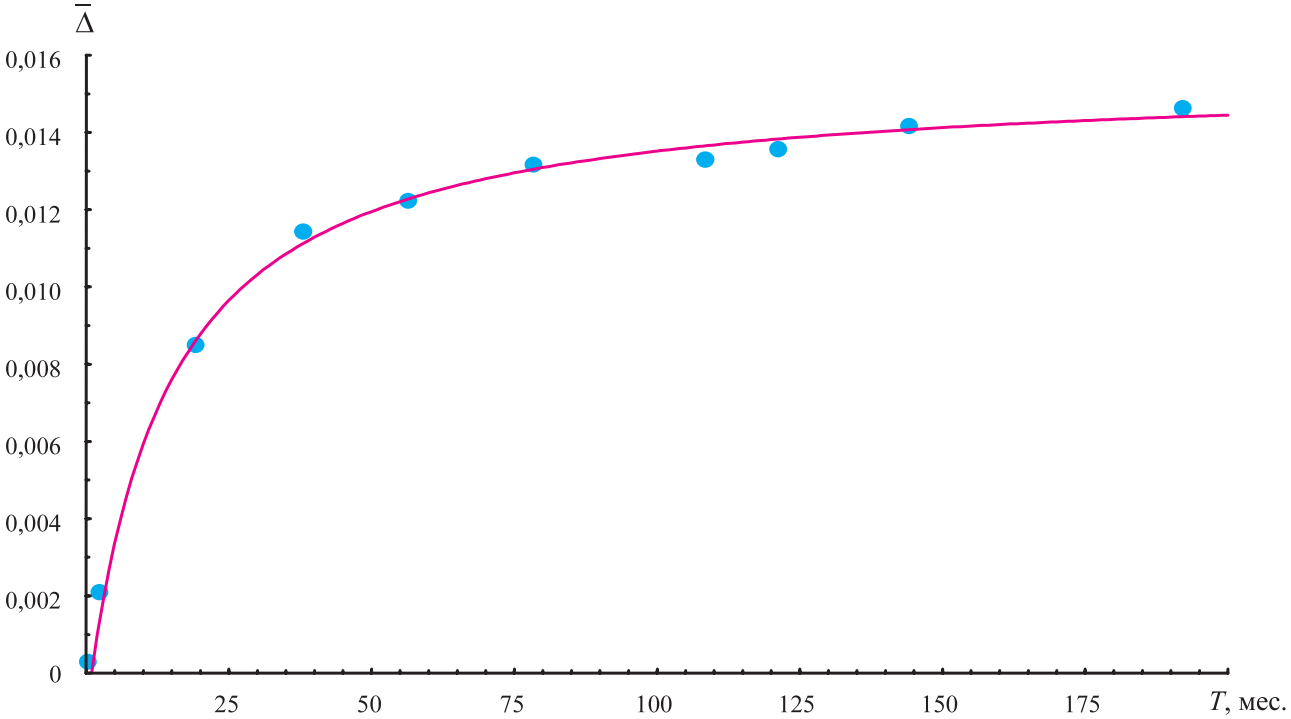



Рис. 3.26. Изменение величины относительной макрошероховатости внутренней поверхности водовода диаметром 1400 мм (L = 47 197 м) в процессе эксплуатации

Полученная формула (3.11) показывает, что с течением времени эксплуатации наблюдаются три фазы роста относительной макрошероховатости $\overline{\Delta}$ днепровского водовода.

Как видно из рис. 3.27–3.29, характер макрошероховатостей подобен ранее описанным. В сухом виде они, как и на водоводах диаметром 1200, 1400, 1600 мм, транспортирующих воду от Северского Донца, представляют собой бурую рыхлую, пористую массу различной формы плотностью 1,4–1,6 г/см$^3$, открытой пористостью 51–55 %, с водопоглощением 33–39 %. Химический состав отложений, развившихся в течение 16 лет эксплуатации исследованного водовода, виден из табл. 3.16, химический состав воды — из табл. 3.17.

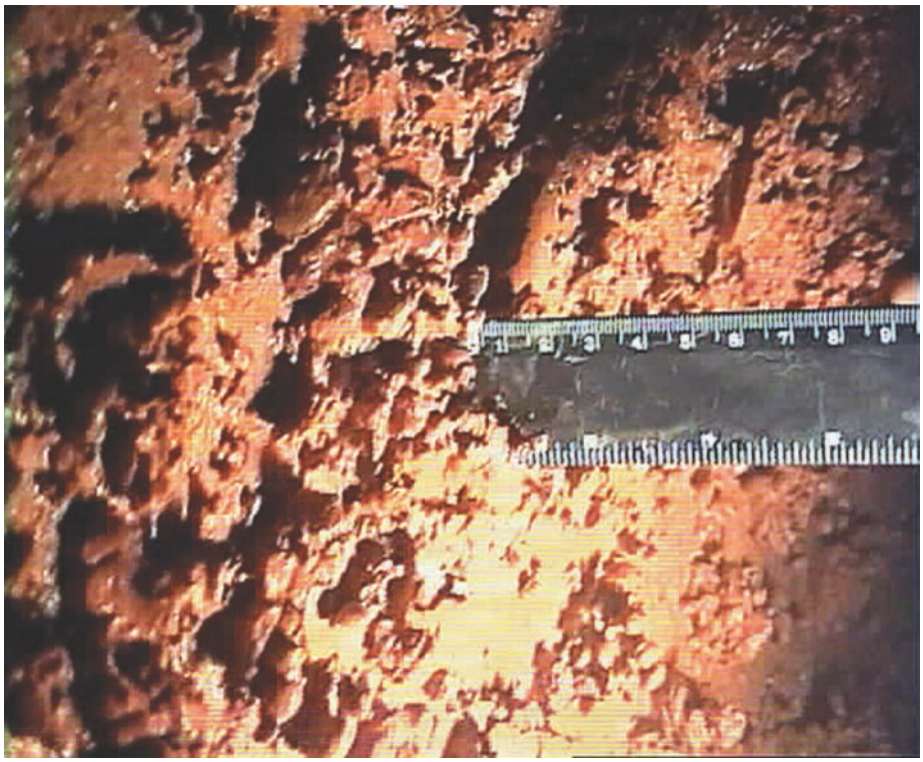


Рис. 3.27. Макрошероховатость внутренней поверхности днепровского водовода диаметром 1400 мм (время эксплуатации водовода 16 лет)



Рис. 3.28. Инкрустация на внутренней поверхности днепровского водовода диаметром 1400 мм (время эксплуатации водовода 16 лет)

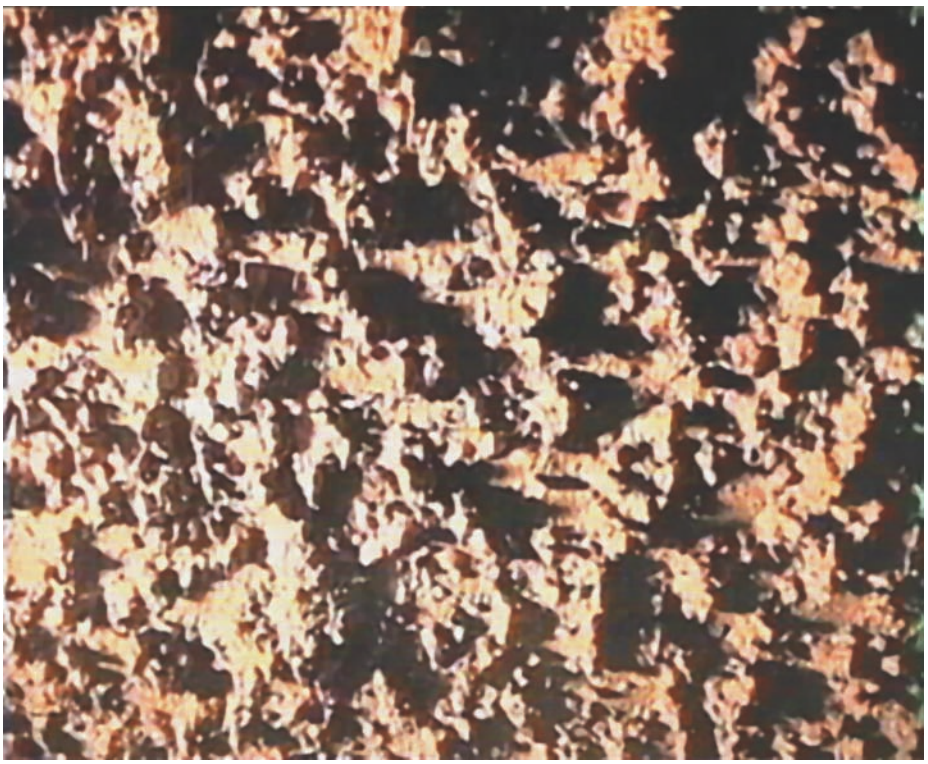


Рис. 3.29. Макрошероховатость с анаэробными бактериями на внутренней поверхности днепровского водовода диаметром 1400 мм (время эксплуатации водовода 16 лет)

Таблица 3.16

**Массовая доля химических компонентов инкрустации, развившейся за 16 лет, % (участок № 11, $d$ = 1400 мм)**

| Летучие после прокаливания | $SiO_2$ | $Fe_2O_3$ | FeO | CaO | $SO_3$ | $P_2O_5$ | MgO | $TiO_2$ | Прочие |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 18,2 | 1,75 | 65,3 | 8,0 | 0,9 | 0,7 | 0,09 | 0,5 | Следы | 4,56 |

Таблица 3.17

**Качество питьевой воды водовода диаметром 1400 мм (источник — река Днепр) после кондиционирования (данные 2000 г.)**

| Мутность, мг/л | Цветность, град. | pH | Щелочность, мг-экв./л | Окисляемость, мг/л | Хлориды, мг/л | Аммиак, мг/л | Нитраты, мг/л | Общая жесткость, мг-экв./л | Гидрокарбонаты, $HCO_3$, мг/л | Кальций, мг/л | Магний, мг/л | Свободные углекислоты, мг/л | Плотный остаток, мг/л | Фтор, мг/л | Сульфаты, мг/л | Na+K, мг/л по разности |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,28 | 9 | 8,09 | 3,17 | 7,7 | 60 | 0,1 | 0,002 | 5,56 | 193,0 | 63,0 | 29,0 | 3,5 | 650 | 0,23 | 243,0 | 104 |

О характере пульсации скорости потока воды в водоводе (рис. 3.30) при различных режимах его работы можно судить по графику, приведенному на рис. 3.31.

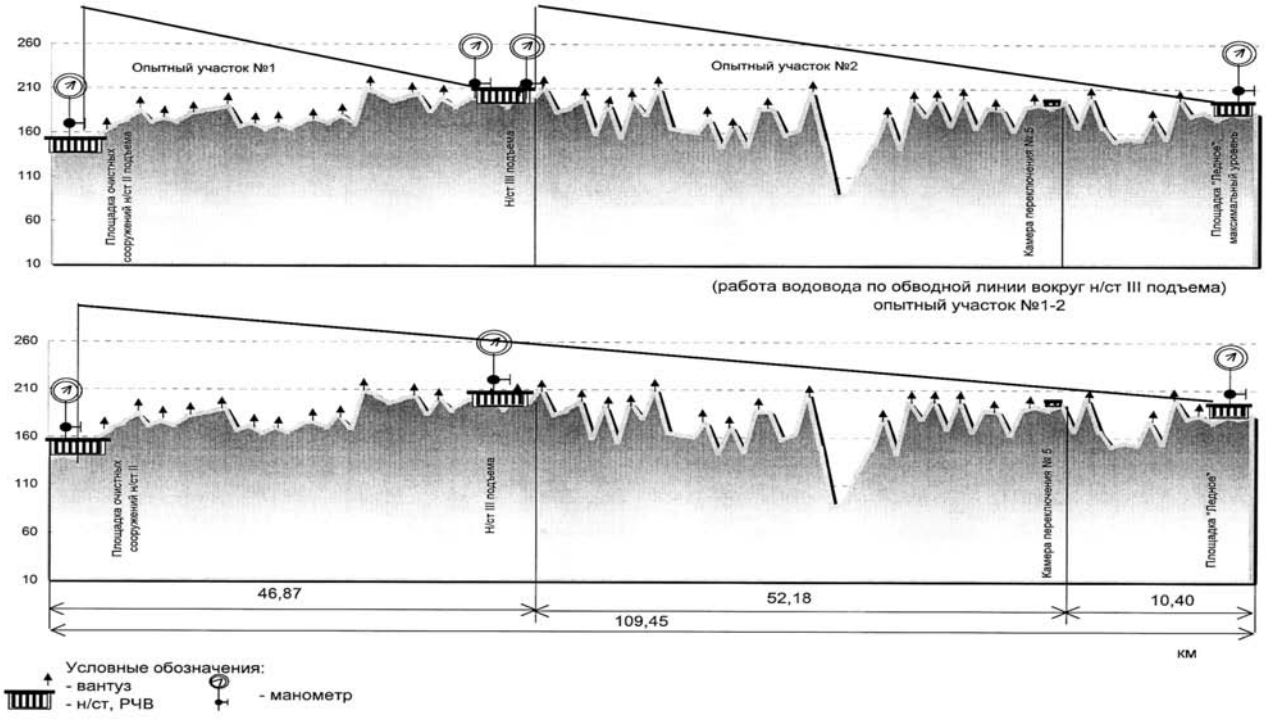



Рис. 3.30. Магистральный водовод диаметром 1400 мм из канала «Днепр–Донбасс» на Харьков

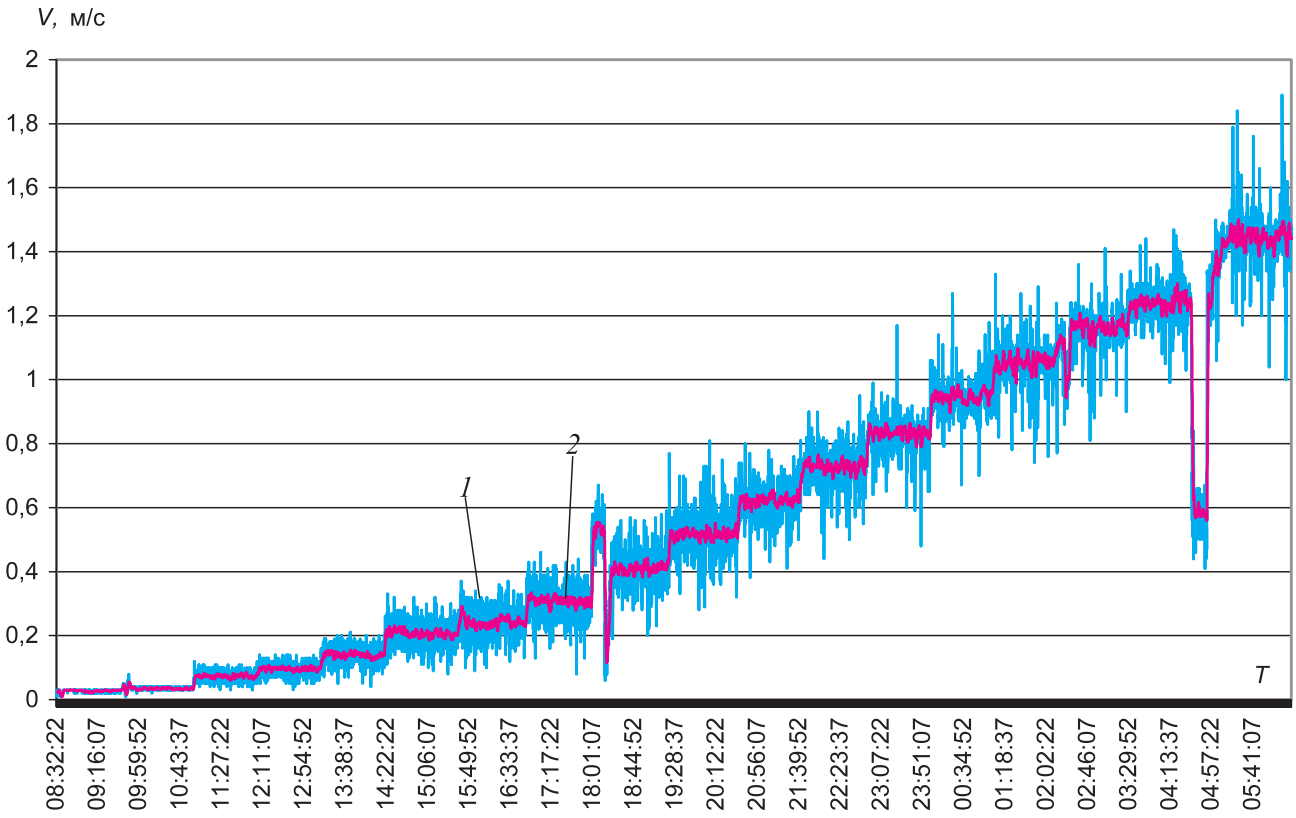



Рис. 3.31. График пульсации скорости потока воды в днепровском водоводе диаметром 1400 мм, работающем в различных режимах:
1 — пульсирующая скорость $V_{п}$; 2 — средняя скорость $V_{ср}$

### 3.2.5. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ $\lambda = f(Re)$ И $\lambda = f(\overline{\Delta})$ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1200 ММ С ПОСТРОЕНИЕМ ДВУХФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$

Используя основные положения теории подобия и размерностей [129, 133, 246, 267, 268, 290], легко показать, что, несмотря на сложность явлений, вызывающих изменение неровностей (шероховатостей) на внутренней поверхности водоводов во времени, коэффициент гидравлического сопротивления определяется лишь двумя независимыми безразмерными параметрами: числом Рейнольдса $(Re)$ и относительной шероховатостью $\overline{\Delta} = \dfrac{\delta}{d}$, зависящей от времени. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от времени эксплуатации водовода $\lambda = f(T)$ учитывается в принятой модели косвенным образом через временную зависимость относительной шероховатости $\overline{\Delta} = f(T)$. Для сравнения исследовалась также и непосредственная зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от времени $\lambda = f(T)$. Таким образом, задача сводится к построению двухфакторной регрессионной зависимости $\lambda = f(Re,\ \overline{\Delta})$.

Поскольку данная регрессионная зависимость является нелинейной как по величине числа $Re$, так и по величине относительной макрошероховатости $\overline{\Delta}$, в целях выявления формы этих нелинейностей предварительно были исследованы парные зависимости $\lambda = f(Re)$ и $\lambda = f(\overline{\Delta})$.

Исследования зависимости коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda$ проводили в широком диапазоне чисел $Re$ на водоводе диаметром 1200 мм в течение 37 лет его эксплуатации, на водоводах диаметром 1400 мм — в течение 34 и 16 лет их эксплуатации. Благодаря завершению строительства кольцевого водовода вокруг Харькова [241] появилась возможность в условиях водообеспечения города произвести изменение режимов на водоводах и получить значительный объем экспериментальных данных при варьировании чисел $Re$ в диапазоне от 100 000 до 3 000 000. На водоводе диаметром 1600 мм, находящемся в эксплуатации 34 года, число режимов и количество экспериментов было меньше, так как

изменение режимов в данном случае связано с отключением водоснабжения части города с населением более 300 тыс. человек. Режимы проведенных экспериментальных исследований перекрывают условия, в которых могут работать магистральные водоводы, обеспечивающие города водой.

Естественно, что при транспортировании воды к основным городским резервуарам по магистральным водоводам макрошероховатость влияет и на характер пульсации скорости потока воды в водоводах. Характер пульсации скорости при различных режимах работы исследуемого водовода (со сроком эксплуатации 34 года), которые имели место во время проведения исследований коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda = f(Re)$, хорошо виден из рис. 3.32.

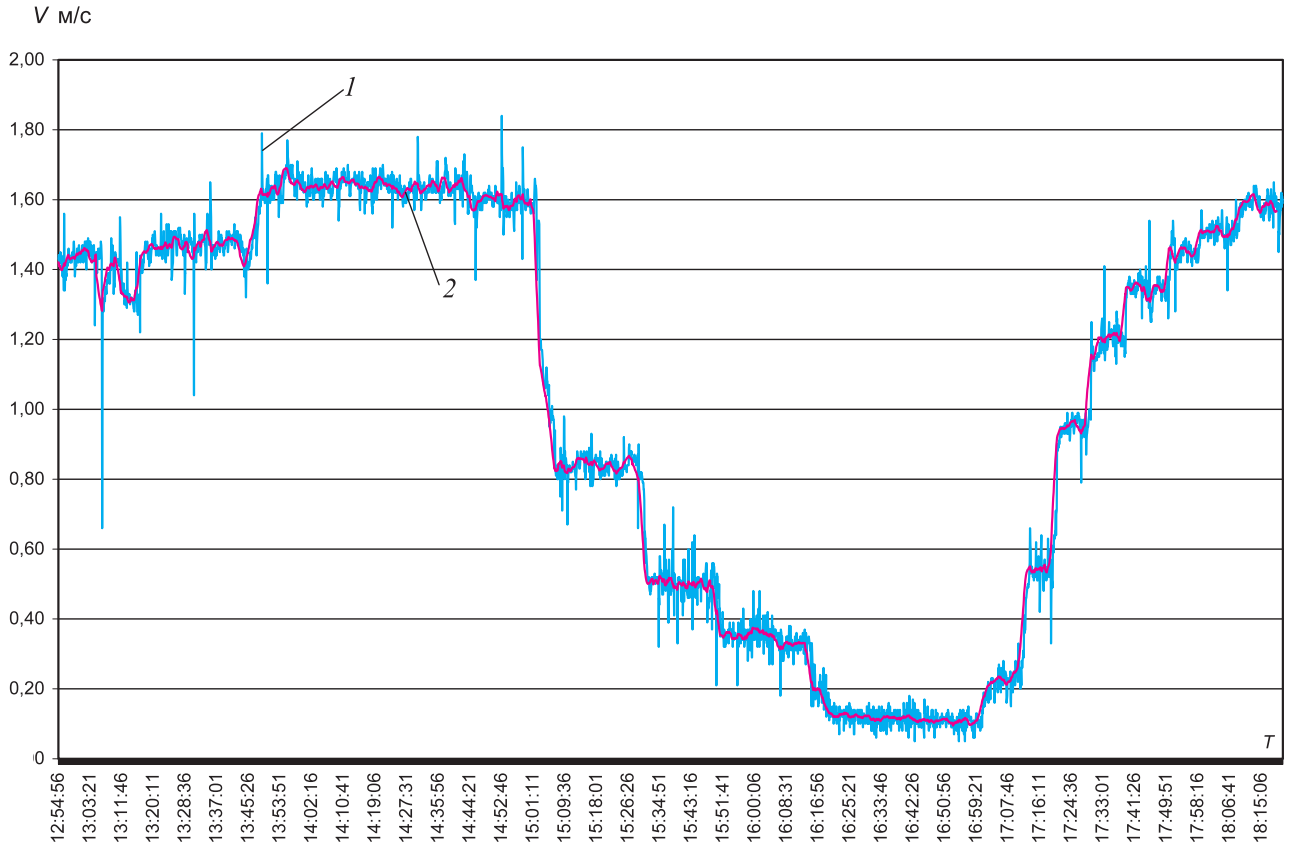



Рис. 3.32. График пульсации скорости потока воды в водоводе диаметром 1200 мм, работающем в различных режимах:
1 — пульсирующая скорость $V_{п}$; 2 — средняя скорость $V_{ср}$

Аппроксимация зависимости $\lambda = f(Re)$ выполнялась методом нелинейного регрессионного анализа с помощью интегрированной системы статистического анализа и обработки данных STATISTICA на ПЭВМ. Среди возможных нелинейных аппроксимирующих функций в качестве оптимальной на основании табл. 3.18 выбрана модель

$$\lambda_p = a + \left(\frac{b}{Re}\right)^{1,5}, \qquad (3.12)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, выборочные оценки которых составляют $a$ = 0,06 и $b$ = 40000,

или

$$\lambda_p = 0,06 + \left(\frac{40000}{Re}\right)^{1,5}. \qquad (3.13)$$

Таблица 3.18

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f\,(Re)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bRe$ | 2. $\lambda = a + b/Re$ | 3. $\lambda = a + (b/Re)^n$ | 4. $\lambda = ae^{b/Re} + c$ | 5. $\lambda = a + b \ln Re$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0{,}151$<br>$b = -6{,}53\cdot10^{-8}$ | $a = 0{,}0456$<br>$b = 22659$ | $a = 0{,}06$<br>$b = 40000$<br>$n = 1{,}5$ | $a = 160{,}575$<br>$b = 141{,}041$<br>$c = -160{,}53$ | $a = 0{,}787$<br>$b = -0{,}516$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,033397 | 0,0142909 | 0,011351 | 0,0142909 | 0,025570 |
| Коэффициент корреляции, *R* | 0,706 | 0,954 | 0,971 | 0,954 | 0,848 |

Доверительный интервал (рис. 3.33) для линии регрессии (3.12) рассчитывался в предположении нормального распределения остатков регрессии. С учетом этого предположения для доверительных границ регрессии можно записать следующие выражения:

$$\lambda_в = \lambda_p + K_p\sigma\,; \quad \lambda_н = \lambda_p - K_p\sigma\,, \tag{3.14}$$

где $\lambda_в$ и $\lambda_н$ — верхняя и нижняя доверительные границы соответственно;

$K_p$ — доверительный множитель для заданной доверительной вероятности $P$ (для $P = 0{,}95$ $K_p = 1{,}96$);

$\sigma$ — стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение фактических значений $\lambda$ от $\lambda_p$).

Выборочная оценка стандартной ошибки регрессии составляет $\sigma = 0{,}011$.

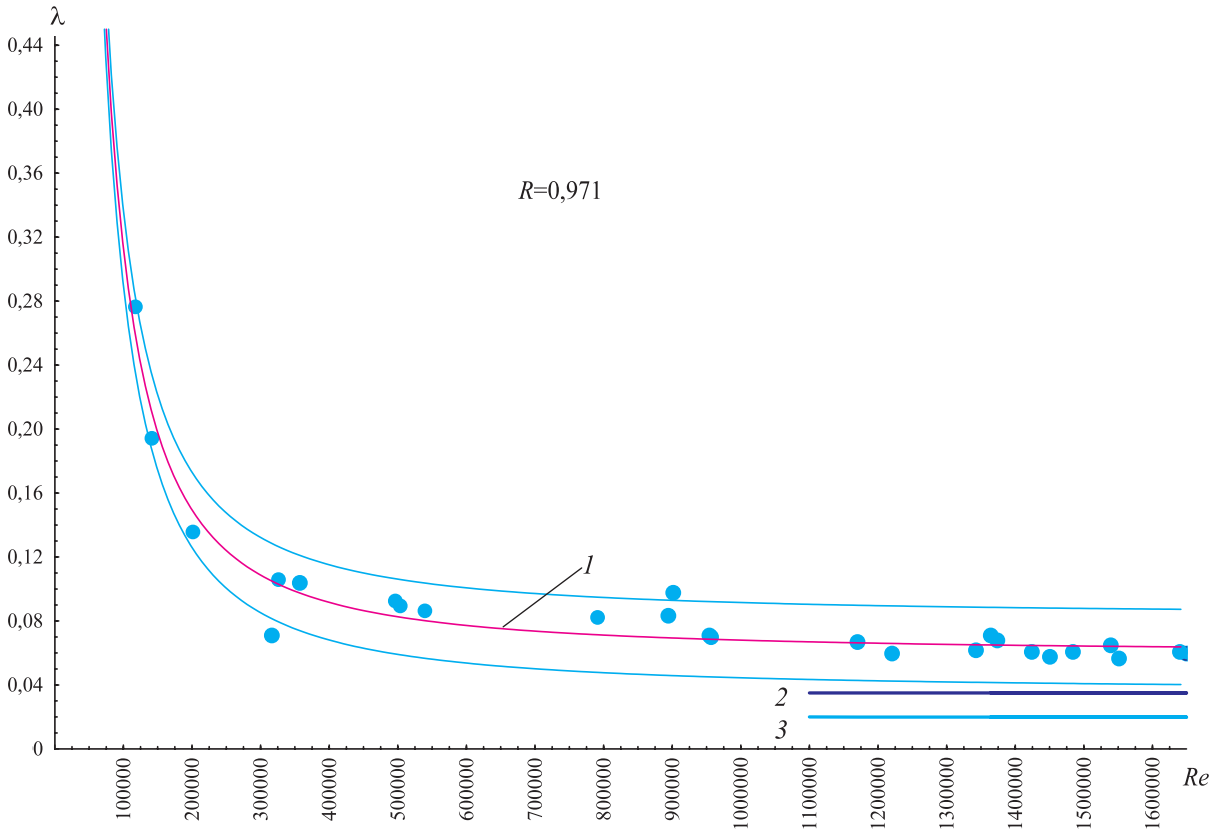



Рис. 3.33. Регрессионная зависимость $\lambda = f\,(Re)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % (водовод диаметром 1200 мм; $L$ = 14 902 м):
*1* — по формуле (3.13); *2* — по Альтшулю; *3* — по Шевелеву

Наглядное представление о необходимости использования наших результатов экспериментальных исследований гидравлических сопротивлений водоводов и их обобщение в виде зависимости (3.12) дает построение зависимости гидравлического уклона от средней скорости потока в водоводе диаметром 1200 мм, длиной 14 902 м. Следует отметить, что водоводы такого диаметра широко применяются при групповом водоснабжении городов и в системах водоснабжения городов с населением свыше 500 тыс. человек.

Под гидравлическим уклоном понимается, как обычно, $i = \dfrac{\lambda V^2}{2gd}$, где $d$ — диаметр трубы, м; $g$ — ускорение силы тяжести; $i$ — гидравлический уклон, равный $H/L$ ($H$ — потери напора, м; $L$ — длина водовода, м).

Аппроксимация зависимости гидравлического уклона от средней скорости в водоводе также производилась по методу нелинейного регрессионного анализа с помощью интегрированной системы статобработки и анализа данных STATISTICA. Среди возможных видов нелинейности на основании табл. 3.19 выбрана модель

$$i_p = aV^2 + bV^{0,5}, \qquad (3.15)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии;

$V$ — средняя скорость потока, м/с.

Таблица 3.19

**Характеристики регрессионной зависимости $i = f(V)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $i = a + bV$ | 2. $i = ae^{cV}$ | 3. $i = aV^n$ | 4. $i = a + bV + cV^2$ | 5. $i = aV^2 + b\sqrt{V}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,00446<br>$b$ = −0,001 | $a$ = 0,000596<br>$b$ = 1,526 | $a$ = 0,003<br>$n$ = 1,58 | $a$ = −0,0002135<br>$b$ = 0,00179<br>$c$ = 0,0015 | $a$ = 0,00241<br>$b$ = 0,000461 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0012403 | 0,0014277 | 0,00083205 | 0,00085485 | 0,00083205 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,986 | 0,981 | 0,993 | 0,993 | 0,993 |

Несмотря на то что модели 3 и 5 имеют одинаковые коэффициенты корреляции $R$ = 0,993 и ошибки регрессии σ = 0,00083, выбрана модель 5, как наиболее точно описывающая результаты опытов при малых скоростях потока.

Таким образом, для гидравлического уклона получена зависимость

$$i_p = 0,00241V^2 + 0,000461V^{0,5}. \qquad (3.16)$$

Построенный график регрессионной зависимости (рис. 3.34) позволяет сделать вывод, что реальная величина гидравлического уклона водовода, находящегося 37 лет в эксплуатации, в 2,5–3 раза больше той, которую можно получить в результате вычислений по таблицам Ф.А. Шевелева.

Исследования парной зависимости $\lambda = f(\bar{\Delta})$, где $\bar{\Delta}$ — относительная макрошероховатость, проводились на основе экспериментальных данных при изменении срока эксплуатации водовода от 4 мес. до 37 лет (рис. 3.35).

Применение нелинейного регрессионного анализа позволило установить, что оптимальной формой нелинейности является модель экспоненциальной зависимости (табл. 3.20)

$$\lambda = a + be^{c\bar{\Delta}}$$

или

$$\lambda = 0,019 + 0,0054e^{132,5\bar{\Delta}}. \qquad (3.17)$$

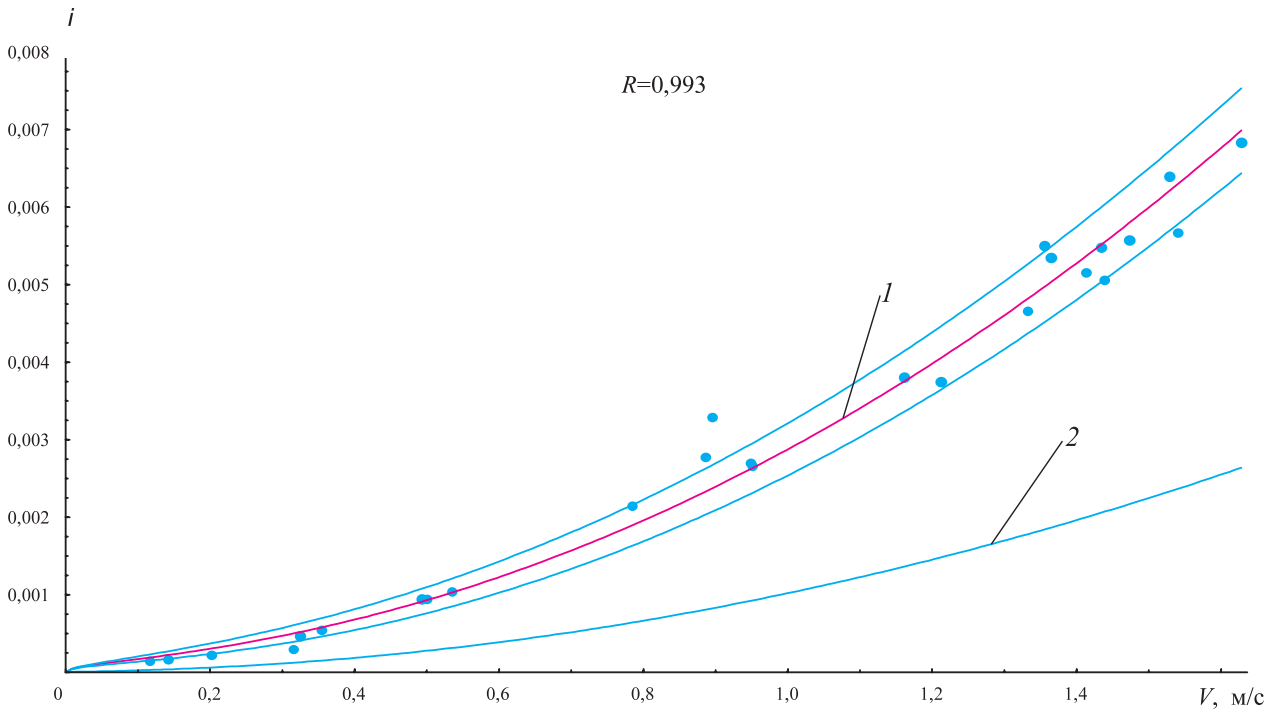



Рис. 3.34. Регрессионная зависимость $i = f(V)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % (водовод диаметром 1200 мм; $L$ = 14 902 м): *1* — по формуле (3.16); *2* — по Шевелеву

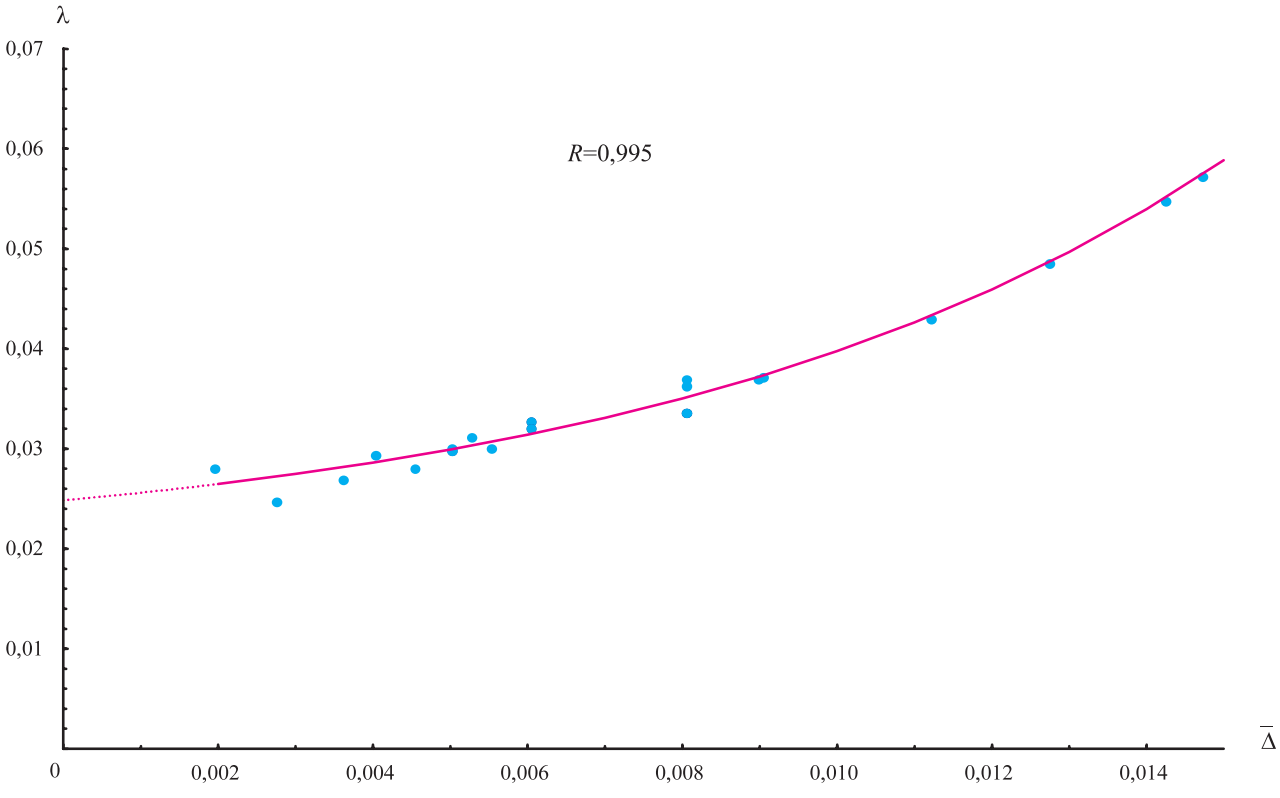



Рис. 3.35. Регрессионная зависимость $\lambda = f(\bar{\Delta})$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % (водовод диаметром 1200 мм; $L$ = 14 902 м)

Таблица 3.20

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(\bar{\Delta})$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + b\bar{\Delta}$ | 2. $\lambda = a + be^{c\Delta}$ | 3. $\lambda = a + b\bar{\Delta}^n$ | 4. $\lambda = a + b\bar{\Delta} + c\bar{\Delta}^2$ | 5. $\lambda = a + b\ln\bar{\Delta}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,0162<br>$b$ = 2,665 | $a$ = 0,019<br>$b$ = 0,0054<br>$c$ = 132,5 | $a$ = 0,0268<br>$b$ = 301,43<br>$n$ = 2,178 | $a$ = 0,027<br>$b$ = −0,268<br>$c$ = 159,0 | $a$ = 0,787<br>$b$ = −0,516 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0026311 | 0,0010742 | 0,00114354 | 0,0142909 | 0,0053349 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,969 | 0,995 | 0,994 | 0,954 | 0,870 |

Учитывая вид нелинейности в парных зависимостях $\lambda = f(Re)$ и $\lambda = f(\bar{\Delta})$, была принята следующая двухфакторная регрессионная модель (рис. 3.36):

$$\lambda_p = \left[0,06 + \left(\frac{40000}{Re}\right)^{1,5}\right] e^{a+b\bar{\Delta}} \qquad (3.18)$$

или

$$\ln\lambda_p = \ln\left[0,06 + \left(\frac{40000}{Re}\right)^{1,5}\right] + a + b\bar{\Delta}, \qquad (3.19)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, оцениваемые с помощью метода множественного регрессионного анализа.

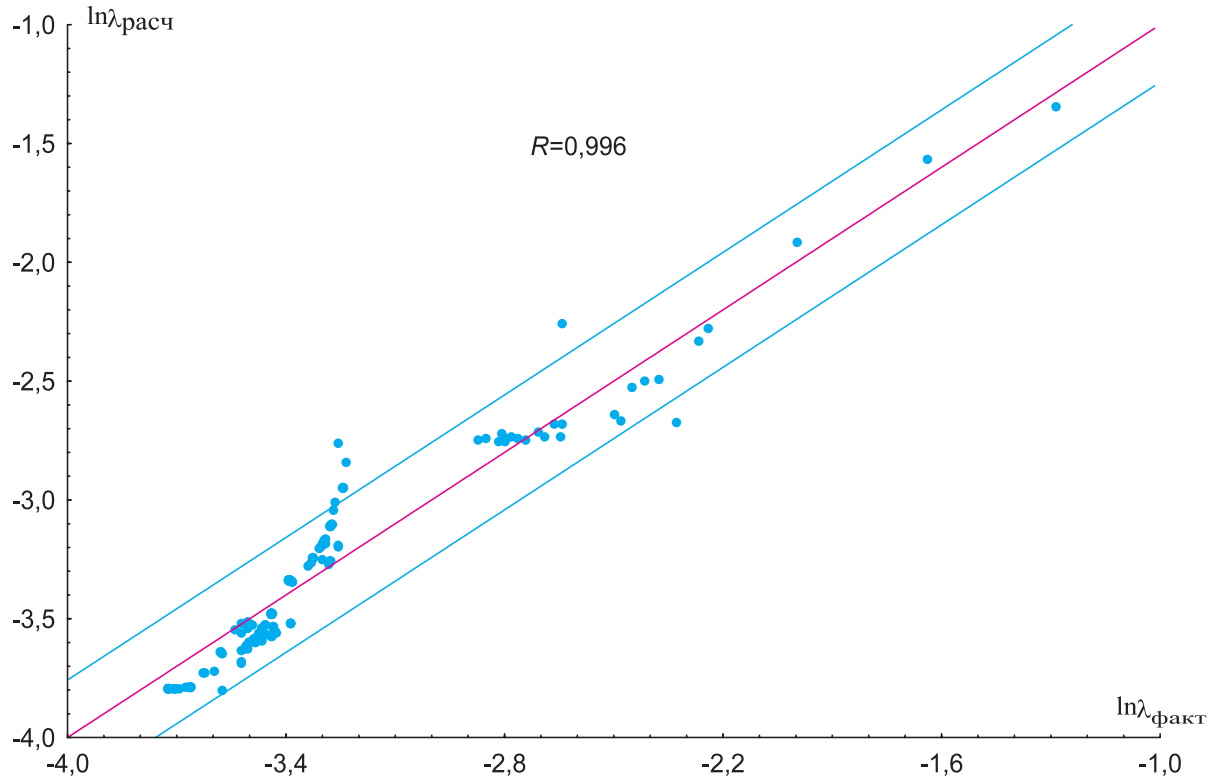



Рис. 3.36. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %

Выборочные оценки коэффициентов регрессии составляют (расчеты выполнялись с помощью системы STATISTICA): $a$ = −1,265; $b$ = 79,58.

Таким образом, двухфакторная регрессионная модель имеет вид

$$\lambda = \left[0{,}06 + \left(\frac{40000}{Re}\right)^{1{,}5}\right] e^{-1{,}265+79{,}58\overline{\Delta}}. \qquad (3.20)$$

Полученная регрессионная зависимость позволяет оценивать гидравлическое сопротивление в магистральных водоводах диаметром 1200 мм с различным сроком эксплуатации в переходных и турбулентных режимах работы ($100000 \le Re \le 1700000$).

Проведено сравнение зависимости $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ после 37 лет эксплуатации водовода с результатами вычислений, выполненных по таблицам Ф.А. Шевелева (рис. 3.37)

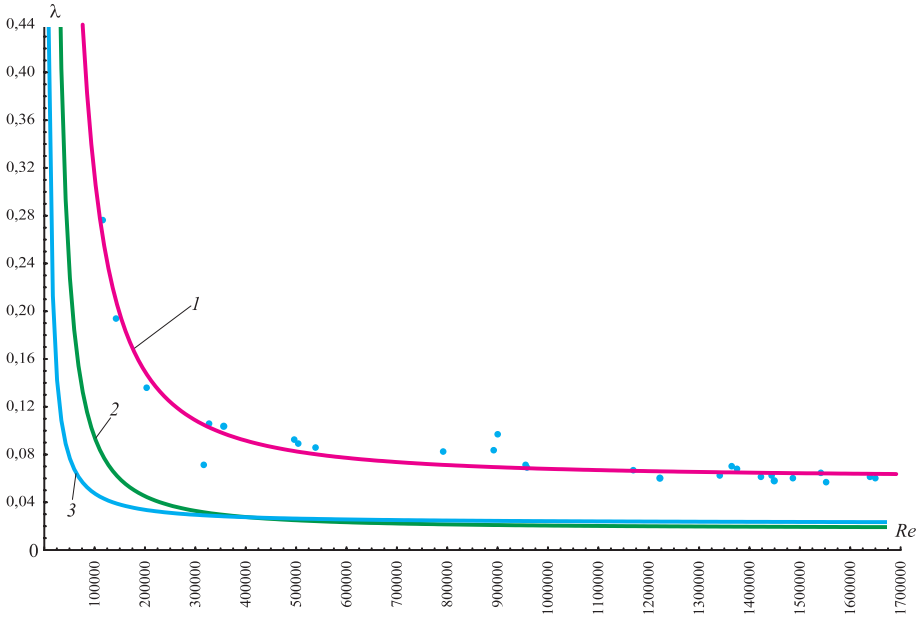



Рис. 3.37. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ (водовод диаметром 1200 мм; $L$ = 14902 м): *1* — по формуле (3.20) при $\overline{\Delta} = 0{,}016$; *2* — по формуле (3.20) при $\overline{\Delta} = 0{,}00084$; *3* — по Шевелеву

Для наглядности представлена зависимость коэффициента λ от времени при фиксированном значении числа Рейнольдса ($Re$ = 1100000). На основе проведенных исследований построена зависимость (рис. 3.38)

$$\lambda = 0{,}01925 + 0{,}00215\sqrt{T}. \qquad (3.21)$$

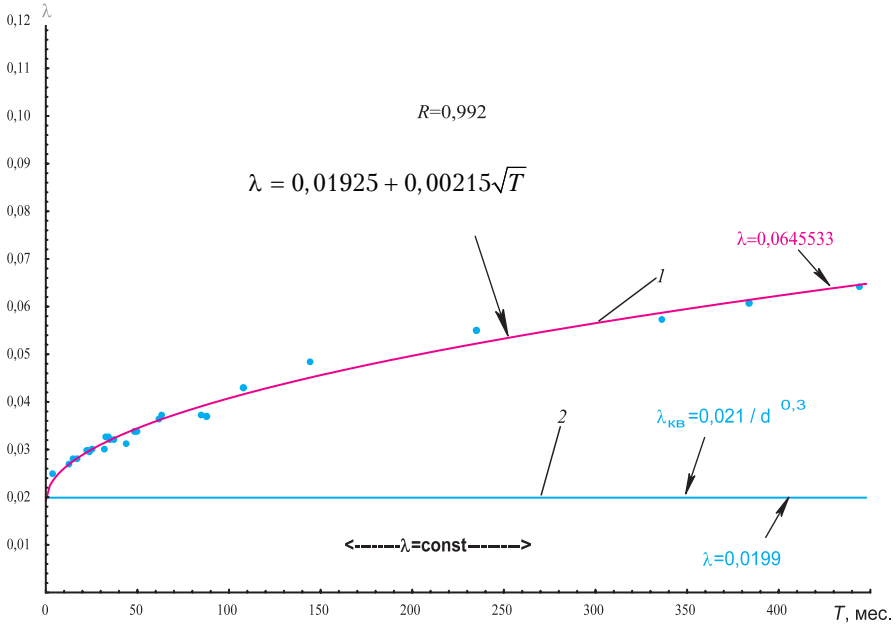



Рис. 3.38. Зависимости $\lambda = f(T)$ для водовода диаметром 1200 мм: *1* — по формуле (3.21); *2* — по Шевелеву

Таблица 3.21

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bT$ | 2. $\lambda = a + be^{c/T}$ | 3. $\lambda = a + bT^n$ | 4. $\lambda = a + bT + cT^2$ | 5. $\lambda = a + b\sqrt{T}$ | 6. $\lambda = a + b \ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0{,}000089$<br>$b = 0{,}0288$ | $a = 0{,}0294$<br>$b = 0{,}0475$<br>$c = -137{,}9$ | $a = 0{,}0196$<br>$b = 0{,}002$<br>$n = 0{,}509$ | $a = 0{,}00258$<br>$b = -0{,}000168$<br>$c = -1{,}94 \cdot 10^{-7}$ | $a = 0{,}01925$<br>$b = 0{,}00215$ | $a = 0{,}000747$<br>$b = 0{,}00925$ |
| Стандартная ошибка, $\sigma$ | 0,008343 | 0,0018708 | 0,0013301 | 0,0013301 | 0,0013301 | 0,003721 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,969 | 0,985 | 0,992 | 0,992 | 0,992 | 0,938 |

Несмотря на то что три модели (3, 4, 5) имеют одинаковые коэффициенты корреляции и одинаковые стандартные ошибки, выбрана модель 5, так как ей соответствует большее число степеней свободы и, следовательно, коэффициент корреляции является более значимым.

Сопоставим эмпирические формулы (3.20) и (3.21) и оценим значение коэффициента $\lambda$ для водовода диаметром 1200 мм со сроком эксплуатации 444 мес. (37 лет) и относительной макрошероховатостью $\bar{\Delta} = 0{,}0159$. При расчете по формуле (3.20) получим

$$\lambda = \left[0{,}06 + \left(\frac{40000}{1100000}\right)^{1{,}5}\right] e^{-1{,}265+79{,}58 \cdot 0{,}0159} = 0{,}066 . \qquad (3.22)$$

При расчете по формуле (3.21)

$$\lambda = 0{,}01925 + 0{,}00215\sqrt{444} = 0{,}0645 . \qquad (3.23)$$

Расхождение между расчетными значениями коэффициента $\lambda$, полученными с использованием формул (3.20), (3.21), составляет 2,57 %. Такое незначительное отличие вполне естественно, поскольку для двух эмпирических формул основой служили одни и те же результаты опытов. Однако они свидетельствуют о качестве выбора двух аппроксимационных связей.

За 444 мес. нахождения водовода в эксплуатации коэффициент $\lambda$ по формуле (3.22) составил 0,066 и вырос с начала эксплуатации водовода в 2,66 раза, в то же время его значение, определенное по формуле Шевелева (3.1) для водопроводных эксплуатируемых труб, составляет 0,0199, т.е. в 3,32 раза меньше полученного фактического значения.

Выполнив незначительные преобразования эмпирической формулы (3.20), приведем ее к виду, более удобному для проведения расчетов:

$$\lambda = \left[0{,}016932 + 2257600\left(\frac{\nu}{Vd}\right)^{1{,}5}\right] e^{79{,}58\bar{\Delta}} . \qquad (3.24)$$

В данном случае безразмерная величина шероховатости определяется по формуле (3.5). Обе эмпирические зависимости являются основой гидравлического расчета водоводов, поскольку с использованием формулы Дарси–Вейсбаха (3.3), представляющей, как отмечено ранее, чисто формальную замену переменных, легко определить расход через водовод

$$Q = \sqrt{\frac{1{,}232gHd^5}{\lambda l}} \qquad (3.25)$$

теперь уже с учетом режима течения, определяемого числом Рейнольдса, и зависимости относительной шероховатости от времени эксплуатации. В формуле (3.25) $H$, как обычно, означает гидравлические потери трения водовода.

Расчетные значения коэффициента λ, полученные из уравнений (3.22) — (3.24):

по формуле (3.22) — 0,0662;

по формуле (3.23) — 0,0645;

по формуле (3.24)

при $Re$ = 1 100 000 — 0,0662;

процент расхождения между значениями λ:

по (3.22) и (3.24) — -0,088;

по (3.23) и (3.24) — -2,57.

Таким образом, расхождения, полученные для зависимостей $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$, $\lambda = f(T)$ по формулам (3.22)–(3.24), вполне удовлетворяют практическому применению уравнения (3.24) не только для проектирования водоводов, но и для экспертной оценки пропускной способности водовода (3.25) при подготовке его к санации.

### 3.2.6. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ $\lambda = f(Re)$ И $\lambda = f(\overline{\Delta})$ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1400 ММ И ПОСТРОЕНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$

Проведены опытные исследования коэффициента гидравлического сопротивления водовода диаметром 1400 мм, находящегося в эксплуатации 34 года (длина участка 14 973 м). Результаты исследований, в частности характер пульсации скорости, позволили сделать вывод: чем больше инкрустация в водоводе, тем выше интенсивность пульсации скорости в нем (рис. 3.39).

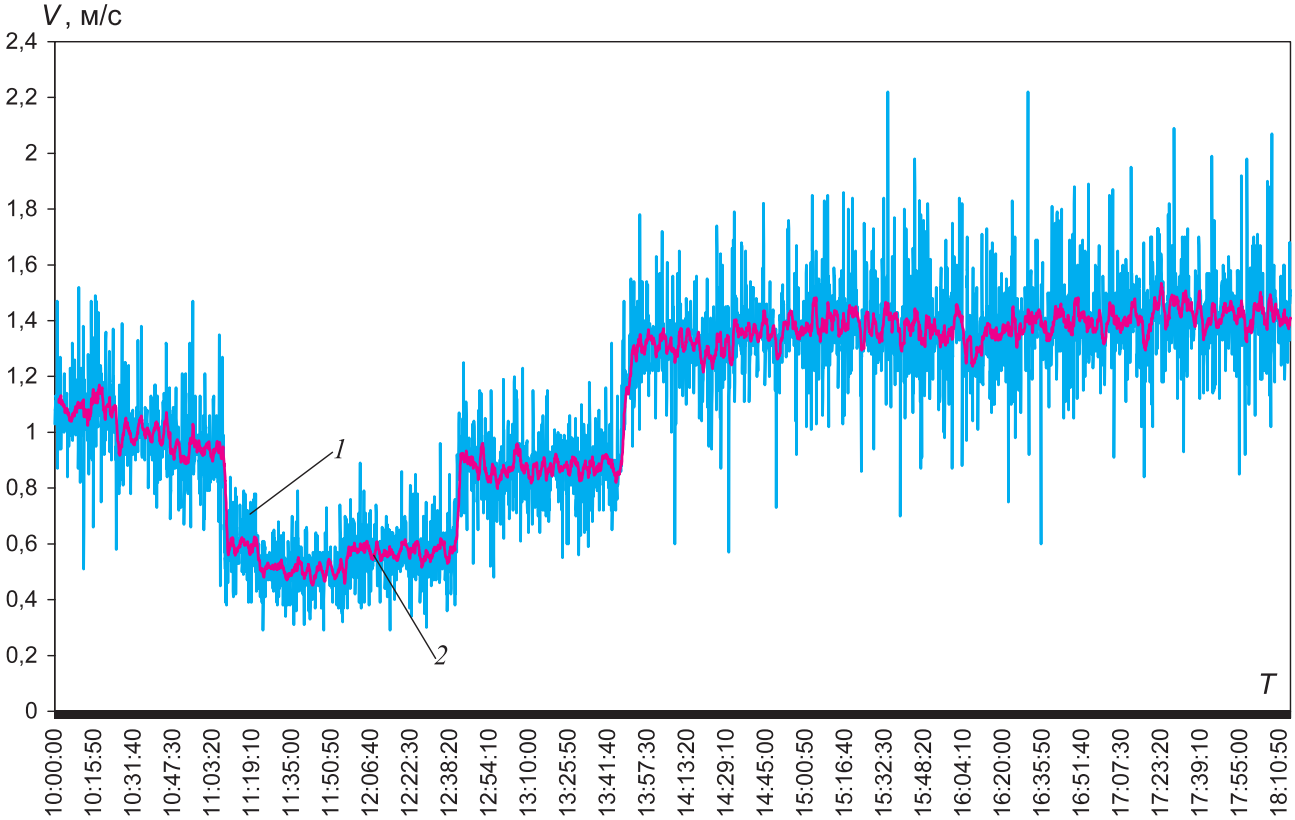



Рис. 3.39. График пульсации скорости потока воды в водоводе диаметром 1400 мм, работающем в различных режимах:
1 — пульсирующая скорость $V_п$; 2 — средняя скорость $V_{ср}$

Измерение скорости и расхода воды осуществлялось так же, как и для водовода диаметром 1200 мм — с помощью ультразвукового накладного расходомера типа UFM 610 р. См. главу 2 (рис. 2.1 и 2.4).

На основании анализа результатов (табл. 3.22) среди возможных нелинейных аппроксимирующих функций выбрана модель

$$\lambda_p = a + \left(\frac{b}{Re}\right)^{1,5}, \qquad (3.26)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, выборочные оценки которых составляют $a = 0{,}058$ и $b = 46500$,

$$\lambda_p = 0{,}058 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}. \qquad (3.27)$$

Таблица 3.22

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(Re)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bRe$ | 2. $\lambda = a + b/Re$ | 3. $\lambda = a + (b/Re)^n$ | 4. $\lambda = ae^{b/Re} + c$ | 5. $\lambda = a + b \ln Re$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0{,}07767$<br>$b = -8{,}47 \cdot 10^{-8}$ | $a = 0{,}05397$<br>$b = 14138{,}7$ | $a = 0{,}058$<br>$b = 46500$<br>$n = 1{,}5$ | $a = 0{,}001463$<br>$b = 1509120$<br>$c = 0{,}059$ | $a = 0{,}23555$<br>$b = -0{,}0120$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,002519 | 0,001218 | 0,00114 | 0,001528 | 0,001848 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,846 | 0,966 | 0,971 | 0,946 | 0,921 |

Доверительный интервал для линии регрессии (3.26) рассчитывался так же, как и для водовода диаметром 1200, в предположении нормального распределения остатков регрессии по формулам (3.14).

Поскольку для водовода диаметром 1400 мм (КВС, водовод №4) получена очень низкая стандартная ошибка регрессии, то на графике регрессионной зависимости $\lambda = f(Re)$ (рис. 3.40) доверительный интервал не 95, а 99 % ($P = 0{,}99$; $K_p = 3$). Выборочная оценка стандартной ошибки регрессии составляет $\sigma = 0{,}00114$.

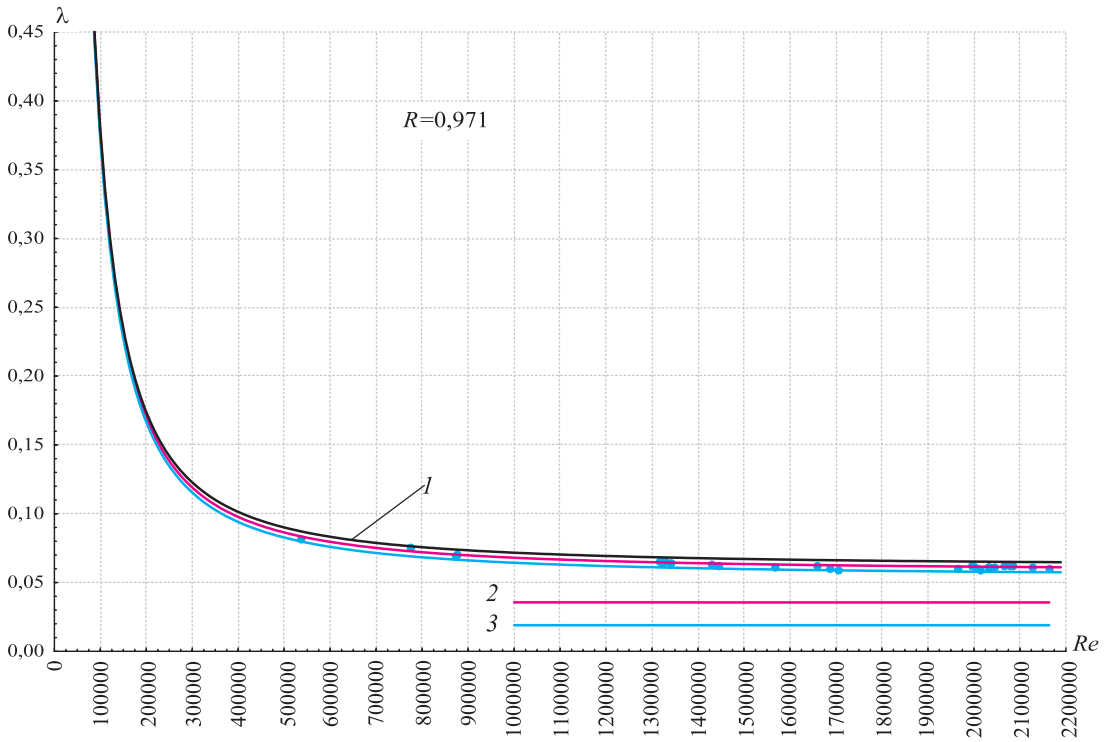



Рис. 3.40. Регрессионная зависимость $\lambda = f(Re)$ с доверительным интервалом регрессии $P = 99$ % (водовод диаметром 1400 мм; $L = 14973$ м): *1* — по формуле (3.27); *2* — по Альтшулю; *3* — по Шевелеву

Дополнительно исследовалась зависимость экспериментально измеренных значений гидравлического уклона от скорости движения воды в водоводе (рис. 3.41). Аппроксимация этой зависимости также выполнялась методом нелинейного регрессионного анализа с помощью пакета STATISTICA. Среди возможных видов нелинейности на основании данных табл. 3.23 в качестве оптимальной выбрана модель

$$i_p = aV^2 + bV^{0,5}, \qquad (3.28)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии.

Таблица 3.23

**Характеристики регрессионной зависимости $i = f(V)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $i = a + bV$ | 2. $i = ae^{bV}$ | 3. $i = aV^n$ | 4. $i = a + bV + cV^2$ | 5. $i = aV^2 + b\sqrt{V}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = -0{,}0016$<br>$b = 0{,}00412$ | $a = 0{,}000356$<br>$b = 1{,}813$ | $a = 0{,}0023$<br>$n = 1{,}898$ | $a = 0{,}000138$<br>$b = -0{,}00005$<br>$c = 0{,}0022$ | $a = 0{,}00213$<br>$b = 0{,}0001652$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,000205 | 0,00011864 | 0,0000629 | 0,00005883 | 0,00005883 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,987 | 0,996 | 0,999 | 0,999 | 0,999 |

Модели 4 и 5 имеют одинаковые коэффициенты корреляции и ошибки регрессии, однако в качестве оптимальной выбрана модель 5. Она характеризуется бóльшим числом степеней свободы, чем модель 4, и, следовательно, коэффициент корреляции для нее является более значимым.

Выборочные оценки коэффициентов регрессионной зависимости (3.28), график которой показан на рис. 3.41, составляют: $a = 0{,}00213$; $b = 0{,}0001652$ для значений $V$, м/с, т.е.

$$i_p = 0{,}00213V^2 + 0{,}0001652V^{0,5}. \qquad (3.29)$$

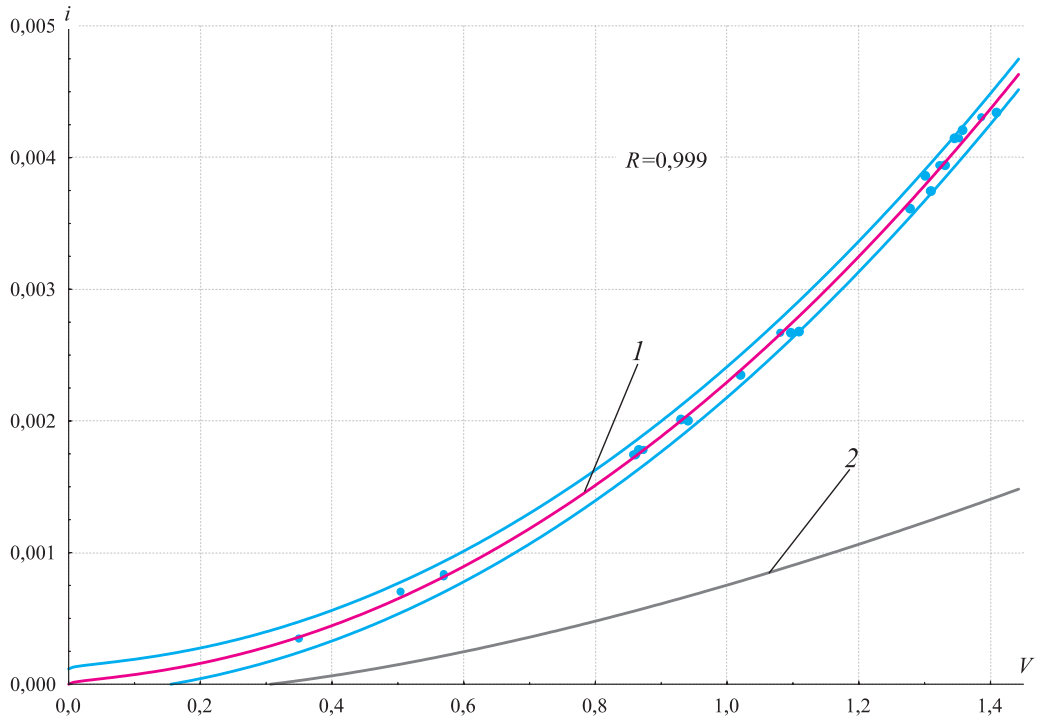



Рис. 3.41. Регрессионная зависимость $i = f(V)$ с доверительным интервалом регрессии $P = 95$ % (водовод диаметром 1400 мм; $L = 14\,973$ м):
*1* — по формуле (3.29); *2* — по Шевелеву

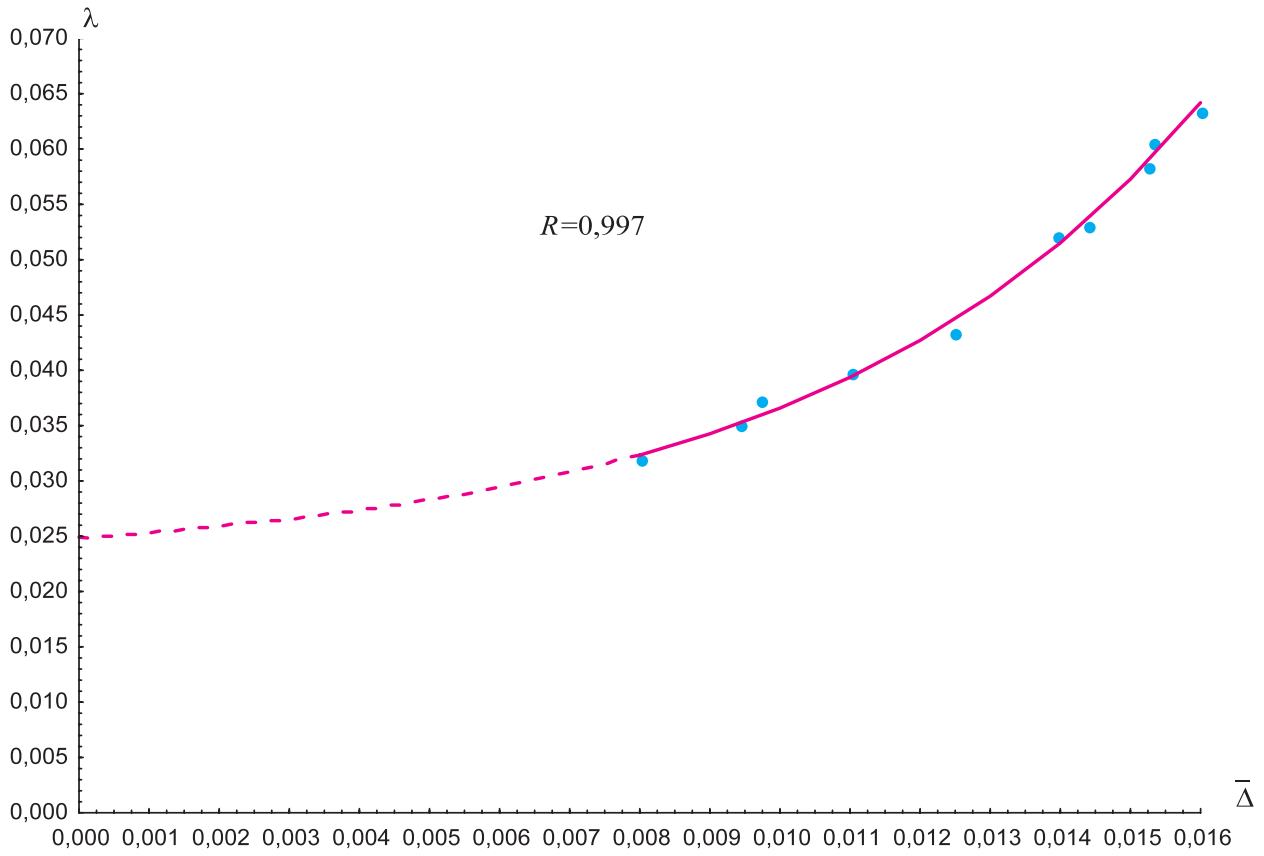



Рис. 3.42. Регрессионная зависимость $\lambda = f(\overline{\Delta})$
с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %
(водовод диаметром 1400 мм; $L$ = 14 973 м)

Исследования парной зависимости $\lambda = f(\overline{\Delta})$ проводили на основе экспериментальных данных при изменении срока эксплуатации водовода от 1 года 10 мес. до 35 лет (рис. 3.42).

Применение нелинейного регрессионного анализа позволило установить, что более предпочтительной является модель 2 экспоненциальной зависимости (табл. 3.24), т.е.

$$\lambda = 0,0227 + 0,00225e^{182,1\overline{\Delta}}. \qquad (3.30)$$

Таблица 3.24

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(\overline{\Delta})$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + b\overline{\Delta}$ | 2. $\lambda = a + be^{c\Delta}$ | 3. $\lambda = a + b\overline{\Delta}^n$ | 4. $\lambda = a + b\overline{\Delta} + c\overline{\Delta}^2$ | 5. $\lambda = a + b \ln \overline{\Delta}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = −0,002843<br>$b$ = 4,0122 | $a$ = 0,0227<br>$b$ = 0,00225<br>$c$ = 182,1 | $a$ = 0,028891<br>$b$ = 25785,68<br>$n$ = 3,266 | $a$ = 0,4559<br>$b$ = −4,35976<br>$c$ = 343,45 | $a$ = 0,25311<br>$b$ = 0,04668 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,002049 | 0,00088 | 0,000893 | 0,0009444 | 0,0028774 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,984 | 0,997 | 0,997 | 0,997 | 0,968 |

Учитывая вид нелинейности в парных зависимостях $\lambda = f(Re)$ и $\lambda = f(\bar{\Delta})$, принята двухфакторная регрессионная модель

$$\lambda_p = \left[0{,}058 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1{,}5}\right] e^{a+b\bar{\Delta}} \qquad (3.31)$$

или

$$\ln \lambda_p = \ln\left[0{,}058 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1{,}5}\right] + a + b\bar{\Delta}, \qquad (3.32)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, оцениваемые с помощью метода множественного регрессионного анализа.

Построена диаграмма рассеяния для двухфакторной регрессионной зависимости с доверительным интервалом 95 % для величины ln λ (рис. 3.43).

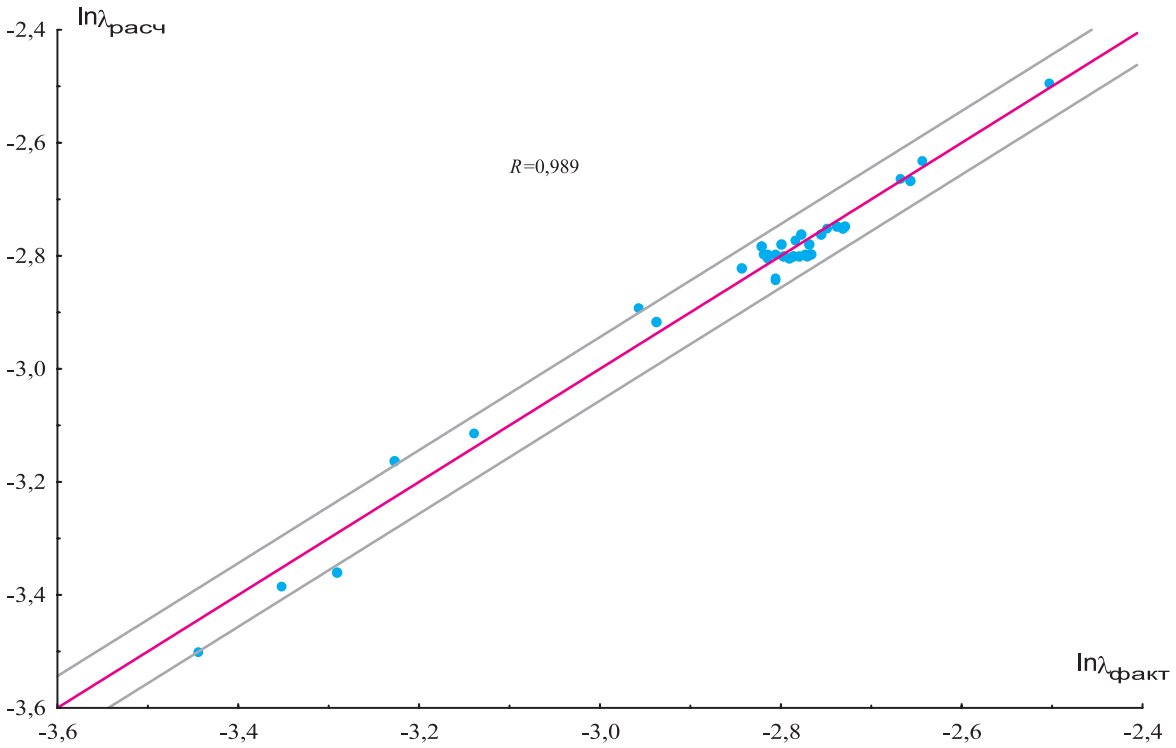



Рис. 3.43. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %

Выборочные оценки коэффициентов регрессии составляют: $a$ = −1,49; $b$ = 92,64 (расчеты также выполнялись с помощью интегрированной системы статистической обработки данных STATISTICA).

Таким образом, двухфакторная регрессионная модель имеет вид

$$\lambda = \left[0{,}058 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1{,}5}\right] e^{-1{,}49+92{,}64\bar{\Delta}}. \qquad (3.33)$$

Построен график двухфакторной регрессионной зависимости (рис. 3.44). Число Рейнольдса в испытаниях водовода диаметром 1400 мм изменялось в диапазоне $500000 \le Re \le 2200000$.

Для проверки правильности выбранной двухфакторной модели зависимости $\lambda = f(T)$ были дополнительно проведены исследования на водоводе, находящемся в эксплуатации 420 мес., т.е. 35 лет (рис. 3.45).

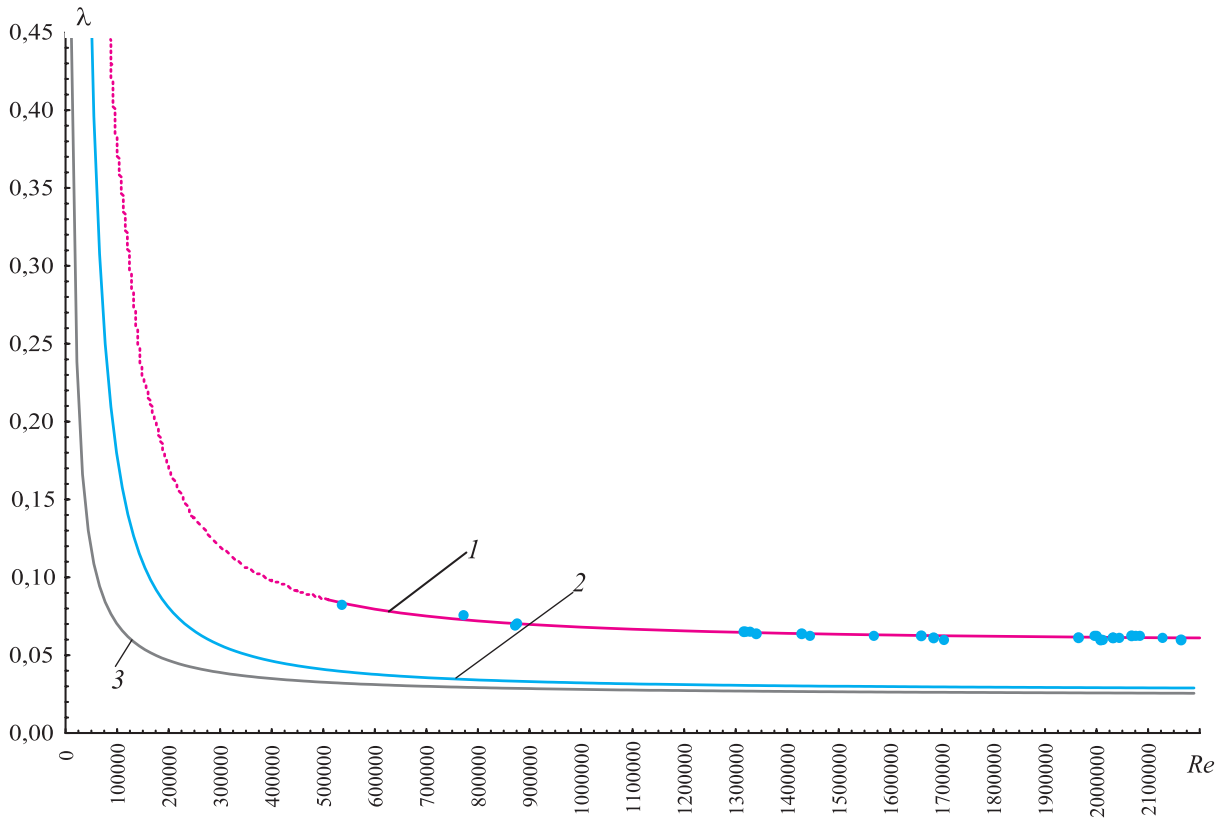



Рис. 3.44. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ для водовода диаметром 1400 мм ($L$ = 14 973 м): *1* — по формуле (3.33) при $\overline{\Delta} = 0,0159742$; *2* — по формуле (3.33) при $\overline{\Delta} = 0,0080229$; *3* — по Шевелеву

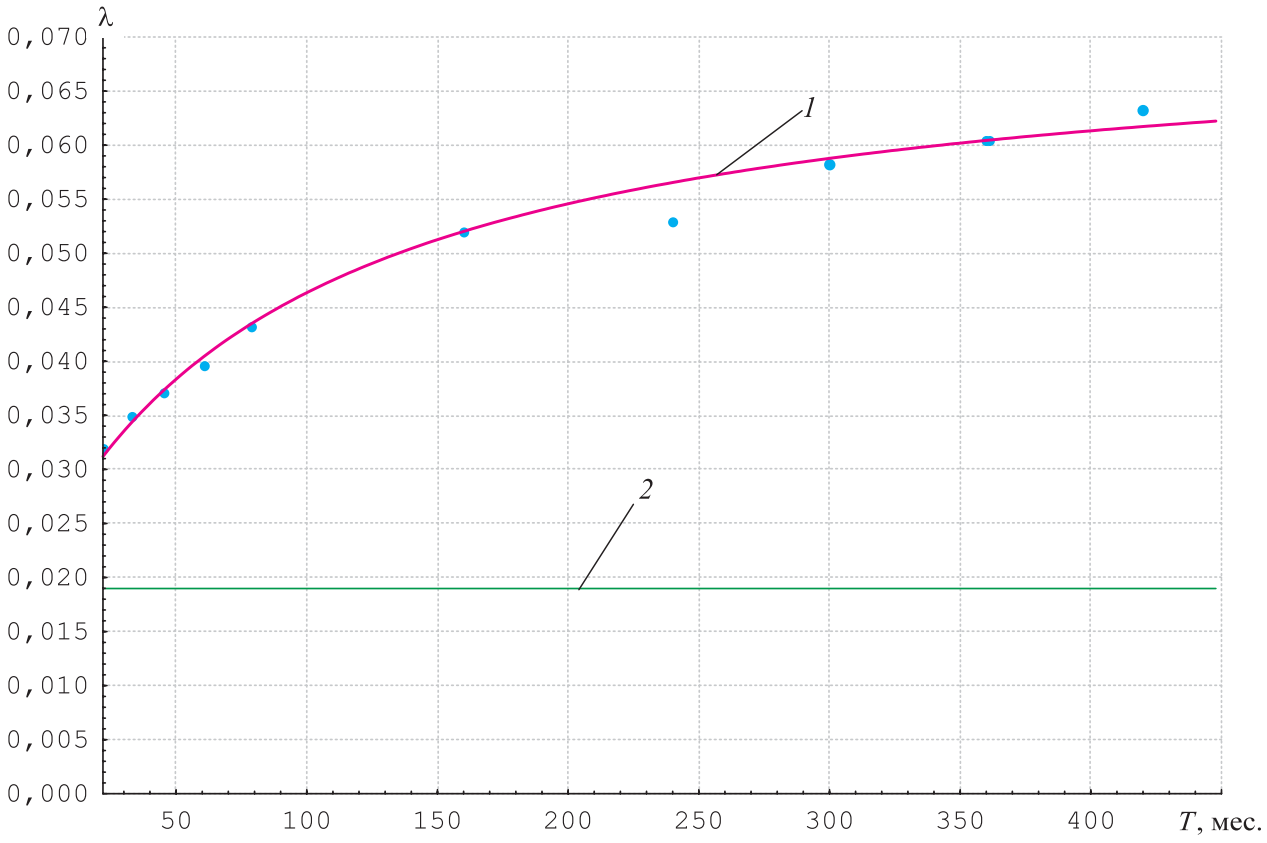



Рис. 3.45. Сравнение зависимостей $\lambda = f(T)$, построенных по формулам: *1* — (3.34); *2* — (3.1) Ф.А. Шевелева

При определении зависимости $\lambda = f(T)$ фиксировалось число Рейнольдса. Сравнение с формулой Ф.А. Шевелева (3.1) показывает, что коэффициент в числителе не может быть постоянным и должен быть связан со временем эксплуатации водовода, что подтверждается данными, представленными на рис. 3.45. Для водовода диаметром 1400 (1396) мм в данном случае

$$\lambda = \frac{0,0487T}{T + 108,8} + 0,023\ , \qquad (3.34)$$

где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.

Данная модель выбрана на основании табл. 3.25. Несмотря на то, что модели 3 и 6 имеют одинаковые коэффициенты корреляции и одинаковые стандартные ошибки, в качестве оптимальной принята модель 3, так как она в большей степени соответствует физической природе исследуемого процесса. Так, при $T \to 0$ модель 6 приводит к абсурдному результату: $\lambda \to -\infty$.

Таблица 3.25

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(T)$ для водовода диаметром 1400 мм (КВС, измерительный участок № 6)**

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bT$ | 2. $\lambda = a + be^{c/T}$ | 3. $\lambda = bT/(T + c) + a$ | 4. $\lambda = a + bT + cT^2$ | 5. $\lambda = a + \frac{b}{\sqrt{T}}$ | 6. $\lambda = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0,03464$<br>$b = 0,00007$ | $a = 0,0227$<br>$b = 0,04144$<br>$c = -46,9$ | $a = 0,023$<br>$b = 0,0487$<br>$c = 108,8$ | $a = 0,041243$<br>$b = 0,145873$<br>$c = 2,5 \cdot 10^{-9}$ | $a = 0,02463$<br>$b = 0,00191$ | $a = -0,00861$<br>$b = 0,01064$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0027019 | 0,002569 | 0,001265 | 0,006042 | 0,001378 | 0,001265 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,972 | 0,975 | 0,994 | 0,850 | 0,993 | 0,994 |

Сопоставим (3.33) и (3.34) и оценим значение коэффициента λ для водовода диаметром 1400 мм со сроком эксплуатации 420 мес. и относительной макрошероховатостью $\overline{\Delta} = 0,01597$. При расчете по формуле (3.33) получим

$$\lambda = \left[0,058 + \left(\frac{46500}{1100000}\right)^{1,5}\right] e^{-1,49+92,64 \cdot 0,01597} = 0,0656. \qquad (3.35)$$

При расчете по формуле (3.34)

$$\lambda = \frac{0,0487 \cdot 420}{420 + 108,8} + 0,023 = 0,0617. \qquad (3.36)$$

Результаты расчетов по формулам (3.33) и (3.34) показывают расхождение расчетных значений коэффициента λ 5,9 %, что подтверждает правильность выбранных аппроксимаций.

За 420 мес. нахождения водовода в эксплуатации коэффициент λ по формуле (3.35) составил 0,0656 и вырос с начала эксплуатации водовода в 2,06 раза, в то же время коэффициент λ, рассчитанный по формуле Ф.А. Шевелева (3.1) для эксплуатируемых длительное время труб, должен составлять 0,0189, т.е. в 3,45 раза меньше полученного фактического значения коэффициента гидравлического сопротивления.

Выполнив простые преобразования, из (3.33) получим

$$\lambda = \left[0,0131 + 2260000\left(\frac{\nu}{Vd}\right)^{1,5}\right] e^{92,64\overline{\Delta}}. \qquad (3.37)$$

Расчетные значения коэффициента λ, вычисленные по уравнениям (3.35) — (3.37):
по формуле (3.35) — 0,0656;
по формуле (3.36) — 0,0617;
по формуле (3.37)
при $Re$ = 1 100 000 — 0,0655;
процент расхождения между значениями λ:
по (3.35) и (3.37) — -0,09;
по (3.36) и (3.37) — 5,84.

Как видно из этого сопоставления, расхождения, полученные для зависимостей $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$, $\lambda = f(T)$ по формулам (3.35)–(3.37) вполне удовлетворяют практическому применению уравнения (3.37) не только для проектирования водоводов, но и для экспертной оценки пропускной способности водовода по формуле (3.25) при установлении сроков санации.

### 3.2.7. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ $\lambda = f(Re)$ И $\lambda = f(\overline{\Delta})$ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1600 ММ И ПОСТРОЕНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $\lambda = f(Re;\ \overline{\Delta})$

Для водовода диаметром 1600 мм аппроксимация зависимости $\lambda = f(Re)$ проводилась так же, как для водоводов диаметром 1200 и 1400 мм. Более предпочтительной оказалась модель 3 (табл. 3.26):

$$\lambda_p = a + \left(\frac{b}{Re}\right)^{1,5}, \qquad (3.38)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, выборочные оценки которых составляют 0,055 и 46500 соответственно,

или

$$\lambda_p = 0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}. \qquad (3.39)$$

Таблица 3.26

**Характеристики регрессионной зависимости λ = f(Re)**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bRe$ | 2. $\lambda = a + b/Re$ | 3. $\lambda = a + (b/Re)^n$ | 4. $\lambda = ae^{b/Re} + c$ | 5. $\lambda = a + b\ln Re$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,06627<br>$b$ = −3,7·10$^{-9}$ | $a$ = 0,05669<br>$b$ = 11620,89 | $a$ = 0,055<br>$b$ = 46500<br>$n$ = 1,5 | $a$ = 130,954<br>$b$ = 88,735<br>$c$ = −130,902 | $a$ = 0,1564<br>$b$ = −0,00674 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0017277 | 0,001648 | 0,001630 | 0,0016477 | 0,0016852 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,624 | 0,667 | 0,675 | 0,667 | 0,647 |

Построен график регрессионной зависимости $\lambda_p = f(Re)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % (рис. 3.46).

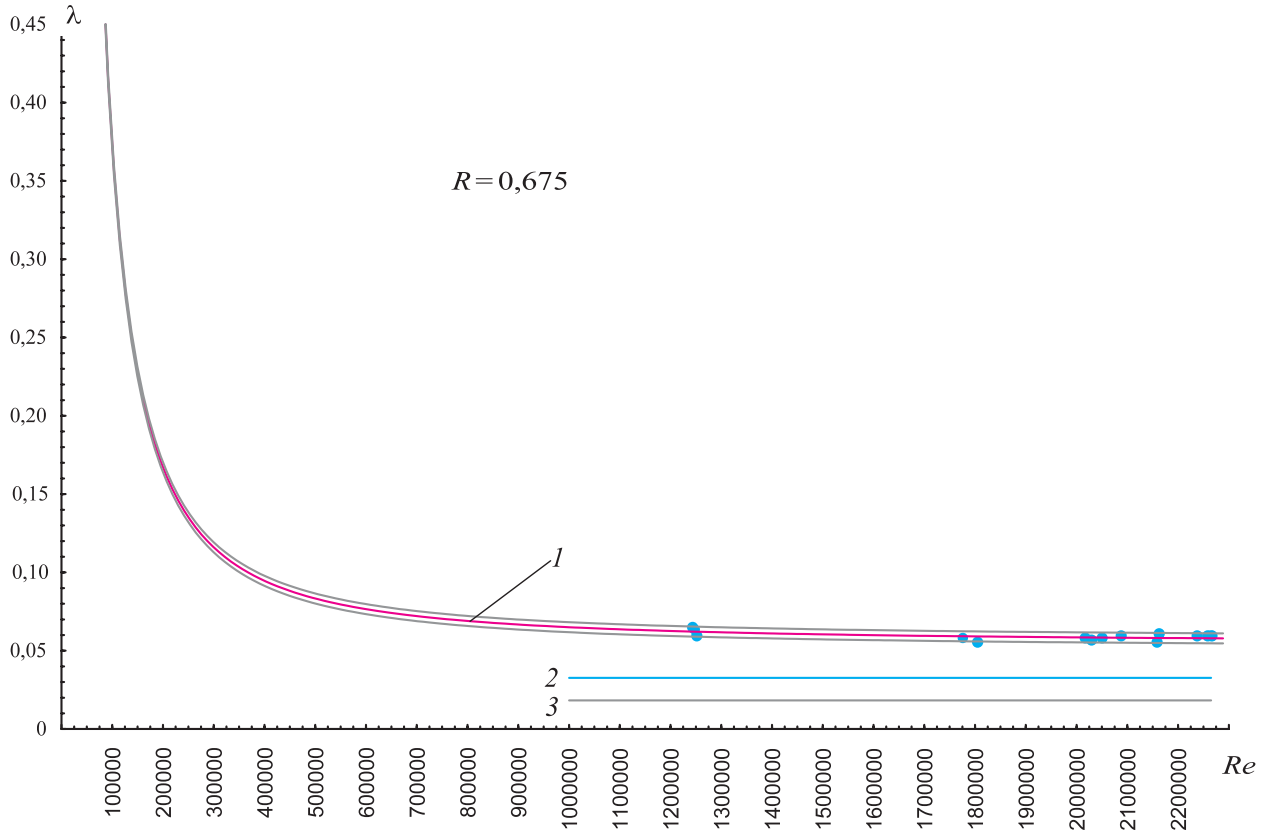



Рис. 3.46. Регрессионная зависимость $\lambda = f(Re)$ с доверительным интервалом регрессии P = 95 % для водовода диаметром 1600 мм (L = 6 558 м):
*1* — по формуле (3.39); *2* — по Альтшулю; *3* — по Шевелеву

Доверительный интервал для линии регрессии (3.38) рассчитывался в предположении нормального распределения остатков регрессии. С учетом этого предположения для доверительных границ регрессии можно записать следующие выражения:

$$\lambda_{в} = \lambda_p + K_p\sigma\,; \quad \lambda_{н} = \lambda_p - K_p\sigma\,, \tag{3.40}$$

где $\lambda_{в}$ и $\lambda_{н}$ — верхняя и нижняя доверительные границы соответственно;

$K_p$ — доверительный множитель для заданной доверительной вероятности $P$ (для $P$ = 0,95 $K_p$ = 1,96);

$\sigma$ — стандартная ошибка регрессии (среднеквадратическое отклонение фактических значений $\lambda$ от $\lambda_p$).

Выборочная оценка стандартной ошибки регрессии составляет $\sigma = 0,0163$ .

В связи с тем, что значение коэффициента корреляции $R$ = 0,675 значительно ниже, чем для аналогичных регрессионных моделей при исследованиях водоводов диаметром 1200 и 1400 мм, дополнительно определялась значимость коэффициента корреляции по критерию Стьюдента [286], которое выполнялось по формуле

$$t = \frac{R}{\sqrt{1-R^2}}\sqrt{f}, \tag{3.41}$$

где $f = N - 2$ — число степеней свободы ($N$=21 — количество точек наблюдений).

Подставив в (3.41) значения $R$ = 0,675 и $f$ = 21−2 = 19, получим оценку $t$ = 3,99. Сравнение рассчитанного значения $t$-статистики с табличным значением распределения Стьюдента $t_{f;\alpha}$, при заданном уровне значимости $\alpha = 0,01$ (доверительная вероятность $P$ = 0,99) и числе степеней свободы $f$ = 19; $t_{f;\alpha}$ = 2,54, показало, что $t \geq t_{f;\alpha}$. Таким образом, с вероятностью 99 % можно утверждать, что коэффициент корреляции является значимым.

Дополнительно исследовалась зависимость экспериментально измеренных значений гидравлического уклона $i$ от скорости движения воды в водоводе диаметром 1600 мм (рис. 3.47). Трубы такого диаметра используются при групповом водоснабжении городов и в системах водоснабжения городов с населением свыше 1 млн человек. Среди возможных видов нелинейности на основании табл. 3.27 выбрана модель

$$i_p = aV^2 + bV^{0,5}, \tag{3.42}$$

где $a$ и $b$ — оцениваемые коэффициенты регрессии.

Несмотря на то, что модели 4 и 5 имеют одинаковые коэффициенты корреляции, выбрана модель 5, так как она более адекватно описывает поведение $i = f(V)$ при малых расходах воды. Выборочная оценка стандартной ошибки регрессии $\sigma = 0{,}000082$.

Построен график регрессионной зависимости $i = f(V)$ (рис. 3.47).

Таблица 3.27

**Характеристики регрессионной зависимости $i = f(V)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $i = a + bV$ | 2. $i = ae^{bV}$ | 3. $i = aV^n$ | $i = a + bV + cV^2$ | 5. $i = aV^2 + b\sqrt{V}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = -0{,}0022$<br>$b = 0{,}00422$ | $a = 0{,}000395$<br>$b = 1{,}578$ | $a = 0{,}00191$<br>$n = 1{,}922$ | $a = 0{,}000402$<br>$b = -0{,}000533$<br>$c = 0{,}002036$ | $a = 0{,}001784$<br>$b = 0{,}0001316$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0001237 | 0,00010747 | 0,0000834 | 0,00008154753 | 0,000082462 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,993 | 0,994 | 0,994 | 0,997 | 0,997 |

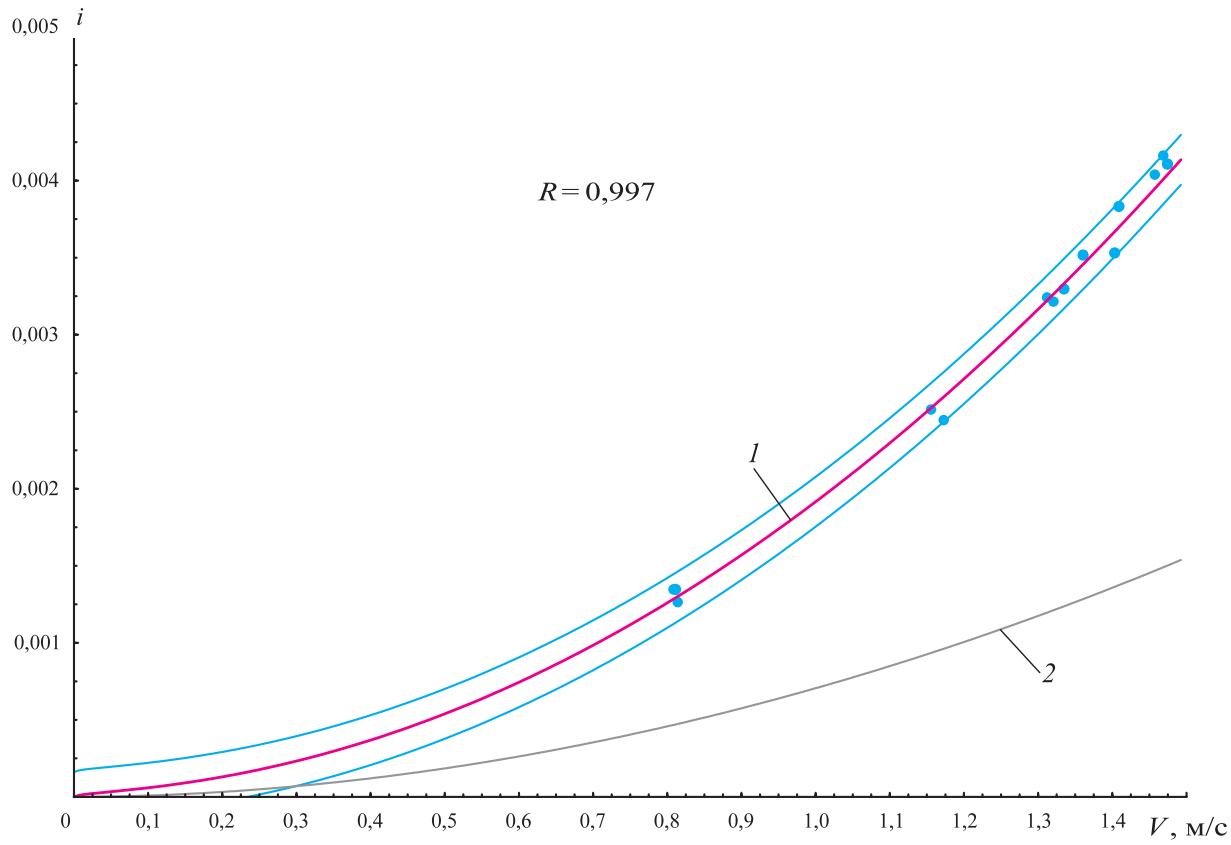



Рис. 3.47. Регрессионная зависимость $i=f(V)$ для водовода диаметром 1600 мм; L = 6558 м с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %: *1* — по формуле (3.43); *2* — по Шевелеву

Выборочные оценки коэффициентов регрессионной зависимости (3.42) составляют: $a$ = 0,001784; $b$ = 0,0001316, или

$$i_p = 0,001784V^2 + 0,0001316V^{0,5}. \qquad (3.43)$$

Зависимость $\lambda = f(\overline{\Delta})$ определялась на основе экспериментальных данных, полученных при эксплуатации водовода продолжительностью от 2 мес. до 33 лет (рис. 3.48).

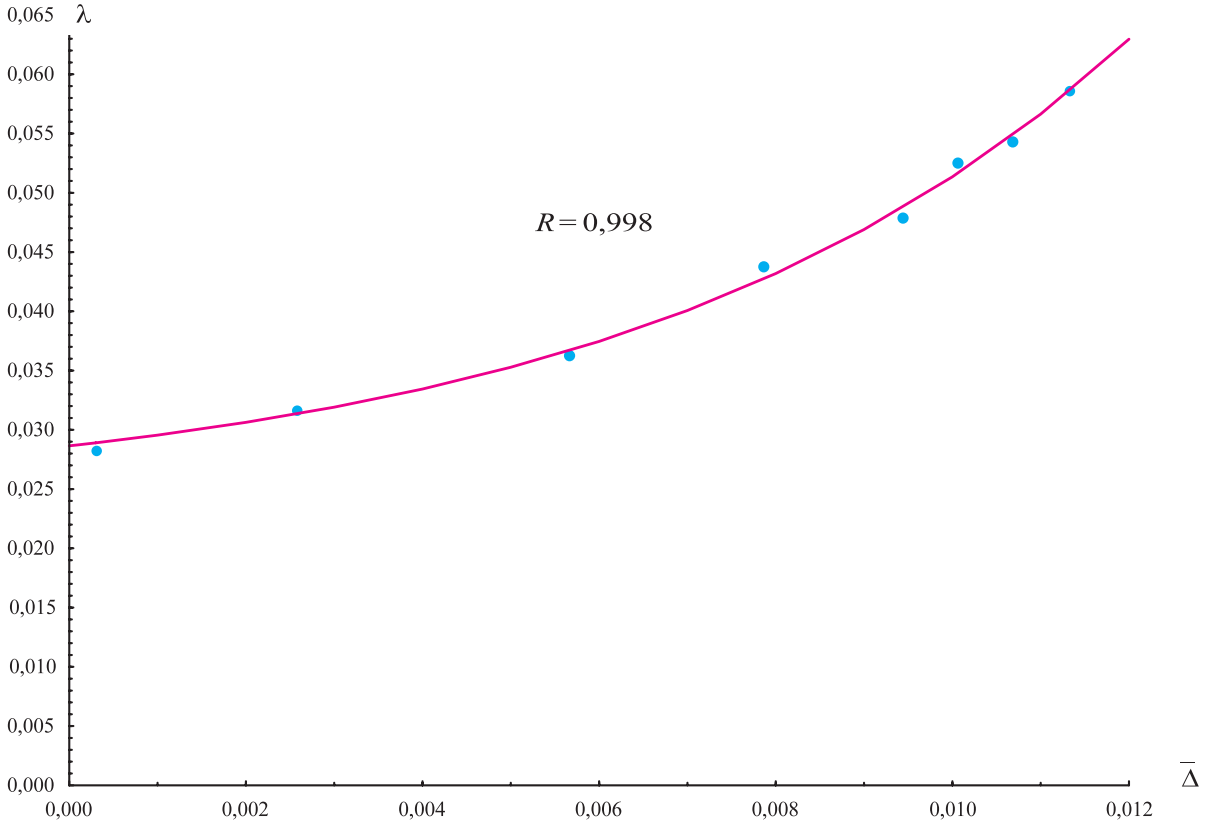



Рис. 3.48. Регрессионная зависимость $\lambda = f(\overline{\Delta})$ для водовода диаметром 1600 мм; $L$ = 6558 м с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %

Применение нелинейного регрессионного анализа позволило установить, что оптимальной формой нелинейности является модель экспоненциальной зависимости $\lambda = a + be^{c\overline{\Delta}}$ (табл. 3.28)

или $$\lambda = 0,024 + 0,00465e^{177,1\overline{\Delta}}. \qquad (3.44)$$

С учетом вида нелинейности в парных зависимостях $\lambda = f(Re)$ и $\lambda = f(\overline{\Delta})$ принята двухфакторная регрессионная модель

$$\lambda_p = \left[0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right] e^{a+b\overline{\Delta}} \qquad (3.45)$$

или $$\ln \lambda_p = \ln\left[0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right] + a + b\overline{\Delta}, \qquad (3.46)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, оцениваемые с помощью метода множественного регрессионного анализа.

Таблица 3.28

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(\bar{\Delta})$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + b\bar{\Delta}$ | 2. $\lambda = a + be^{c\Delta}$ | 3. $\lambda = a + b\bar{\Delta}^n$ | 4. $\lambda = a + b\bar{\Delta} + c\bar{\Delta}^2$ | 5. $\lambda = a + b\ln\bar{\Delta}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = −0,002471<br>$b$ = 2,6866 | $a$ = 0,024<br>$b$ = 0,0465<br>$c$ = 177,1 | $a$ = 0,0297<br>$b$ = 308,33<br>$n$ = 2,07 | $a$ = 0,0288<br>$b$ = −0,006<br>$c$ = 209,083 | $a$ = 0,084<br>$b$ = 0,007532 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0025185 | 0,00073387 | 0,00091807 | 0,00085356 | 0,00625642 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,974 | 0,998 | 0,997 | 0,997 | 0,827 |

Построена диаграмма рассеяния для двухфакторной регрессионной зависимости с доверительным интервалом 95 % для величины lnλ (рис. 3.49)

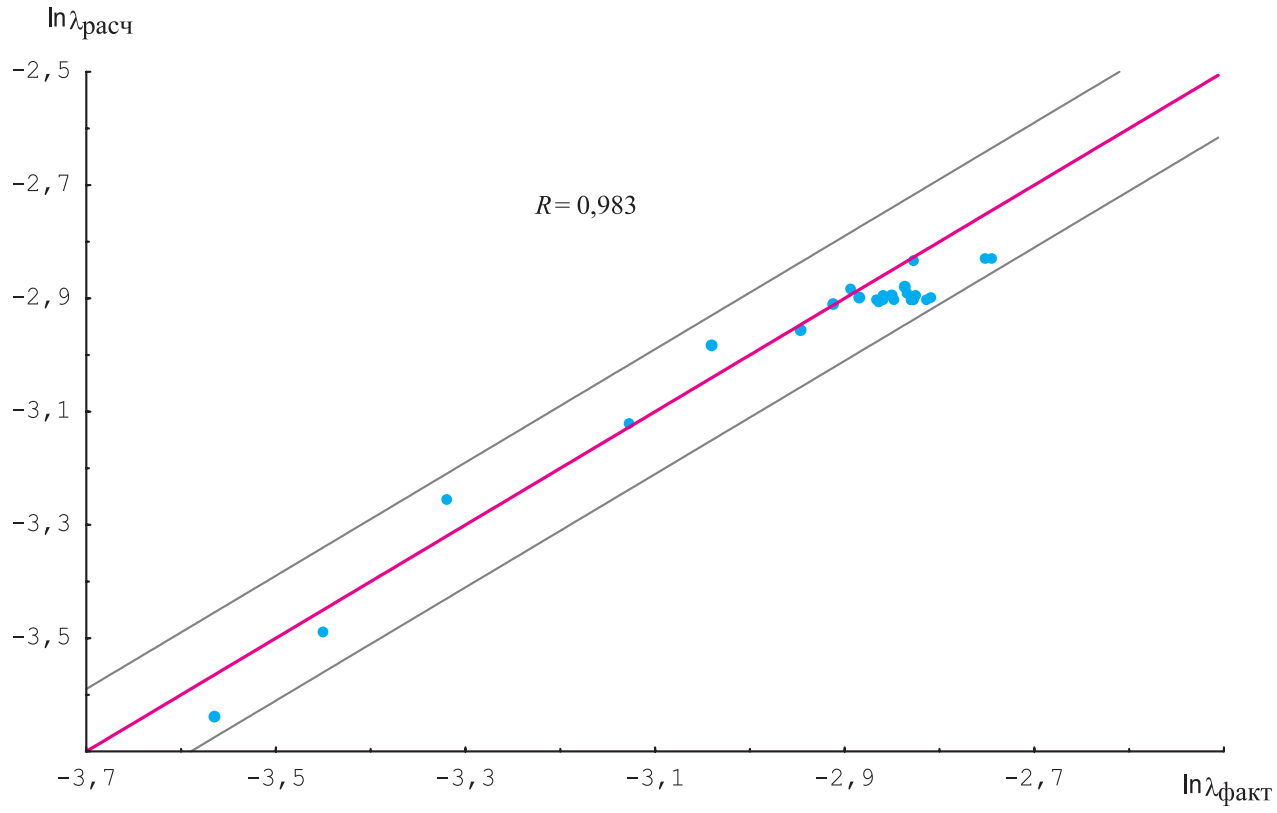



Рис. 3.49. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$ для водовода диаметром 1600 мм; $L$ = 6558 м с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %

Выборочные оценки коэффициентов регрессии составляют $a$ = −0,87; $b$ = 72,74. Таким образом, двухфакторная регрессионная модель имеет вид

$$\lambda = \left[0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right] e^{-0,87+72,74\bar{\Delta}}. \qquad (3.47)$$

Полученная зависимость позволяет оценивать гидравлическое сопротивление в магистральных водоводах диаметром 1600 мм с различным сроком эксплуатации в переходных и турбулентных режимах работы (рис. 3.50).

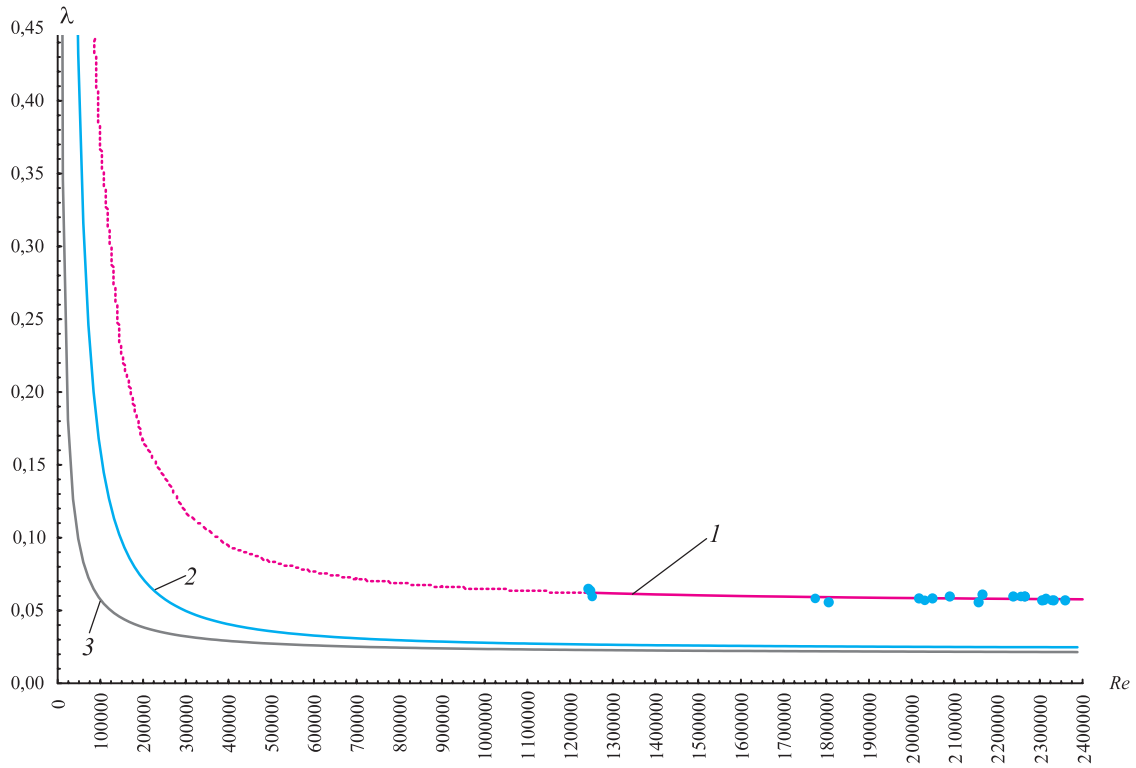



Рис. 3.50. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ для водовода диаметром 1600 мм; $L$ = 6558 м: *1* — по формуле (3.47) при $\overline{\Delta} = 0,0113208$; *2* — по формуле (3.47) при $\overline{\Delta} = 0,0003145$; *3* — по Шевелеву

По результатам исследований зависимости $\lambda = f(T)$ на водоводе диаметром 1600 мм, находящемся в эксплуатации 33 года (396 месяцев), построен график (рис. 3.51).

Данные результатов исследований сравниваются с вычислениями по формуле (3.1) Ф.А. Шевелева.

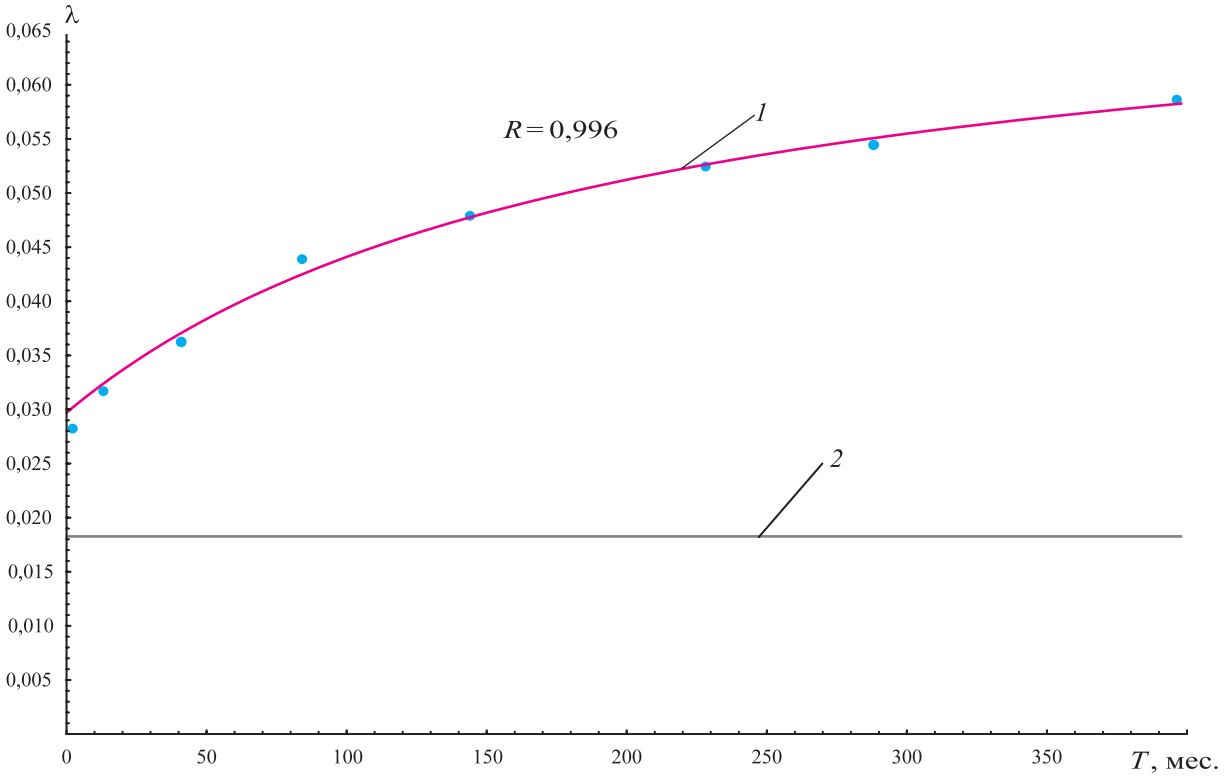



Рис. 3.51. Сравнение зависимостей $\lambda = f(T)$ для водовода диаметром 1600 мм; L = 6558 м, построенных по формулам: *1* — (3.48); *2* — (3.1) Ф.А. Шевелева

Вполне удовлетворительной аппроксимацией полученной зависимости является

$$\lambda = \frac{0,0426T}{196,49 + T} + 0,0297\,, \qquad (3.48)$$

где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.

Таблица 3.29

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bT$ | 2. $\lambda = a + be^{c/T}$ | 3. $\lambda = bT/(T + c) + a$ | 4. $\lambda = a + bT + cT^2$ | 5. $\lambda = a + b\sqrt{T}$ | 6. $\lambda = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,03311<br>$b$ = 0,000074 | $a$ = 0,0297<br>$b$ = 0,03240<br>$c$ = −72,24 | $a$ = 0,0297<br>$b$ = 0,0426<br>$c$ = 196,49 | $a$ = 0,00299<br>$b$ = 0,000149<br>$c$ = $2,0 \cdot 10^{-7}$ | $a$ = 0,02636<br>$b$ = 0,0168 | $a$ = −0,0195<br>$b$ = 0,00589 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,003523 | 0,001363 | 0,000996 | 0,001590 | 0,001164 | 0,003385 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,948 | 0,992 | 0,996 | 0,990 | 0,994 | 0,952 |

В качестве оптимальной выбрана модель 3 (табл. 3.29), так как ей соответствует максимальный коэффициент корреляции.

Сопоставим (3.47) и (3.48) и оценим значение коэффициента λ для водовода диаметром 1600 мм со сроком эксплуатации 396 месяцев (33 года) и относительной макрошероховатостью $\bar{\Delta} = 0,01132$. При расчете по формуле (3.47)

$$\lambda = \left[0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right] e^{-0,87+72,74 \cdot 0,01132} = 0,0608. \qquad (3.49)$$

При расчете по формуле (3.48)

$$\lambda = \frac{0,0426 \cdot 396}{396 + 196,49} + 0,0297 = 0,0582\,. \qquad (3.50)$$

Расхождение расчетных значений коэффициента λ составляет 4,23 %, что вполне удовлетворяет условиям экспериментальных исследований.

За 396 мес. нахождения водовода в эксплуатации коэффициент λ, рассчитанный по формуле (3.49), составил 0,0608 и вырос с начала эксплуатации водовода в 2,15 раза. В то же время по формуле Ф.А. Шевелева (3.1) для водопроводных труб, длительное время находящихся в эксплуатации, коэффициент λ должен составлять 0,0183, т.е. оказывается в 3,3 раза меньше фактического значения.

Выполнив незначительные преобразования эмпирической формулы (3.47), приведем ее к виду, более удобному для проведения расчетов,

$$\lambda = \left[0,023042 + 4200909\left(\frac{\nu}{Vd}\right)^{1,5}\right] e^{72,74\bar{\Delta}}\,. \qquad (3.51)$$

Расчетные значения коэффициента λ, вычисленные по уравнениям (3.49) — (3.51):
по формуле (3.49) — 0,0608;
по формуле (3.50) — 0,0582;
по формуле (3.51)
при $Re$ = 1 100 000 — 0,0607;
процент расхождения между значениями λ:
по (3.49) и (3.51) — -0,11;
по (3.50) и (3.51) — 4,13.

Как видно из этого сопоставления, расхождения в оценках, полученных для величины λ при расчетах по формулам (3.49) — (3.51), незначительны, что позволяет использовать формулу (3.51) для практического применения как для проектирования водоводов, так и для экспертной оценки их пропускной способности (подстановкой λ в формулу (3.25)) при определении сроков его санации.

### 3.2.8. ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРНЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ $\lambda = f(Re)$ И $\lambda = f(\bar{\Delta})$ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1400 ММ (ИСТОЧНИК ВОДЫ — РЕКА ДНЕПР) И ПОСТРОЕНИЕ ДВУХФАКТОРНОЙ РЕГРЕССИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ $\lambda = f(Re;\ \bar{\Delta})$

Необходимость этих исследований вызвана тем, что по составу вода Днепра отличается от воды Северского Донца.

Характер пульсации скорости потока воды в исследуемом водоводе на Харьков из канала «Днепр–Донбасс» после 16 лет его эксплуатации уже был рассмотрен (рис. 3.31).

Среди возможных нелинейных аппроксимирующих функций на основании табл. 3.30 выбрана модель

$$\lambda_p = a + \left(\frac{b}{Re}\right)^{1,5}, \qquad (3.52)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, выборочные оценки которых составляют 0,052 и 46500 соответственно,

или

$$\lambda_p = 0,052 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}. \qquad (3.53)$$

Таблица 3.30

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(Re)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bRe$ | 2. $\lambda = a + b/Re$ | 3. $\lambda = a + (b/Re)^n$ | 4. $\lambda = ae^{b/Re} + c$ | 5. $\lambda = a + b\ln Re$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,255<br>$b = -1,69\cdot10^{-7}$ | $a$ = 0,0081246<br>$b$ = 41196,7 | $a$ = 0,052<br>$b$ = 46500<br>$n$ = 1,5 | $a$ = 0,1257<br>$b$ = 132502<br>$c$ = −0,0868 | $a$ = 1,82258<br>$b$ = −0,1282 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,109193 | 0,02884 | 0,01911 | 0,019115 | 0,073694 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,614 | 0,978 | 0,993 | 0,993 | 0,846 |

Построен график регрессионной зависимости (рис. 3.52).

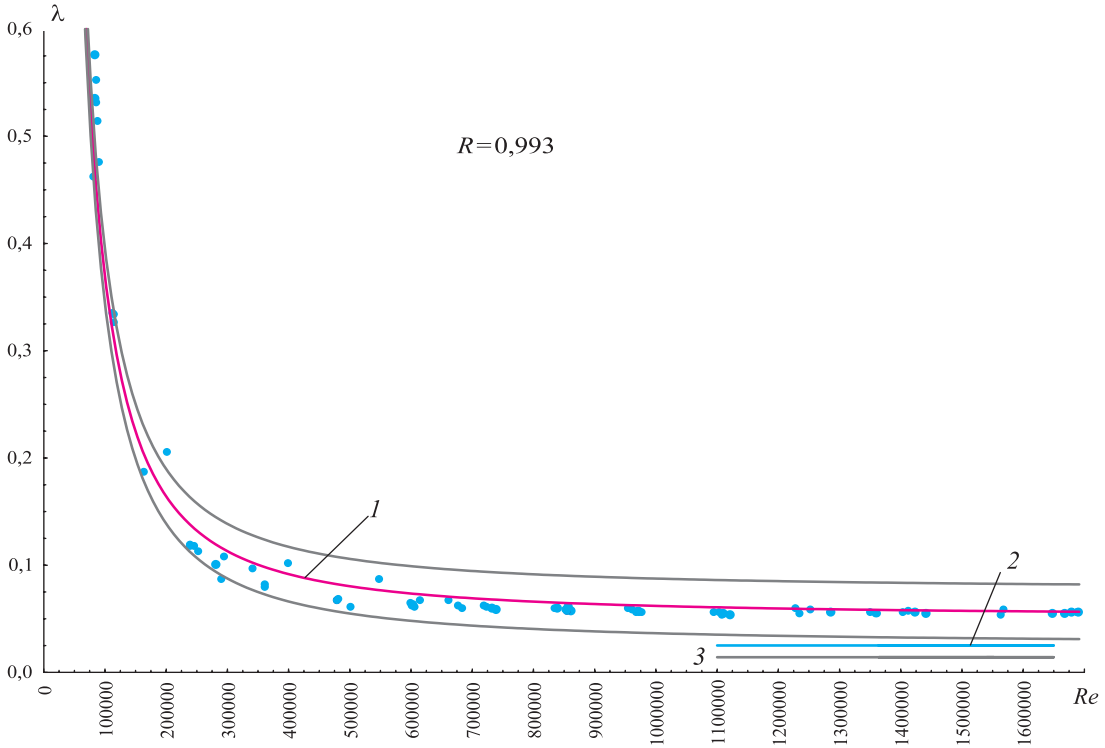



Рис. 3.52. Регрессионная зависимость $\lambda = f(Re)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % для водовода диаметром 1400 мм ($L$ = 47197 м): *1* — по формуле (3.53); *2* — по Альтшулю; *3* — по Шевелеву

Зависимость измеренных значений гидравлического уклона от скорости движения воды в водоводе видна из рис. 3.53. На основании результатов исследований (табл. 3.31) выбрана модель 5, которая с большей адекватностью описывает поведение зависимости $i=f(V)$ при малых расходах воды.

Таблица 3.31

**Характеристики регрессионной зависимости $i = f(V)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $i = a + bV$ | 2. $i = ae^{bV}$ | 3. $i = aV^n$ | 4. $i = a + bV + cV^2$ | 5. $i = aV^2 + b\sqrt{V}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,00059<br>$b$ = 0,00291 | $a$ = 0,000262<br>$b$ = 1,974 | $a$ = 0,0021<br>$n$ = −1,90204 | $a$ = −0,000114<br>$b$ = −0,00008<br>$c$ = 0,00206 | $a$ = 0,00195<br>$b$ = 0,000156 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0003583 | 0,000164 | 0,0000749 | 0,00005347 | 0,00005323 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,962 | 0,992 | 0,998 | 0,999 | 0,999 |

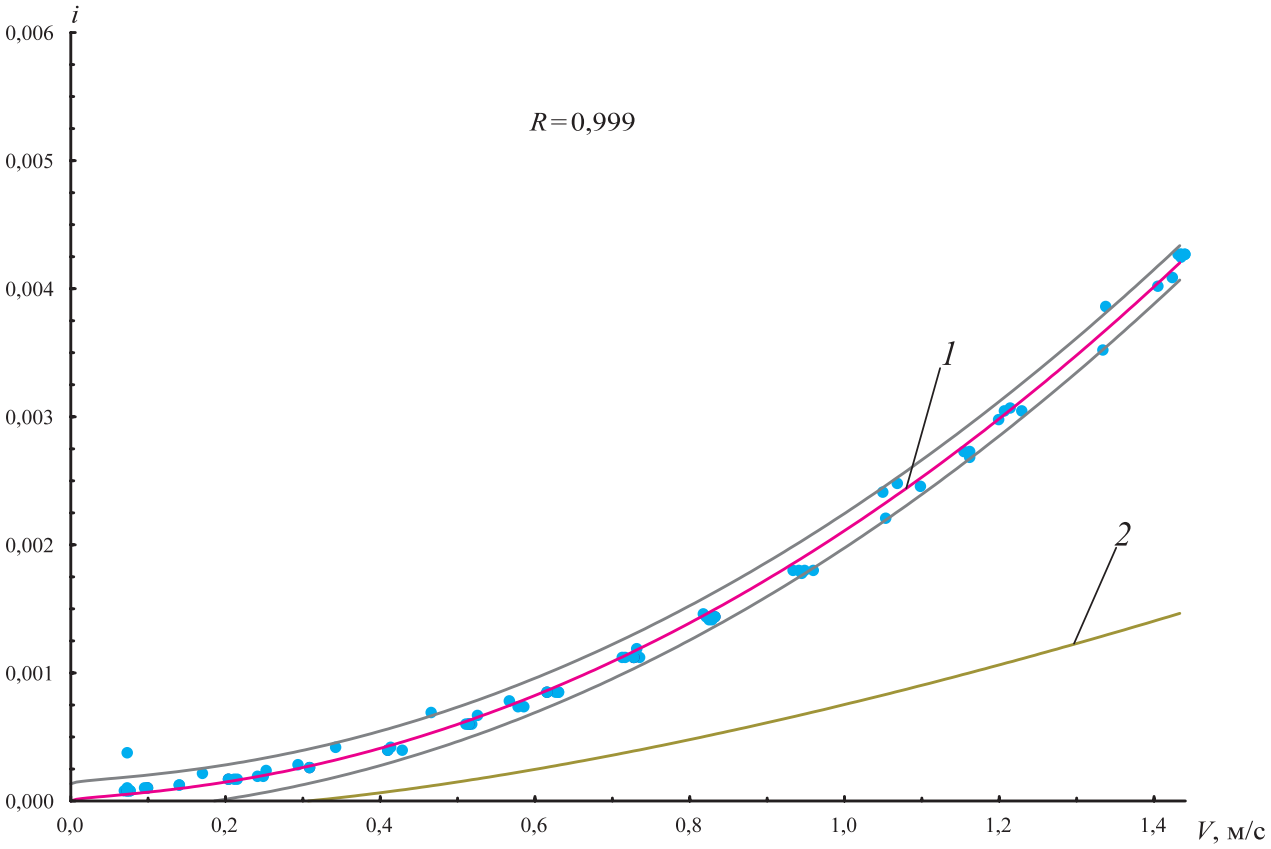



Рис. 3.53. Регрессионная зависимость i=*f*(*v*) с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % для водовода диаметром 1400 мм ($L$ = 47197 м):
*1* — по формуле (3.54); *2* — по Шевелеву

Эта зависимость имеет вид (для значений $V$, м/с)

$$i_p = 0,00195V^2 + 0,000156V^{0,5}. \qquad (3.54)$$

Исследования парной зависимости $\lambda = f(\overline{\Delta})$ проводились на основе экспериментальных данных, полученных при эксплуатации водовода от 1 мес. до 16 лет (рис. 3.54).

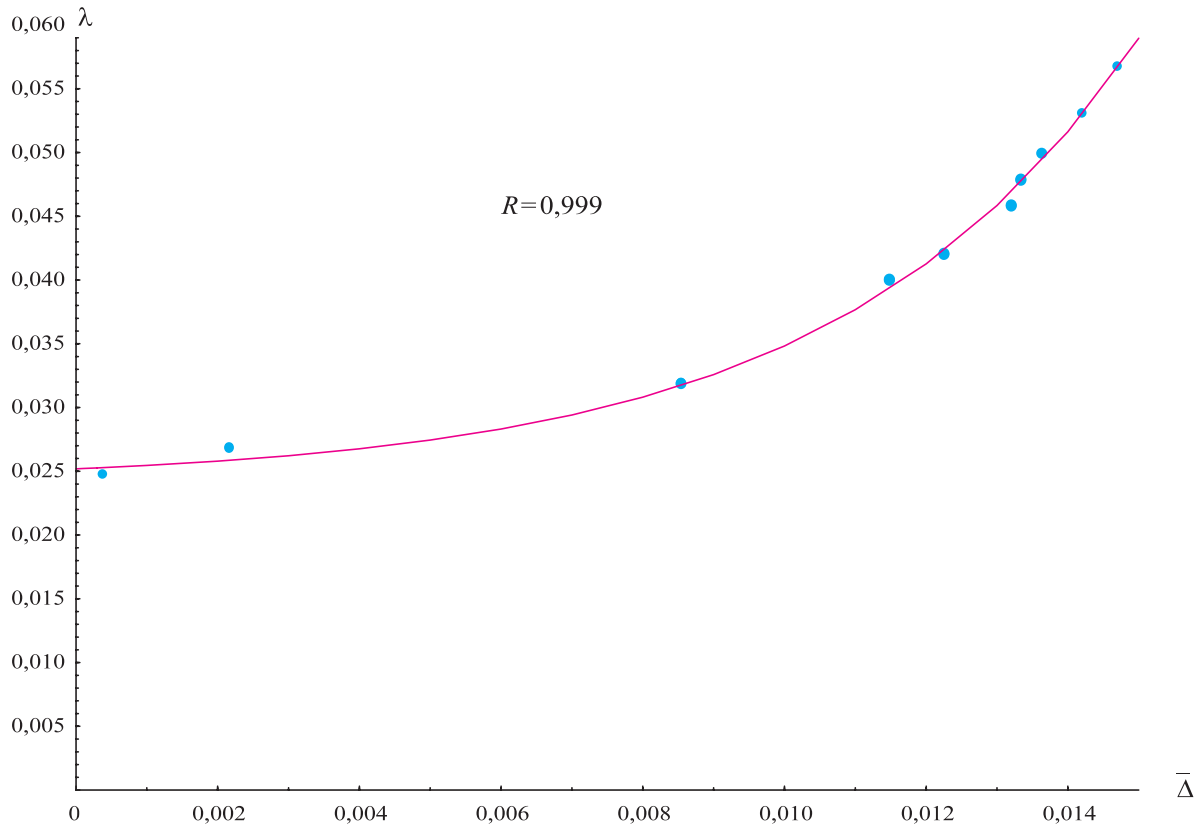



Рис. 3.54. Регрессионная зависимость $\lambda = f(\bar{\Delta})$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 % для водовода диаметром 1400 мм ($L$ = 47 197 м)

Применение нелинейного регрессионного анализа позволило выбрать модель экспоненциальной зависимости (табл. 3.32) $\lambda = a + be^{c\bar{\Delta}}$, т.е.

$$\lambda = 0,0242 + 0,000999e^{237,1\bar{\Delta}}. \qquad (3.55)$$

Таблица 3.32

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(\bar{\Delta})$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + b\bar{\Delta}$ | 2. $\lambda = a + be^{c\Delta}$ | 3. $\lambda = a + b\bar{\Delta}^n$ | 4. $\lambda = a + b\bar{\Delta} + c\bar{\Delta}^2$ | 5. $\lambda = a + b\ln\bar{\Delta}$ |
| Коэффициенты регрессии | $a$ = 0,0213<br>$b$ = 1,998 | $a$ = 0,0242<br>$b$ = 0,000999<br>$c$ = 237,1 | $a$ = 0,026179<br>$b$ = 33992,9<br>$n$ = 3,3 | $a$ = 0,02712<br>$b$ = −1,49614<br>$c$ = 231,9 | $a$ = 0,078<br>$b$ = 0,00733 |
| Стандартная ошибка, σ | 0,0039158 | 0,0006050 | 0,00078386 | 0,001333 | 0,0064721 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,934 | 0,999 | 0,997 | 0,992 | 0,807 |

С учетом вида нелинейности в парных зависимостях $\lambda = f(Re)$ и $\lambda = f(\bar{\Delta})$ принята двухфакторная регрессионная модель

$$\lambda_p = \left[0,052 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right] e^{a+b\bar{\Delta}} \qquad (3.56)$$

или
$$\ln \lambda_p = \ln\left[0{,}052 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1{,}5}\right] + a + b\bar{\Delta}, \qquad (3.57)$$

где $a$ и $b$ — коэффициенты регрессии, оцениваемые с помощью метода множественного регрессионного анализа: $a = -1{,}44$; $b = 98{,}45$.

Построена диаграмма рассеяния для двухфакторной регрессионной зависимости с доверительным интервалом 95 % для величины lnλ (рис. 3.55)

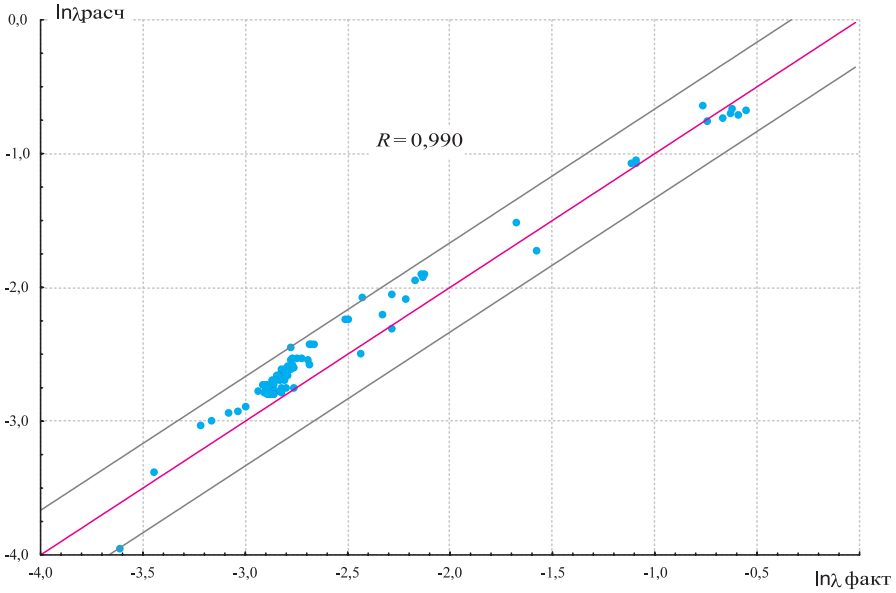



Рис. 3.55. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$ с доверительным интервалом регрессии $P$ = 95 %

Таким образом, двухфакторная регрессионная модель имеет вид
$$\lambda = \left[0{,}052 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1{,}5}\right] e^{-1{,}44+98{,}45\bar{\Delta}}. \qquad (3.58)$$

На рис. 3.56 представлены результаты исследований, полученные на исследуемом водоводе в течение 16 лет.

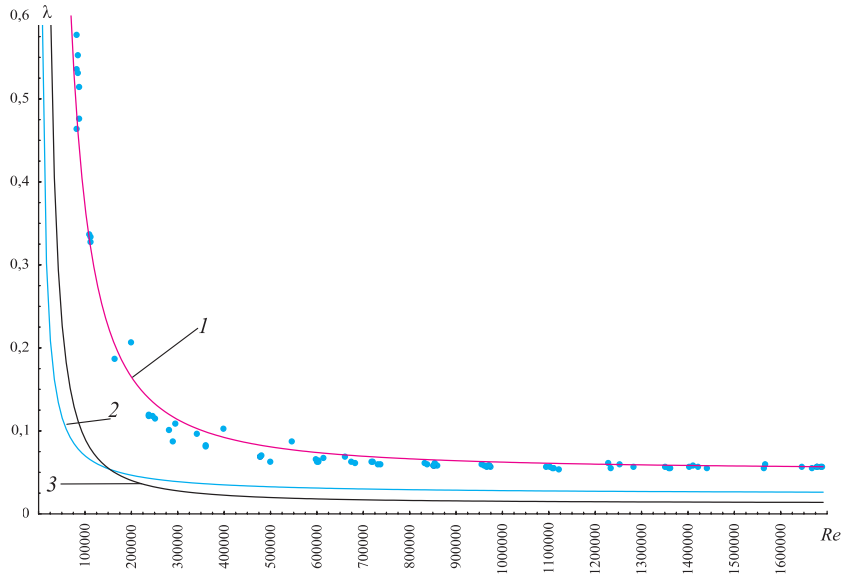



Рис. 3.56. Зависимость $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$: *1* — по формуле (3.58) при $\bar{\Delta} = 0{,}01468$; *2* — по формуле (3.58) при $\bar{\Delta} = 0{,}0003582$; *3* — по (3.1) Ф.А. Шевелева

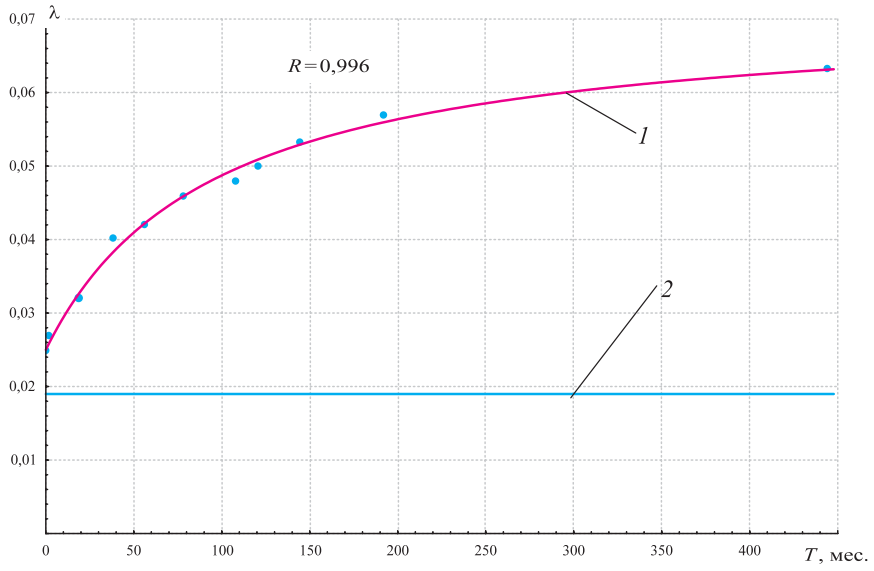



Рис. 3.57. Сравнение зависимостей $\lambda = f(T)$ для водовода диаметром 1400 (1396) мм, построенных по формулам: *1* — (3.54); *2* — (3.1) Ф.А. Шевелева

При определении зависимости $\lambda = f(T)$ данного водовода получено уравнение

$$\lambda = \frac{0,0463T}{T + 95,06} + 0,025\,, \qquad (3.59)$$

где $T$ — время эксплуатации водовода, мес.

Таблица 3.33

**Характеристики регрессионной зависимости $\lambda = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\lambda = a + bT$ | 2. $\lambda = a + be^{c/T}$ | 3. $\lambda = aT/(b + T) + c$ | 4. $\lambda = a + bT + cT^2$ | 5. $\lambda = a + b\sqrt{T}$ | 6. $\lambda = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0,035$<br>$b = 0,000082$ | $a = 0,026$<br>$b = 0,038$<br>$c = -45,86$ | $a = 0,0463$<br>$b = 95,06$<br>$c = 0,025$ | $a = 0,02816$<br>$b = -0,00022$<br>$c = -3,31\cdot10^{-7}$ | $a = 0,026$<br>$b = 0,00203$ | $a = 0,0305$<br>$b = 0,003902$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,006733 | 0,0021029 | 0,0020763 | 0,002236 | 0,0028186 | 0,0064204 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,852 | 0,9865 | 0,996 | 0,985 | 0,976 | 0,866 |

На основании данных табл. 3.33 выбрана модель 3, так как соответствующий ей коэффициент корреляции является более значимым.

Сопоставим (3.58) и (3.59) и оценим значение коэффициента λ для водовода диаметром 1400 мм со сроком эксплуатации 192 мес. и относительной макрошероховатостью $\bar{\Delta}$=0,01468. При расчете по формуле (3.58) получим

$$\lambda = \left[0,052 + \left(\frac{46500}{1100000}\right)^{1,5}\right] e^{-1,44+98,45\cdot0,01468} = 0,061\,. \qquad (3.60)$$

При расчете по формуле (3.59)

$$\lambda = \frac{0,0463\cdot192}{192 + 95,06} + 0,025 = 0,055. \qquad (3.61)$$

Как видно, расхождение расчетных значений коэффициента λ составляет 9,25 %, что вполне удовлетворяет условиям экспериментальных исследований.

За 192 мес. нахождения водовода в эксплуатации коэффициент λ по формуле (3.60) составил 0,061 и вырос с начала эксплуатации водовода в 2,4 раза. В то же время по формуле Ф.А. Шевелева (3.1) для находящихся в эксплуатации водопроводных труб коэффициент λ равен 0,01898, т.е. в 3,2 раза меньше фактического значения.

Использовав (3.58) и (3.3) для удобства расчетов, получим уравнение коэффициента гидравлического сопротивления λ

$$\lambda = \left[0,01232 + 2375721\left(\frac{\nu}{Vd}\right)^{1,5}\right] e^{98,45\overline{\Delta}}. \qquad (3.62)$$

Расчетные значения коэффициента λ, полученные из уравнений (3.60) — (3.62):
по формуле (3.60) — -0,061;
по формуле (3.61) — -0,055;
по формуле (3.62)
при $Re$ = 1 100 000 — 0,06109;
процент расхождения между значениями λ:
по (3.60) и (3.62) — -0,04;
по (3.61) и (3.62) — 9,22.

Как видно из этого сопоставления, расхождения, полученные для зависимостей $\lambda = f(Re, \overline{\Delta})$, $\lambda = f(T)$ по формулам (3.60)–(3.62), незначительны и вполне удовлетворяют практическому применению уравнения (3.62) не только для проектирования водоводов, но и для экспертной оценки пропускной способности водовода по формуле (3.25) при подготовке его к санации.

## 3.3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ВОДОВОДОВ ДИАМЕТРОМ 1200–1600 ММ

Проведенный регрессионный анализ зависимости гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса и относительной шероховатости показал, что данная зависимость для водоводов с различными диаметрами труб описывается сходными эмпирическими формулами. Выбранные регрессионные модели для всех исследуемых водоводов характеризуются одинаковым типом нелинейности. Различия проявляются только в величине коэффициентов регрессии, причем вариация этих величин незначительна. Данное обстоятельство вытекает из основных соображений подобия и размерностей и является свидетельством безусловно качественного проведения экспериментов.

Не менее важным является тот факт, что в исследовании, приведенном в данной книге, не рассматривалось влияние состава воды на скорость изменения гидравлического коэффициента, а эти изменения определялись как функция времени. Принимая во внимание то обстоятельство, что состав воды в Днепре и Северском Донце неодинаков, целесообразно было установить общие зависимости, в одинаковой степени приемлемые для различных составов воды. Обоснованность такого подхода подтверждается и тем, что, независимо от источника водоснабжения, при транспортировании воды по водоводам после прохождения ею системы кондиционирования она должна соответствовать ГОСТу «Вода питьевая».

В этой связи представляет интерес построение общей регрессионной модели оценки гидравлического сопротивления для всех ранее описанных водоводов, которая легла в основу разработанной методики прогнозирования коэффициента λ.

Для построения общей регрессионной модели $\overline{\Delta} = f(T)$ (рис. 3.58) проведен совместный анализ всех имеющихся данных систематических натурных наблюдений, проводившихся на водоводах диаметром 1200 мм в течение 37 лет, диаметром 1400 мм (Днепр) — 16 лет, диаметром 1400 мм (КВС №4) — 35 лет и диаметром 1600 мм — в течение 33 лет, при различных сроках эксплуатации этих водоводов. Предварительно необходимо было получить

модель, описывающую изменение со временем величины $\bar{\Delta}$, общую для всех исследованных водоводов.

Для построения такой модели выбрана нелинейная функция вида

$$\bar{\Delta} = \frac{aT}{T+b}, \tag{3.63}$$

где $T$ — срок эксплуатации водовода, мес.;

$a$, $b$ — оцениваемые коэффициенты регрессии.

Выбор именно такого вида нелинейности определялся тем, что при исследовании зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$ для отдельных водоводов функции именно этого вида оказывались наиболее приемлемыми. Оценка коэффициентов регрессии с помощью программного пакета STATISTICA дала следующие результаты: $a = 0{,}016$; $b = 42{,}51$ (табл. 3.34), т.е. зависимость $\bar{\Delta} = f(T)$ описывается следующей формулой для значений $T$, мес.:

$$\bar{\Delta} = \frac{0{,}016147T}{T+42{,}51}. \tag{3.64}$$

Построен график полученной зависимости и доверительный интервал (рис. 3.58).

Таблица 3.34

**Характеристики регрессионной зависимости $\bar{\Delta} = f(T)$**

| Характеристика | Модель | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 1. $\bar{\Delta} = a + bT$ | 2. $\bar{\Delta} = aT/(T+b)$ | 3. $\bar{\Delta} = aT^n$ | 4. $\bar{\Delta} = a + bT + cT^2$ | 5. $\bar{\Delta} = a + b\ln T$ |
| Коэффициенты регрессии | $a = 0{,}006077$<br>$b = 0{,}000027$ | $a = 0{,}016147$<br>$b = 42{,}51$ | $a = 0{,}002346$<br>$n = 0{,}3186$ | $a = 0{,}003891$<br>$b = -0{,}000078$<br>$c = -1{,}3\cdot10^{-7}$ | $a = -0{,}000356$<br>$b = 0{,}00224$ |
| Стандартная ошибка, σ | 0,002942 | 0,001923 | 0,002136 | 0,002336 | 0,002492 |
| Коэффициент корреляции, $R$ | 0,762 | 0,906 | 0,882 | 0,858 | 0,837 |

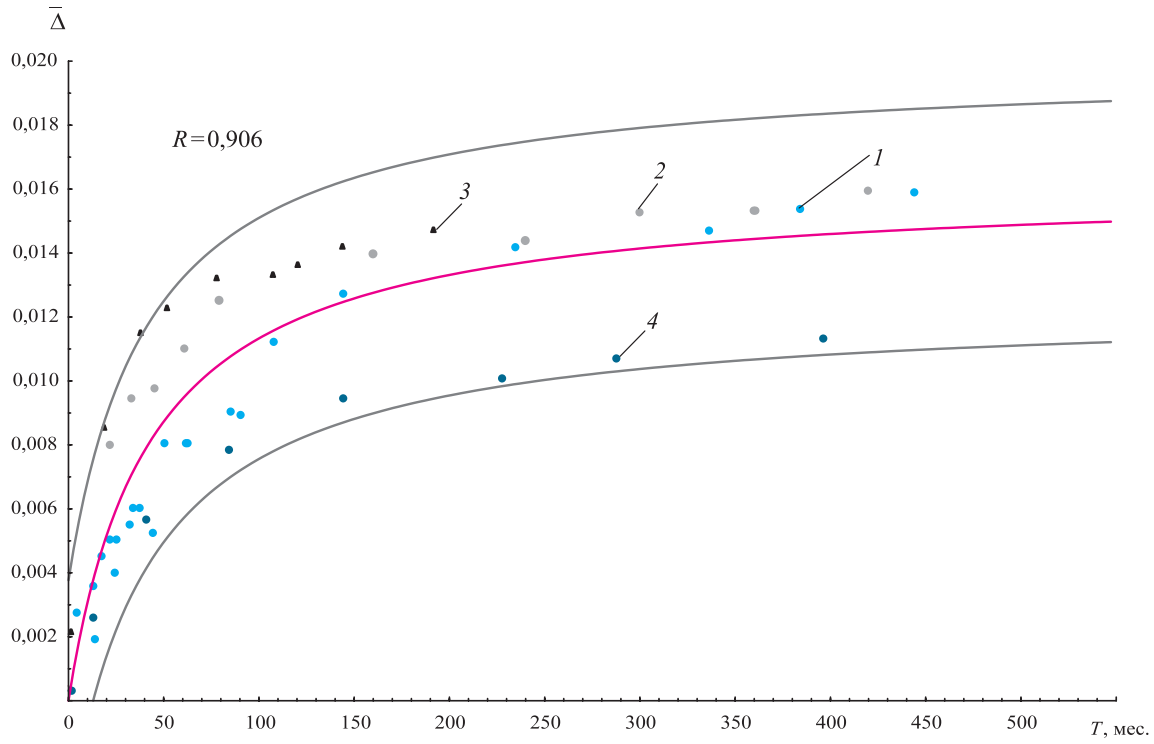



Рис. 3.58. Изменение величины относительной макрошероховатости $\bar{\Delta} = f(T)$ для водоводов диаметром 1200–1600 мм: *1* — $d$ =1200 (эксплуатация 37 лет); *2* — $d$ =1400 (эксплуатация 35 лет); *3* — $d$ =1400 (эксплуатация 16 лет); *4* — $d$ =1600 (эксплуатация 33 года); *1, 2, 4* — источник воды — Северский Донец; *3* — источник воды — Днепр

Методом регрессионного анализа выполнялся поиск регрессионной модели с нелинейностью по факторам $Re$ и $\bar{\Delta}$ того же вида, что и в регрессионных моделях для каждого отдельно взятого водовода:

$$\lambda = \left( a_1 + \left( \frac{b_1}{Re} \right)^{1,5} \right) e^{a_2 + b_2 \bar{\Delta}}, \qquad (3.65)$$

где $a_1$, $b_1$, $a_2$ и $b_2$ — оцениваемые коэффициенты регрессии.

Выполненные расчеты позволили получить следующие оценки коэффициентов регрессии: $a_1 = 0{,}055$; $b_1 = 46500$; $a_2 = -1{,}035$; $b_2 = 71{,}99$.

Точность выбранной модели характеризуется коэффициентом корреляции $R = 0{,}983$ и стандартной ошибкой регрессии $\sigma = 0{,}015$.

Построены диаграмма рассеяния и доверительный интервал для полученной регрессионной модели в логарифмических координатах (рис. 3.59). Таким образом, достаточно точная оценка гидравлического сопротивления для водоводов с различным диаметром труб и, что очень важно, с различным качеством транспортируемой воды может быть выполнена по единой обобщенной формуле

$$\lambda = \left( 0{,}055 + \left( \frac{46500}{Re} \right)^{1,5} \right) e^{-1{,}035 + 71{,}99 \bar{\Delta}}. \qquad (3.66)$$

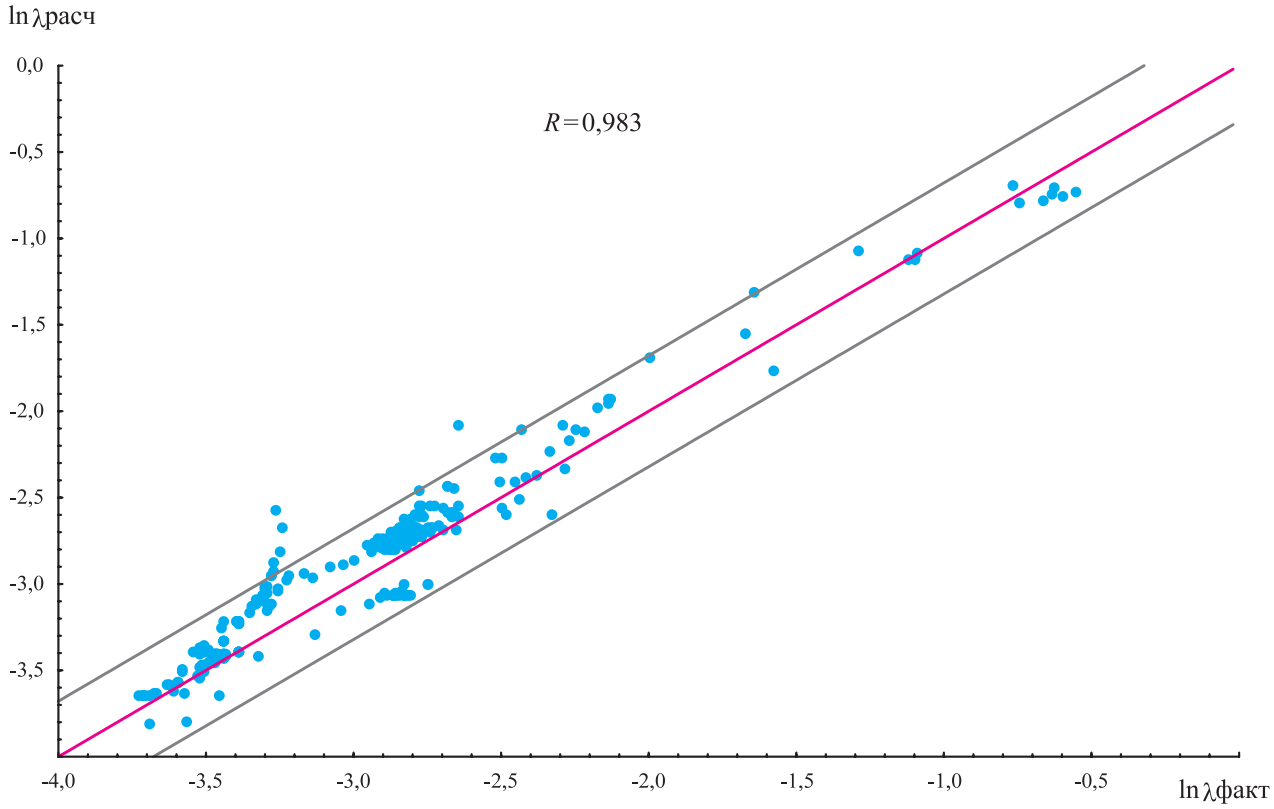



Рис. 3.59. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$ с доверительным интервалом регрессии $P = 95$ %

Проведено сопоставление фактических значений гидравлического сопротивления $\lambda$ для различных водоводов, рассчитанного по формуле (3.66) и полученного по таблице Ф.А. Шевелева (рис. 3.60).

Несмотря на то, что обобщенная формула расчета коэффициента гидравлического сопротивления дает менее точные оценки, чем отдельные формулы для каждого из водоводов, она является приемлемой для более корректных экспертных оценок состояния гидравлического сопротивления водоводов различных диаметров в диапазоне 1200–1600 мм. Вместе с тем применение общей формулы представляется удобным для прогноза возможных изменений гидравлического сопротивления водоводов во время их эксплуатации.

После преобразования значения *Re* получена формула (3.67), которую целесообразно использовать для определения коэффициента гидравлического сопротивления водоводов диаметром 1200–1600 мм:

$$\lambda = \left(0{,}019537 + 3561924\left(\frac{\nu}{Vd}\right)^{1{,}5}\right) e^{71{,}99\bar{\Delta}}. \qquad (3.67)$$

Вычисляя значения λ по формуле (3.67), можно оценить расход через водовод, используя формулу (3.25)

$$Q = \sqrt{\frac{1{,}232gHd^5}{\lambda l}}.$$

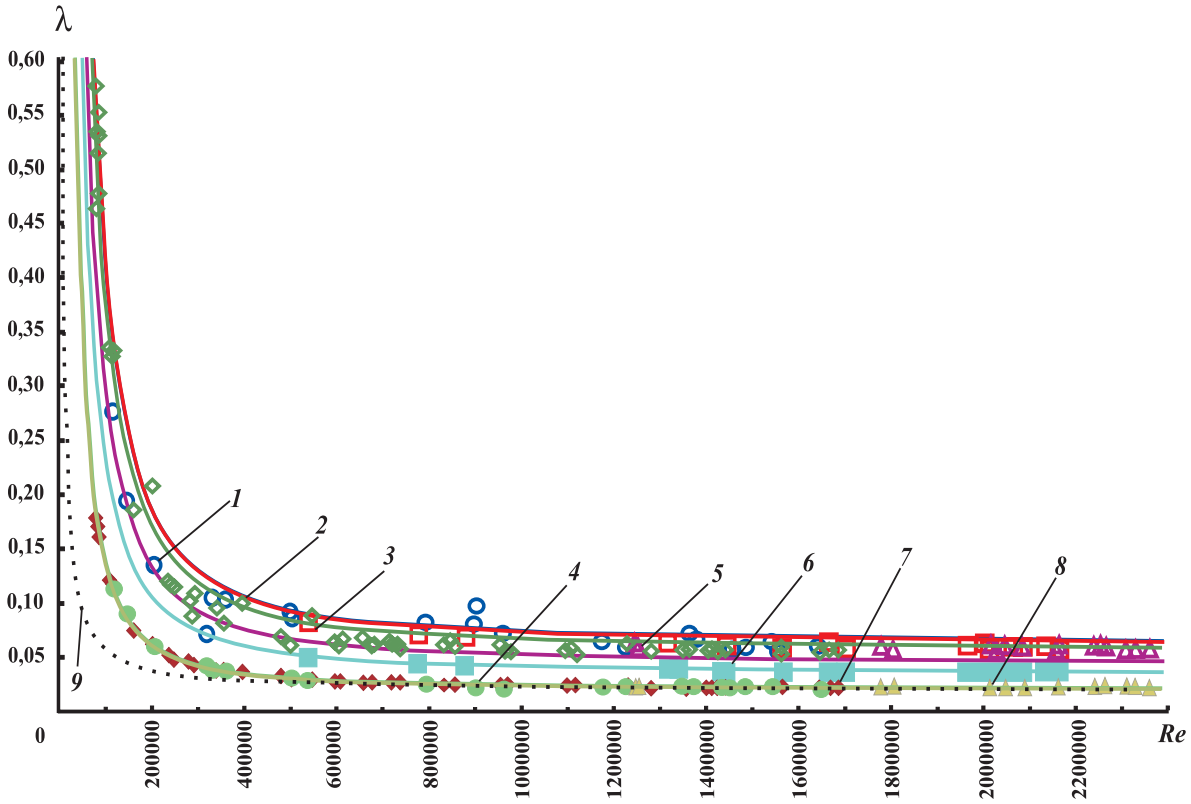



Рис. 3.60. Сравнение фактических значений зависимости $\lambda = f\left(Re, \bar{\Delta}\right)$ для водоводов диаметром 1200–1600 мм: *1* — $d$ = 1200 (период эксплуатации 37 лет при $\bar{\Delta} = 0{,}016$); *2* — $d$ = 1400 (эксплуатация 16 лет при $\bar{\Delta} = 0{,}01468$); *3* — $d$ = 1400 (эксплуатация 35 лет при $\bar{\Delta} = 0{,}0159$); *4* — $d$ = 1200 (начало эксплуатации при $\bar{\Delta} = 0{,}00084$); *5* — $d$ = 1600 (эксплуатация 33 года при $\bar{\Delta} = 0{,}0113208$); *6* — $d$ = 1400 (начало эксплуатации при $\bar{\Delta} = 0{,}00080229$); *7* — $d$ = 1400 (начало эксплуатации при $\bar{\Delta} = 0{,}000358$); *8* — $d$ = 1600 (начало эксплуатации при $\bar{\Delta} = 0{,}0003145$); *9* — по Шевелеву; *1, 3 — 6, 8* — источник воды — Северский Донец; *2, 7* — источник воды — Днепр

Регрессионная модель для экспертных оценок гидравлического сопротивления водоводов с различными диаметрами труб (3.67) была получена по результатам натурных наблюдений на водоводах со сроком эксплуатации 16–37 лет. При более длительных сроках эксплуатации возможно увеличение ошибки прогноза, обусловленное возрастанием со временем значения относительной шероховатости $\bar{\Delta}$. В связи с этим представляет интерес оценка максимального срока эксплуатации водовода, при котором формула (3.67) остается применимой для экспертных оценок величин λ и $Q$.

Как видно из рис. 3.58, увеличение относительной шероховатости практически достигло насыщения. Это свидетельствует о том, что в стальных водоводах приведенных диаметров по истечении 30 лет процесс коррозии и инкрустации, а также жизнедеятельности анаэробных бактерий на внутренней поверхности водоводов резко замедлился и протекает вяло. Можно сделать вывод, что ошибкой прогноза роста относительной макрошероховатости в последующие 20 лет можно пренебречь, так как относительная макрошероховатость по истечении 37 лет эксплуатации изменяется незначительно и, следовательно, возможно прогнозирование изменения $\lambda = f(T)$ по принятой модели.

Проведена сравнительная контрольная проверка результатов расчетов коэффициента гидравлического сопротивления λ для различных водоводов, находящихся в эксплуатации 37 лет (444 мес.), в сопоставлении с результатами расчетов по обобщенной формуле (3.66). Проверка показала высокую сходность с коэффициентом λ для водовода диаметром 1200 мм, также эксплуатировавшегося 37 лет.

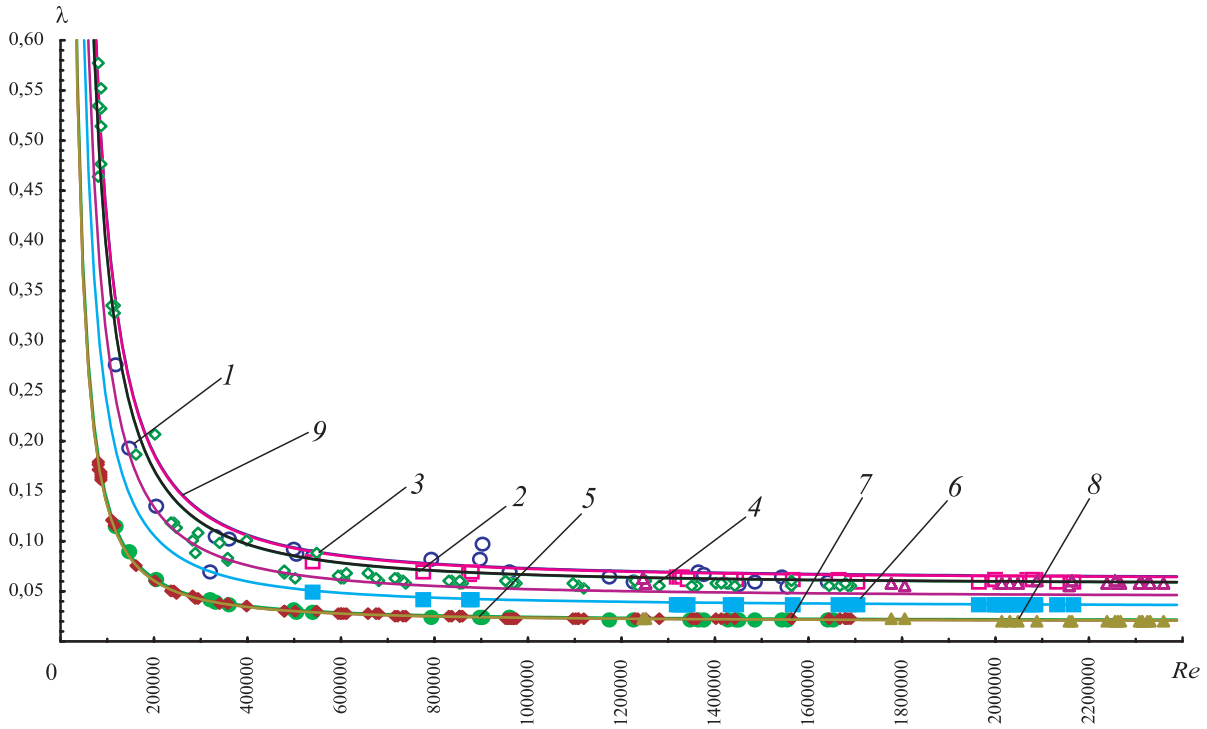



Рис. 3.61. Двухфакторная регрессионная зависимость $\lambda_{общ} = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ для водоводов диаметром 1200–1600 мм с различным периодом эксплуатации:
*1* — $d$ = 1200 (эксплуатация 37 лет при $\overline{\Delta} = 0{,}016$); *2* — $d$ = 1400 (эксплуатация 35 лет при $\overline{\Delta} = 0{,}0159$); *3* — $d$ = 1400 (эксплуатация 16 лет при $\overline{\Delta} = 0{,}01468$); *4* — $d$ = 1600 (эксплуатация 33 года при $\overline{\Delta} = 0{,}0113208$); *5* — $d$ = 1200 (начало эксплуатации при $\overline{\Delta} = 0{,}00084$); *6* — $d$ = 1400 (начало эксплуатации при $\overline{\Delta} = 0{,}00080229$); *7* — $d$ = 1400 (начало эксплуатации при $\overline{\Delta} = 0{,}000358$); *8* — $d$ = 1600 (начало эксплуатации при $\overline{\Delta} = 0{,}0003145$); *9* — $\lambda_{общ}$ (эксплуатация 37 лет при $\overline{\Delta} = 0{,}014736$); *1, 2, 4 — 6, 8* — источник воды — Северский Донец; *3, 7* — источник воды — Днепр

## 3.4. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОДОВОДА ДИАМЕТРОМ 1200 ММ СО СРОКОМ ЭКСПЛУАТАЦИИ 37 ЛЕТ

На водоводе диаметром 1200 (1195) мм участка насосной станции 1–2 (Кочеток — Роганская насосная станция) 25 февраля 2001 г. была произведена контрольная оценка расхода воды при температуре воды +1,5 °С по формулам (3.24) и (3.25):

$H_1 = \dfrac{P_1}{\gamma} = 95{,}5$ — манометрический напор в камере переключения водовода, м;

$l$ = 15097 — длина водовода от насосной станции II подъема до роганских резервуаров, м;

$t$ = 1,5 °С — температура воды в водоводе, °С;

$Q_р$ = 5840 — показания стационарного ультразвукового расходомера на насосной станции, м$^3$/ч;

$V_р$ = 1,436 — скорость потока воды по водоводу, м/с;

$H_2 = \frac{P_2}{\gamma} = 2{,}2$ — манометрический напор в камере входа водовода в роганский резервуар чистой воды, м;

$H_l$ — потери напора по водоводу, м;

$П_1$, $П_2$ — пьезометрические отметки в начале и в конце водовода, м.

1. Величину коэффициента кинематической вязкости при температуре воды +1,5 °С рассчитывали по формуле Пуазейля

$$\nu = \frac{0{,}0178}{1 + 0{,}0337t + 0{,}000221t^2},$$

$$\nu = \frac{0{,}0178}{1 + 0{,}0337 \cdot 1{,}5 + 0{,}000221 \cdot 1{,}5^2} = 0{,}0169, \text{ см}^2/\text{с}.$$

2. Фактические потери напора на участке 1–2 рассчитывали при указанном выше режиме работы насосной станции. Пьезометрические отметки $П_1$ и $П_2$ определяли как сумму нивелировочных отметок штуцера с установленным манометром и расстоянии штуцера до оси манометра и показании манометра:

$$П_1 = Z_1 + A_1 + \frac{P_1}{\gamma};\ П_2 = Z_2 + A_2 + \frac{P_2}{\gamma};$$

$$H_l = П_1 - П_2;$$

$$H_l = \left(Z_1 + A_1 + \frac{P_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + A_2 + \frac{P_2}{\gamma}\right),$$

где $Z_1$ и $Z_2$ — отметки штуцера в начале и в конце водовода, м;

$A_1$ и $A_2$ — расстояние от верха штуцера до оси манометра в начале и в конце водовода, м;

$$H_l = (168{,}5 + 0{,}2 + 95{,}5) - (167{,}01 + 0{,}2 + 2{,}2) = 264{,}25 - 169{,}41 = 94{,}84 \text{ м}.$$

3. Коэффициент гидравлического сопротивления λ рассчитывали при абсолютной макрошероховатости 19 мм в водоводе за 37 лет эксплуатации. Тогда относительная шероховатость $\bar{\Delta}$ равна

$$\bar{\Delta} = \frac{\delta}{d} = \frac{19}{1195} = 0{,}0159.$$

Подставляя это значение в (3.24), получаем

$$\lambda = \left[0{,}016932 + 2257600\left(\frac{0{,}0169}{143{,}6 \cdot 119{,}5}\right)^{1{,}5}\right] e^{79{,}58 \cdot 0{,}0159} = 0{,}0678.$$

По найденному значению λ определяли по формуле (3.25) пропускную способность водовода

$$Q = \sqrt{\frac{1{,}232gHd^5}{\lambda l}} = \sqrt{\frac{1{,}232 \cdot 9{,}81 \cdot 94{,}84 \cdot 2{,}437}{0{,}0678 \cdot 15097}} = \sqrt{2{,}738} =$$

$$= 1{,}651 \text{ м}^3/\text{с} = 5944{,}231 \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$V = 1{,}461 \text{ м}/\text{с}.$$

Таким образом, величина расхода воды по водоводу, вычисленная с использованием формулы (3.25), составила $Q$ = 5944,23 м³/ч и была выше показаний ультразвукового расходомера ($Q_р$=5840 м³/ч) на 104,23 м³/ч, т. е. на 1,76 %. Полученный результат и величина абсолютного расхождения свидетельствуют о корректности формул (3.24) и (3.25) для расчетов при проектировании водовода диаметром 1200 мм, а также для экспертной оценки пропускной способности водовода при технико-экономическом обосновании необходимости его санирования.

Проведем экспертную оценку пропускной способности водовода по формуле (3.25), определив коэффициент λ по обобщенной формуле (3.66)

$$\lambda = \left(0,055 + \left(\frac{46500}{Re}\right)^{1,5}\right) e^{-1,035+71,99\bar{\Delta}},$$

где $\bar{\Delta} = \dfrac{0,016147T}{T+42,51}$ для водоводов диаметром 1200–1600 мм.

Подставив значение $T$=444 месяца, для относительной макрошероховатости $\bar{\Delta}$ получим

$$\bar{\Delta} = \frac{0,016147 \cdot 444}{444+42,51} = 0,014736.$$

Число Рейнольдса $Re = \dfrac{143,6 \cdot 119,5}{0,0169349} = 1013304.$

Вычислим по (3.66) коэффициент гидравлического сопротивления

$$\lambda = \left(0,055 + \left(\frac{46500}{1013304}\right)^{1,5}\right) e^{-1,035+71,99 \cdot 0,0147} = 0,0665.$$

Зная значение λ, полученное по обобщенной формуле (3.66), определяем пропускную способность водовода диаметром 1200 мм

$$Q = \sqrt{\frac{1,232gHd^5}{\lambda l}} = \sqrt{\frac{1,232 \cdot 9,81 \cdot 94,84 \cdot 2,437}{0,0665 \cdot 15097}} = \sqrt{2,778} =$$
$$= 1,667 \text{ м}^3/\text{с} = 6000,419 \text{ м}^3/\text{ ч}.$$

Таким образом, расхождение между показаниями ультразвукового расходомера и расчетным значением $Q$, полученным по обобщенной формуле (3.66), составляет

$$\Delta Q = 6000 - 5840 = 160 \text{ м}^3/\text{ч},$$

или 2,66 %, что вполне удовлетворяет требованиям экспертной оценки пропускной способности водоводов.

## 3.5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ВОДОВОДОВ ПРИ БОЛЕЕ ДЛИТЕЛЬНОМ СРОКЕ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Из натурных исследований (табл. 3.35) следует, что по истечении срока эксплуатации водоводов 33–37 лет дальнейшее возрастание относительной макрошероховатости является незначительным, изменение гидравлического сопротивления, связанное с изменением величины $\bar{\Delta}$, может быть приближенно описано линейной функцией.

Таблица 3.35

**Изменение относительной макрошероховатости внутренней поверхности водоводов диаметром 1200–1600 мм с течением времени их эксплуатации**

| Номер эксперимента | *T*, мес | Относительная макрошероховатость, $\bar{\Delta}$ |
|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 |
| *d* =1200 (КВС) | | |
| 1 | 4 | 0,00275 |
| 2 | 13 | 0,00360 |
| 3 | 14 | 0,00193 |
| 4 | 17 | 0,00450 |
| 5 | 22 | 0,00502 |
| 6 | 24 | 0,00402 |
| 7 | 25 | 0,00502 |
| 8 | 32 | 0,00552 |
| 9 | 34 | 0,00603 |
| 10 | 37 | 0,00603 |
| 11 | 44 | 0,00525 |
| 12 | 50 | 0,00803 |
| 13 | 62 | 0,00803 |
| 14 | 63 | 0,00803 |
| 15 | 85 | 0,00903 |
| 16 | 90 | 0,00895 |
| 17 | 108 | 0,01121 |
| 18 | 144 | 0,01272 |
| 19 | 235 | 0,01420 |
| 20 | 336 | 0,01473 |
| 21 | 384 | 0,01540 |
| 22 | 444 | 0,01590 |
| *d* = 1400 (КВС) | | |
| 23 | 22 | 0,00802 |
| 24 | 33 | 0,00946 |
| 25 | 45 | 0,00974 |
| 26 | 61 | 0,01103 |
| 27 | 79 | 0,01250 |
| 28 | 160 | 0,01397 |
| 29 | 240 | 0,01440 |
| 30 | 300 | 0,01526 |
| 31 | 360 | 0,01533 |
| 32 | 361 | 0,01533 |
| 33 | 420 | 0,01597 |

| 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|
| *d* = 1600 (КВС) | | |
| 34 | 2 | 0,00031 |
| 35 | 13 | 0,00258 |
| 36 | 41 | 0,00566 |
| 37 | 84 | 0,00786 |
| 38 | 144 | 0,00943 |
| 39 | 228 | 0,01006 |
| 40 | 288 | 0,01069 |
| 41 | 396 | 0,01132 |
| *d* = 1400 (Днепр) | | |
| 42 | 0,03 | 0,00036 |
| 43 | 2 | 0,00215 |
| 44 | 19 | 0,00852 |
| 45 | 38 | 0,01146 |
| 46 | 52 | 0,01225 |
| 47 | 78 | 0,01318 |
| 48 | 108 | 0,01332 |
| 49 | 121 | 0,01361 |
| 50 | 144 | 0,01418 |
| 51 | 192 | 0,01469 |
| Среднее значение | | 0,00940 |

Поэтому для оценки ошибки прогноза величины λ воспользуемся табл. 3.35 и формулой из линейного регрессионного анализа

$$S_\lambda^2 = \sigma^2 \left(1 + \frac{1}{N} + \frac{(\overline{\Delta} - \overline{\Delta}_{cp})^2}{S_{\overline{\Delta}}^2 (N-1)}\right), \qquad (3.69)$$

где $S_\lambda$ — ошибка прогноза величины λ;

σ — стандартная ошибка регрессии;

$N$ — количество точек наблюдений с разными значениями $\overline{\Delta}$;

$\overline{\Delta}_{cp}$, $S_{\overline{\Delta}}$ — среднее значение и стандартное отклонение от среднего (среднеквадратичная ошибка) величины $\overline{\Delta}$ соответственно.

Из регрессионной модели (3.64), полученной для зависимости $\overline{\Delta} = f(T)$, следует: с течением времени возрастание относительной макрошероховатости достигает насыщения и в условном пределе (при $T \to \infty$) не превышает величину $\overline{\Delta}_{\max} \approx 0{,}0161$, что свидетельствует о завершении процесса интенсивного зарастания водоводов, обусловленном уменьшением идеальной среды для роста анаэробных бактерий, которые стимулируют коррозию внутренней поверхности водовода. В целом жизнедеятельность бактерий связана с окислением солей железа и использованием образовавшейся энергии в жизненных процессах бактерий. При отсутствии «питания» их деятельность на этом участке практически прекращается и они, покидая образуемый вокруг себя футляр, поселяются на участках с более благоприятными условиями для их жизнедеятельности. Поэтому при оценке абсолютной величины макрошероховатости принималась стабильная величина нароста (футляр, уже покинутый биохимбактериями) внутри полости водоводов.

В этих условиях можно оценить ошибку прогноза величины гидравлического сопротивления для относительной макрошероховатости $\overline{\Delta} = \overline{\Delta}_{\max}$.

Подставляя в формулу (3.69) значения $N = 51$, $\overline{\Delta}_{cp} \approx 0,0094$ и $S_{\overline{\Delta}} = 0,0038$, вычисленные по данным (табл. 3.35), $\overline{\Delta} = 0,0161$, $S_\lambda = 0,015$, получаем следующую оценку ошибки прогноза:

$$S_\lambda = \sqrt{0,015\left(1+\frac{1}{51}+\frac{(0,0161-0,0094)^2}{0,0038^2 \cdot 50}\right)} \approx 0,0151. \qquad (3.70)$$

Таким образом, предельное относительное увеличение ошибки прогноза, связанное с возрастанием макрошероховатости внутренней поверхности водовода, составляет ≈ 1 %, т.е. оно безусловно мало. Однако полученная модель не учитывает коррозии внешней поверхности водоводов. Все вышеизложенные и полученные на основании опыта 37-летней эксплуатации стальных магистральных водоводов результаты указывают на существенный рост гидравлических сопротивлений и энергозатрат, а следовательно, на необходимость принятия мер для предупреждения процессов коррозии водоводов. Этого можно достичь как устройством облицовки многослойными рукавами полимерного происхождения, так и укладкой стальных водоводов с внутренней защитной облицовкой, что позволит снизить гидравлическое сопротивление и сэкономить электроэнергию, повысить качество воды и увеличить срок службы водоводов без дополнительной материализации труда многих отраслей народного хозяйства.

## ВЫВОДЫ

1. В результате многолетних натурных исследований стальных магистральных водоводов диаметром 1200 — 1600 мм, не имеющих защитного покрытия внутренней поверхности, установлено, что в течение первых 16 лет они подвергаются интенсивной коррозии и инкрустации с постепенной стабилизацией степени макрошероховатости к 37 годам эксплуатации. Причиной образования макрошероховатости служат катализаторы биохимических реакций, стимулирующих коррозию. Результатом уменьшения макрошероховатости является образование защитной пленки закиси железа.

2. Рост макрошероховатости в стальных водоводах является следствием контакта стальной трубы с водой и теми реагентами и флокулянтами, которые используются в процессе водоподготовки. Происходящая биохимическая коррозия приводит не только к ухудшению качества воды (рост биопленки, разрушение дезинфицирующих веществ, коррозия), но и к изменению гидравлического сопротивления водоводов с течением времени их эксплуатации, что, естественно, влечет за собой увеличение энергозатрат.

3. Натурные исследования эксплуатируемых участков магистральных водоводов диаметром 1200 — 1600 мм, проводившиеся в течение 37 лет, позволили получить новые эмпирические зависимости, связывающие коэффициент сопротивления трения с числом Рейнольдса и относительной шероховатостью. Их отличие от всех ранее существовавших состоит в установлении временных связей. Зависимости получены для режимов движения, которые характеризуются числами Рейнольдса и перекрывают необходимый для практики диапазон. Эмпирические зависимости построены для магистральных водоводов широко используемых диаметров 1200, 1400 и 1600 мм. Обобщенная модель $\lambda = f\left(Re, \overline{\Delta}\right)$ для оценки состояния магистральных стальных водоводов и их пропускной способности на срок эксплуатации от 37 до 50 лет положена в основу разработанной методики прогнозирования коэффициента гидравлического сопротивления.

4. Выявлена закономерность роста удельного расхода электроэнергии на 1 м$^3$ транспортируемой воды и потерь напора, обусловленных увеличением макрошероховатости внутренней поверхности водовода с течением времени эксплуатации.

5. Установлено, что, с целью интенсификации работы магистральных стальных водоводов и поддержания стабильным коэффициента гидравлического сопротивления $\lambda$ на первоначальном этапе их эксплуатации, недопустима прокладка стальных водоводов без внутренней облицовки, которая является химико-биологическим защитным барьером, препятствующим развитию коррозии труб. Поэтому при разработке новых государственных строительных норм на проектирование и строительство водоводов необходимо предусматривать антикоррозийную защиту внутренней поверхности водоводов.

# ГЛАВА 4

# МЕТОД РАСЧЕТА ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ГОРОДОВ

## 4.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Несмотря на наличие множества независимых факторов и специфических особенностей водопотребления отдельных городов, расположенных в различных природно-климатических условиях, представляется возможным путем обработки статистических материалов установить параметры, которые оказывают наиболее сильное влияние на изменение условий водоснабжения. К их числу относятся среднесуточная температура воздуха, упругость водяного пара, относительная влажность, среднегодовое количество осадков, геодезическая высота, географическая широта и долгота, численность населения города, средняя площадь, приходящаяся на одного жителя города, площадь застройки города, сумма среднесуточных температур в городе выше 0 $^0$C, продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже 0 $^0$C. В данной главе исследуется влияние этих параметров на удельное среднесуточное (за год) водопотребление. Получены эмпирические формулы, которые можно использовать как при проектировании и корректировке условий эксплуатации, так и для прогнозов, основанных на знании динамики изменения перечисленных параметров [165, 182, 185, 186, 189].

Проведенные исследования показывают, что для решения задач прогнозирования водопотребления и изучения его закономерностей следует рассматривать множество факторов различной физической природы, характер и величины которых могут влиять на изменение водопотребления в городах. При этом необходимо учитывать, что между рассматриваемыми факторами в ряде случаев существуют сложные взаимосвязи [31, 36, 52, 83, 109, 122, 130, 169, 192, 211, 228, 230].

Создание метода расчета водопотребления позволит оценивать характер его изменения, состояние используемых водных ресурсов и активно воздействовать на принятие рациональных управленческих решений с учетом стратегической весомости населенных пунктов, прогнозировать водопотребление с учетом вероятного изменения независимых параметров. При этом разрабатываемая методика должна удовлетворять принципу инерционного развития, при котором прогноз будущего осуществляется исходя из настоящего состояния динамики водопотребления. Исследования в этом плане могут способствовать установлению картины истинного состояния водопотребления городов на основе экстраполяции от настоящего до прогноза водопотребления в будущем. Принятый подход в оценке информации о ретроспективе водопотребления направлен на выявление взаимосвязанных и взаимообусловленных факторов, характерных для респектабельных населенных мест, расположенных в различных природно-климатических условиях, неодинаковой орографии. Вместе с тем эти факторы определяют развитие водоснабжения, аккумулируют в себе информацию о предполагаемом в будущем водопотреблении. Из 126 исследованных городов бывшего СССР с общей численностью населения 75,083 млн чел. базовыми, для ориентации в оценке фона удельного среднесуточного водопотребления, были выбраны поселок городского типа Кочеток в Харьковской области и сам Харьков с численностью населения соответственно 0,004 и 1,554 млн человек.

В этих населенных пунктах имеют место стабильный климат, приток инсоляции и тепловой режим, у них одинаковы географическое положение и высотное расположение над уровнем моря, благоприятные гидрологические условия. При этом они значительно разнятся по числен-

ности и плотности населения, по размерам застройки населенного места, степени благоустройства, ореолу антропогенного загрязнения, уровню обеспеченности жилплощадью, водоемкости промышленности и т. д. Объединяет их достигнутый уровень водосбережения при том, что Харьков — крупный административный, индустриальный, научный и культурный центр, третий в бывшем СССР (после Москвы и Санкт-Петербурга) центр машиностроения. Водопотребление на промышленные нужды в 1984 г. составило: для Кочетка — 7,4 %, для Харькова — 13,9 % общего водопотребления. Эти города обеспечивались водой круглосуточно.

Гидрографическая сеть Кочетка и Харькова относится к бассейну реки Северский Донец — наиболее крупного притока Дона.

В основу метода расчета водопотребления положена многофакторная математическая модель, описывающая водопотребление с учетом природно-климатических условий городов. На начальном этапе построения модели удельного среднесуточного водопотребления (1984 г.), приходящегося на одного жителя города, был создан набор данных по параметрам, описанным ниже, для последующей обработки на ЭВМ. Фактическое удельное среднесуточное водопотребление на одного жителя города вычислялось на базе статистических отчетных данных водоканализационных хозяйств городов бывшего СССР, расположенных в различных природно-климатических условиях (по состоянию на 1984 г.), по формуле

$$q_{i\text{факт}} = \frac{W_i^{\Gamma}}{n_i N_i}, \text{ м}^3/\text{сут}, \qquad (4.1)$$

где $W_i^{\Gamma}$ — подача воды городу в 1984 г., млн м$^3$;
$n_i$ — количество дней в базовом году, равное 366;
$N_i$ — численность населения города, млн чел.

Фактическое удельное среднесуточное (за 1984 г.) водопотребление является общим, поскольку автоматически учитывает в объеме поданной городу воды не только все ее потери, но и нерациональные расходы, а также расходы воды на собственные нужды водохозяйственных систем города, промышленности, на нужды пожаротушения и т. д. В качестве базового был принят 1984 г., поскольку хозяйство страны в этом году в целом работало стабильно, а спад в бывшем СССР еще не наступил.

Базовой моделью для идентификации городов и ориентации рационального минимального общего удельного среднесуточного водопотребления принят расположенный в 40 км от Харькова компактный Кочеток с благоприятной окружающей средой и населением 4100 человек. В нем достаточно разнообразных мест для приложения труда, развито культурно-бытовое обслуживание, здесь имеется хорошая рекреационная зона. Значительная часть населения работает в системе КП «ПТП «Вода» на крупнейших сооружениях кондиционирования воды мощностью 750 тыс. м$^3$ в сутки, расположенных в самом поселке. Работники, проживающие в одно- и пятиэтажных благоустроенных жилых домах, как правило, заботятся о водосбережении, стремятся не допускать утечек и непроизводительных расходов воды. Выбор этого населенного пункта в качестве контрольной модели удельного среднесуточного водопотребления обусловлен тем, что от других населенных пунктов его отличает только небольшая численность населения, а такие параметры, как селитебная территория, развитие производительных сил, градообразующие, архитектурно-планировочные особенности, производственная, социальная инфраструктура, этажность, размер застройки и природно-климатические условия, — аналогичны прочим регионам.

В соответствии с нормативными документами [247] территория СССР подразделялась на четыре строительно-климатические зоны, четыре климатических района и 16 климатических подрайонов. Как известно [249], в строительстве и в системе водоснабжения существует несколько режимов эксплуатации жилья и водохозяйственных систем, а следовательно, должны быть различными уровень водопотребления, требования к строительству комплекса сооружений кондиционирования воды и т. д. Минимальная стоимость строительства 1 м$^2$ общей площади была принята для климатических районов IIБ и IIВ, которые взяты в качестве базовых при сопоставлении с другими климатическими районами [247]. Таким образом, Кочеток и Харьков по климатическим условиям находятся в равном положении. Динамичные природные процессы, которые происходят и могут происходить на определенной территории

в результате ее технического использования городами, влияют также на климат, ухудшают экологическую ситуацию, что приводит к изменению водопотребления.

Расчет удельного среднесуточного водопотребления $q$ в адекватных природно-климатических условиях в реальном масштабе времени по Харьковской области осуществлялся по данным за 1984 г. согласно формуле

$$q = 37{,}785 ln N + 289{,}47, \qquad (4.2)$$

где $N$ — численность населения, млн чел.

Указанная формула получена по методу наименьших квадратов с использованием статистических данных о реальном водопотреблении в городах с различной численностью населения.

Характер зависимости (4.2) свидетельствует о том, что с ростом численности населения в городах увеличивается и удельное среднесуточное водопотребление (рис. 4.1).

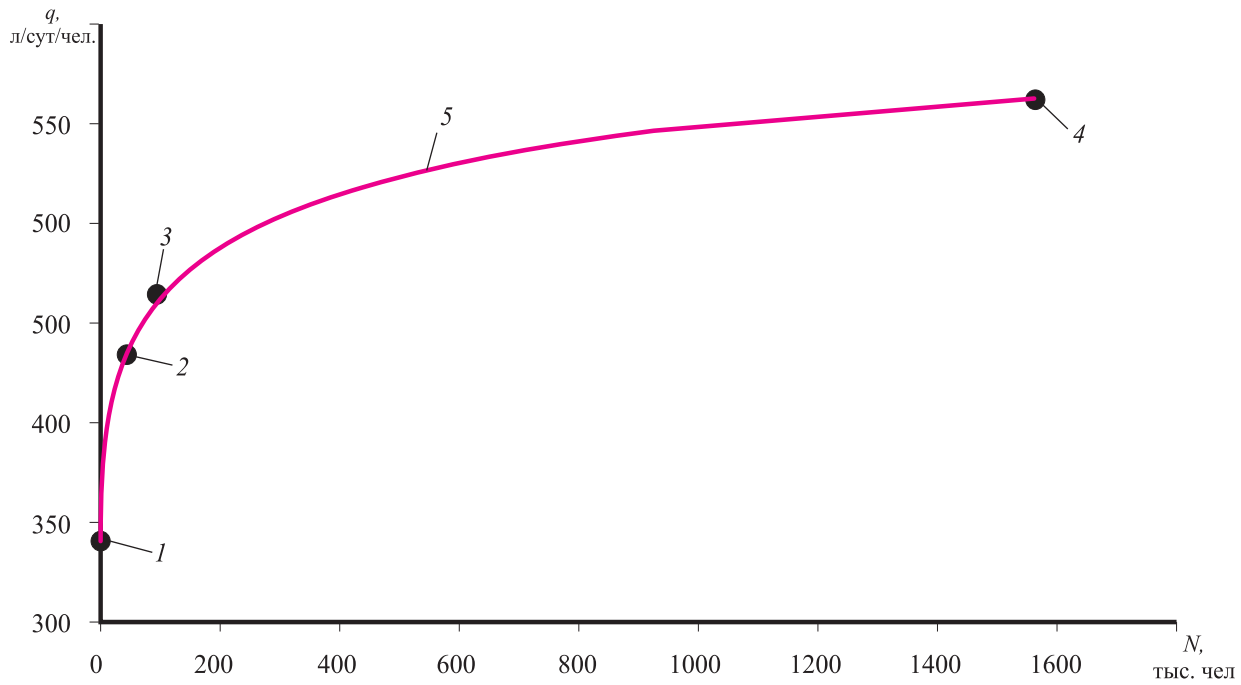



Рис. 4.1. Удельное среднесуточное водопотребление в населенных пунктах Харьковской области с близкими природно-климатическими условиями: • — фактическое удельное водопотребление: *1* — Кочеток ($N$=4); *2* — Чугуев ($N$=37); *3* — Лозовая ($N$=64); *4* — Харьков ($N$=1554); *5* — расчетное удельное водопотребление

Особое значение приобретает качественная оценка зависимости удельного среднесуточного водопотребления от многих присущих каждому городу факторов, когда метеорологические условия, характеризующие состояние атмосферы и гидросферы, различны. Основные физические процессы в жилом фонде городов связаны с комфортом, который обеспечивается искусственными и естественными условиями переноса тепла, влаги и воздуха. Вне жилого фонда комфортность жизни человека зависит в первую очередь от естественно меняющихся погодных условий и климата.

Растущее масштабное антропогенное загрязнение городов заметно влияет на погоду. Это искусственное воздействие, происходящее в результате жизнедеятельности человека, вызвало так называемый «парниковый эффект» [29, 105, 121, 337—339, 360].

Начало глобального изменения климата на Земле из-за повышения температуры, изменение интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца, достигающего земной поверх-

ности, и многое другое влияют на водопотребление. Эти и другие факторы были учтены в их взаимосвязи при разработке метода расчета водопотребления (рис. 4.2).

На первом этапе исследовали влияние каждого из факторов на удельное среднесуточное водопотребление городов обособленно от других факторов. При этом ставилась задача изучить механизм и процессы, которые позволят впоследствии разработать методику определения нормативов регулирования водопотребления в городах. При изучении парных зависимостей величины водопотребления от каждого из исследованных факторов не ставилась задача количественных оценок, поэтому доверительные интервалы регрессии на этом этапе исследований не строили, а только определяли характер влияния того или иного фактора на величину водопотребления и подбирали наиболее подходящую форму нелинейной связи. Построение доверительного интервала регрессии выполнялось на следующем этапе исследования при получении регрессионной модели, учитывающей совместное влияние всех существенных факторов, так как именно многофакторная модель предназначена для количественного расчёта водопотребления в городах.

В результате проведенных исследований выявлено множество факторов, которые оказывают влияние на режим водопотребления в городах, расположенных в различных географических широтах.

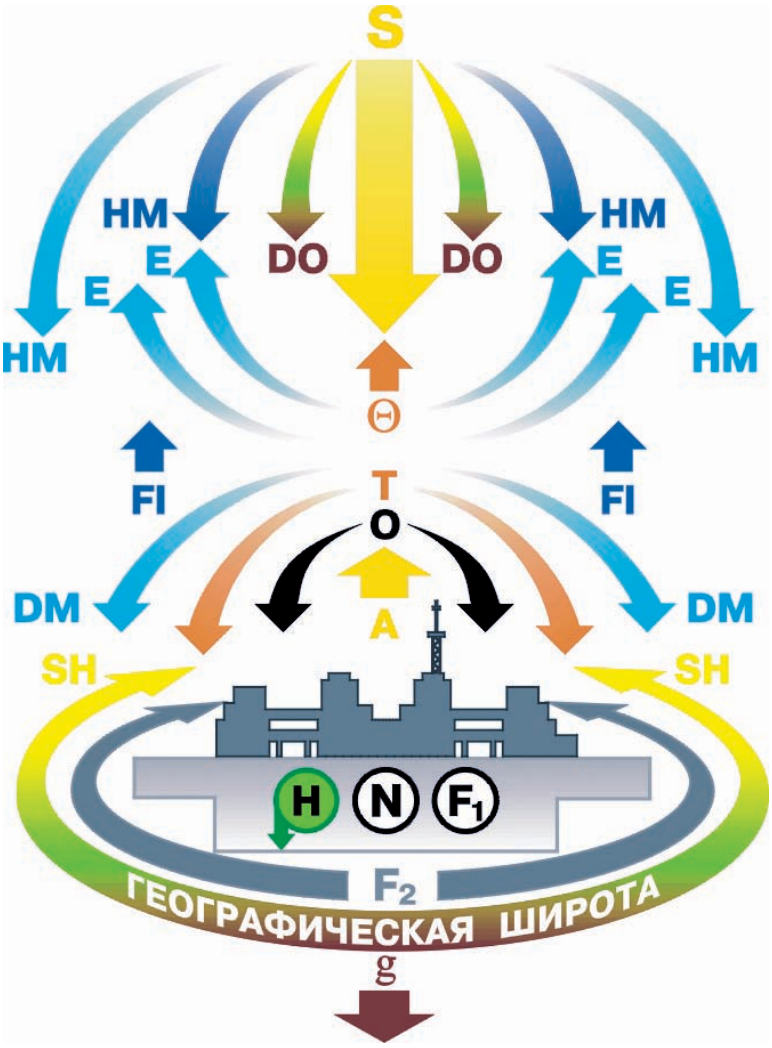



Рис. 4.2. Модель учета градостроительных и природно-климатических условий для исследования водопотребления

В качестве основных были выбраны следующие факторы: $S$ – годовая сумма солнечной радиации, ккал/см$^2$; $FI$ – относительная влажность, %; $H$ – геодезическая высота расположения города над уровнем моря, м; $HM$ – среднегодовое количество осадков с поправками к показаниям осадкомера, мм; $g$ – ускорение свободного падения, м/с$^2$,

$\Theta$ — термодинамическая температура, К; $N$ — численность населения города, млн чел.; $F_1$ — общая жилая площадь на одного жителя города, м$^2$; $A$ — среднегодовое альбедо, %; $E$ – годовая упругость водяного пара в городе, мб; $O$ — ореол загрязнения городов по данным космической съемки за ретроспективный 1984 г., км$^2$; $F_2$ — площадь застройки города по данным дешифровки космической съемки городов за 1984 г., км$^2$, $SH$ — географическая широта расположения городов, град., $DO$ — географическая долгота расположения городов, град., $T$ — сумма среднесуточных температур воздуха в городах выше 0 °С, °С , $DM$ — продолжительность периода со среднесуточной температурой ≤ 0° в днях.

Исследуемые факторы характеризуются значительной изменчивостью, что иллюстрируется гистограммами распределения их значений (рис. 4.3 и 4.4).

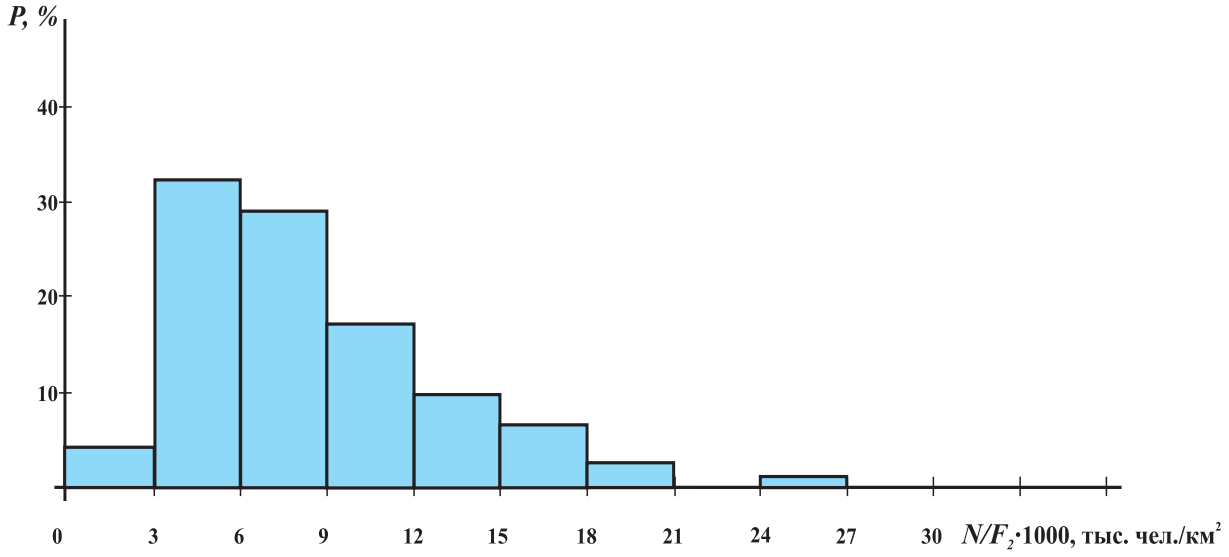



Рис. 4.3. Гистограмма плотности населения

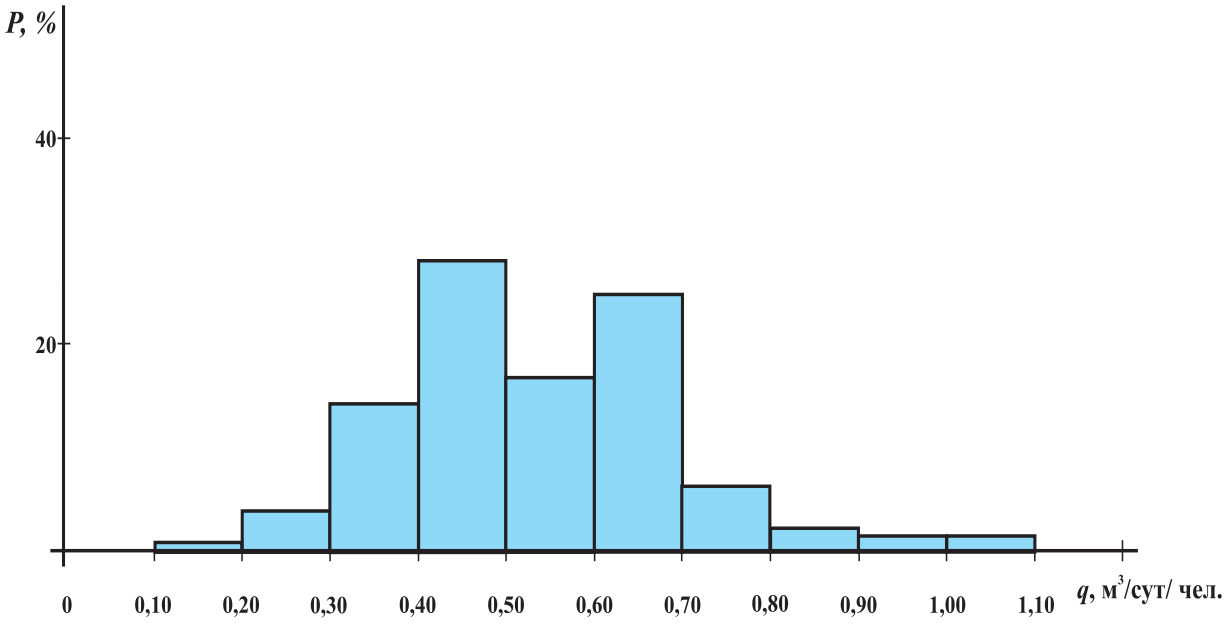



Рис. 4.4. Гистограмма расчетного удельного среднесуточного (за 1984 г.) водопотребления в промышленных центрах СССР

Указанные или подобные им гистограммы использовались при разработке метода расчета водопотребления, предложенного в данной книге.

## 4.2. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В ГОРОДАХ НА ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Известно [36, 48, 132, 230, 228], что процессы, происходящие в организме человека, и сам механизм его физиологических функций (кровеносная, дыхательная, нервная, мышечная системы) поддерживаются системой терморегуляции и оптимизируются в очень узком диапазоне температур. Это крайне необходимо для выживаемости человека и направлено на обеспечение равновесия, или гомеостаза, в широком диапазоне параметров окружающей его среды. Отклонение от диапазона температуры, необходимой для жизнедеятельности человека, может вызвать стрессовое состояние, вплоть до летального исхода. Основываясь на этих предпосылках, при моделировании прогноза удельного водопотребления на одного жителя в первую очередь исследовали влияние термодинамической температуры Θ (Θ=t °C+273,15) (табл. Б.1 приложения Б) на общее удельное среднесуточное водопотребление в городе, зависящее от сознательных и бессознательных действий, а также от процессов адаптации человека. Выявленная корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления $q$ от среднегодовой температуры Θ видна из рис. 4.5. Здесь и далее на рисунках цифрами обозначены номера городов, указанные в табл. Б.1 приложения Б.

Была построена корреляционная зависимость

$$q = 167,543 + 0,00075\Theta^2 - 13,5\sqrt{\Theta}\ , \text{м}^3/\text{сут}, \qquad (4.3)$$

где Θ — среднегодовая температура внешней среды по шкале Кельвина, К.

Корреляционную зависимость $q=f(\Theta)$, представленную на рис. 4.5, назовем линией водопотребления (ЛВ). Как видно, при значениях среднегодовой температуры в городах, равной Θ ≈ 273К, ЛВ достигает своего экстремума. Точка минимума разграничивает характер изменения общего удельного среднесуточного водопотребления в городах бывшего СССР, обусловленного температурным режимом. Ветви ЛВ от точки минимума при Θ>273К и Θ<273К уходят с различным радиусом кривизны. Чем больше приращение температуры (в условиях Θ>273К), тем круче линия водопотребления, что свидетельствует о растущем в городах спросе на воду для различных нужд, например, для обеспечения терморегуляции организма человека, исходя из его защитных свойств, для покрытия непроизводительных, нерациональных и безвозвратных потерь воды в промышленных центрах, организации комфортных температурно-влажностных условий, включая использование воды для кондиционирования, и т. д.

При Θ<273К линия водопотребления от точки минимума уходит вверх более полого. Это свидетельствует о том, что с увеличением количества морозных дней расход воды в городах растет в основном за счет отопления, а уровень водопотребления для других нужд снижается.

Наши исследования [165, 189] изменений общего удельного среднесуточного водопотребления в городах бывшего СССР, которые происходят при снижении температуры в зимний период — в январе ($\Theta_1$=$t_1$ °C+273,15) и повышении в летний — в июле ($\Theta_7$=$t_7$ °C+273,15) (табл. Б.1 приложения Б), свидетельствуют о резкой неравномерности поведения линии водопотребления. Следовательно, водопотребление обусловлено неравномерным распределением света и тепла в различных географических широтах Земли в течение года. Указанное различие иллюстрируется графиками зависимости водопотребления от среднемесячных температур за январь и июль $q=f(\Theta_1)$ и $q=f(\Theta_7)$ (рис. 4.6 и 4.7). Соответствующие уравнения регрессии имеют вид

$$q = 5,889 + 0,721\cdot 10^{-6}\Theta_1^3 - 0,267\cdot 10^{-3}\Theta_1^2\ , \text{м}^3/\text{сут}; \qquad (4.4)$$

$$q = -1,9 + 0,96310^{-7}\Theta_7^3\ , \text{м}^3/\text{сут}, \qquad (4.5)$$

где $\Theta_1$ — среднемесячная температура за январь, К;
$\Theta_7$ — среднемесячная температура за июль, К.

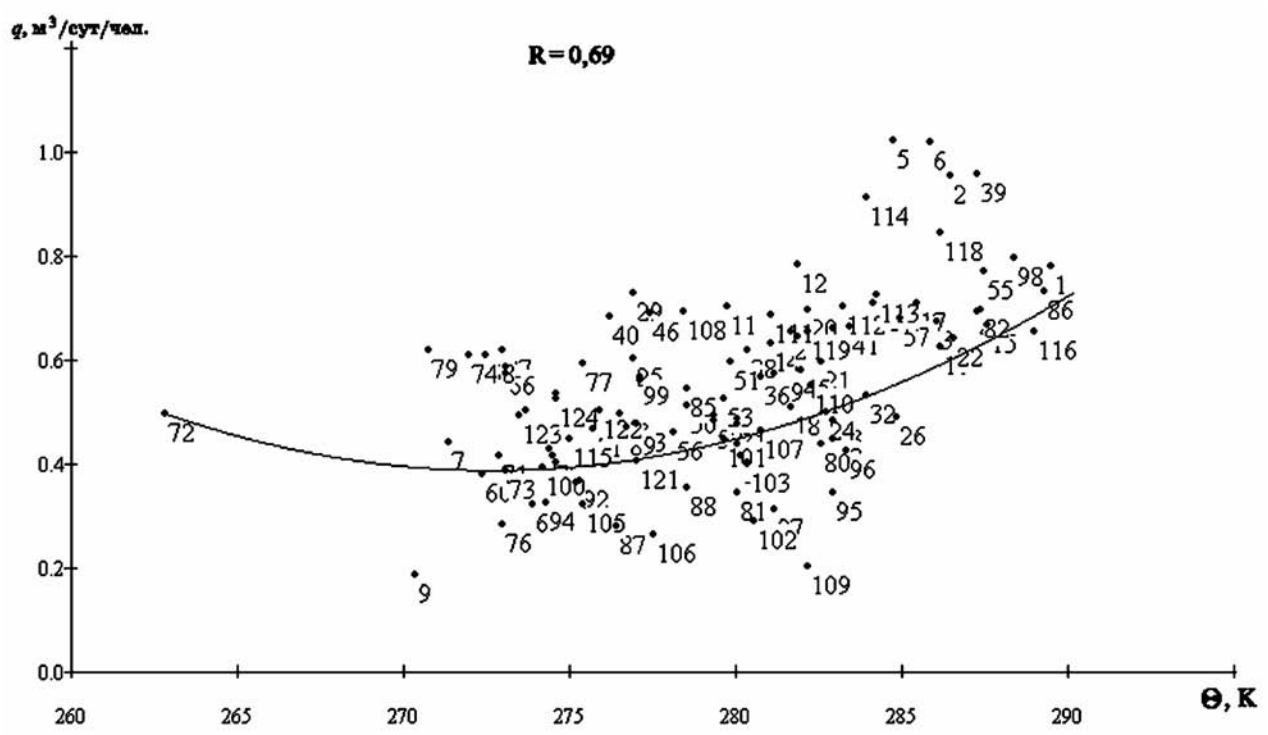



Рис. 4.5. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодовой температуры воздуха

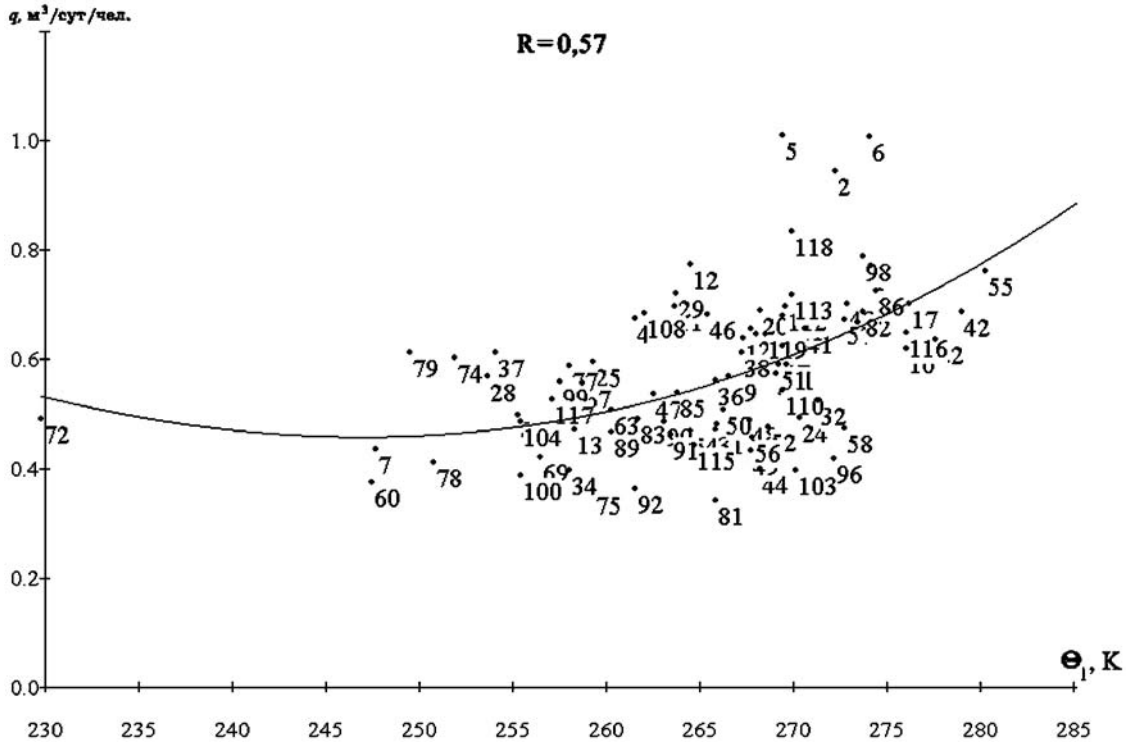



Рис. 4.6. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднесуточной температуры в январе

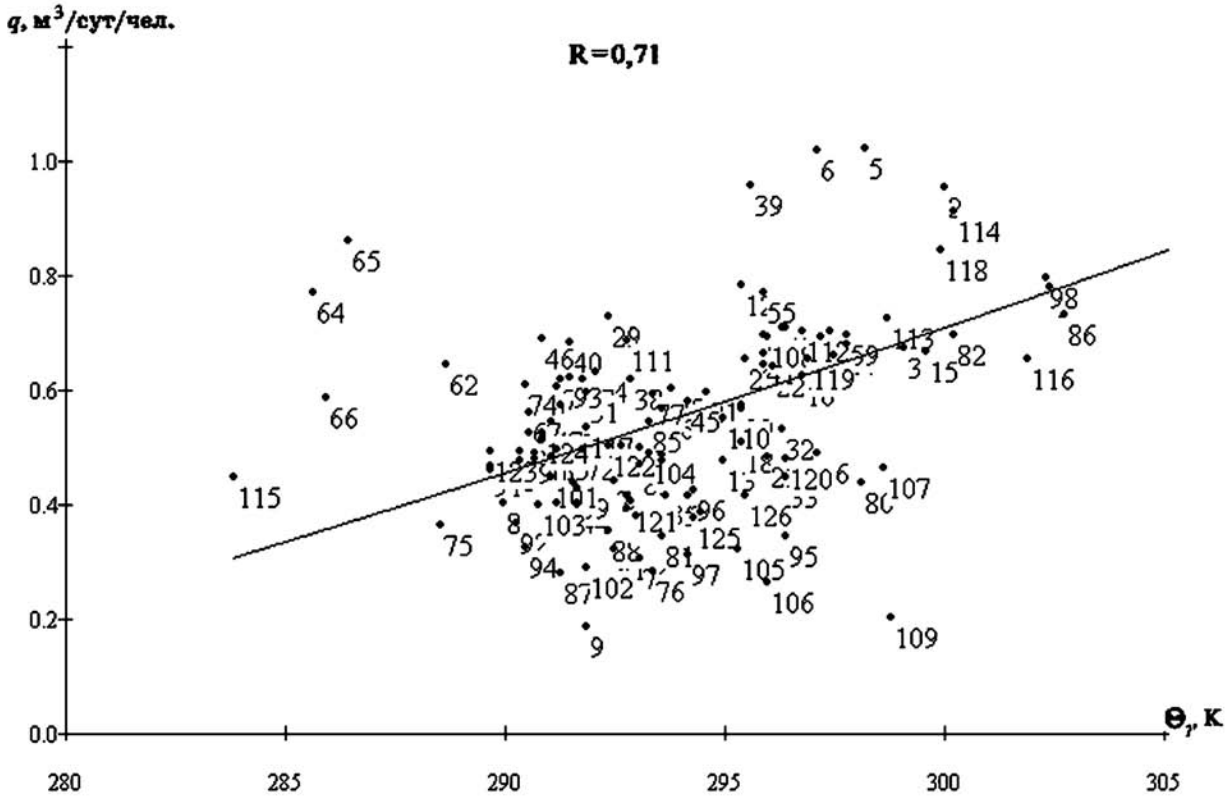



Рис. 4.7. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднесуточной температуры в июле

Неравномерное изменение температуры в городах существенно влияет не только на водопотребление человека, его жизнедеятельность, но и на животный мир, формирование почвенного покрова и растительности. Частота изменения температуры в городах зависит от активности распределения на планете солнечной энергии, от количества влаги и иных факторов, участвующих в этих процессах. Они также являются главными показателями в оценке биоклимата.

## 4.3. ВЛИЯНИЕ ГОДОВОГО РАДИАЦИОННОГО БАЛАНСА И АЛЬБЕДО НА УДЕЛЬНОЕ СРЕДНЕСУТОЧНОЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ

Огромное значение для тех явлений и процессов, которые происходят на Земле и в атмосфере, имеет солнечная радиация. Ее уровень на земной поверхности обусловливается, в основном, двумя астрономическими факторами — высотой положения Солнца и продолжительностью дня.

Основываясь на материалах актинометрических наблюдений метеостанций, можно сказать, что радиационные факторы теплообмена на Земле оказывают существенное воздействие на формирование теплового режима человека, образование различной температуры [92–95, 154, 221, 228, 274].

Известно [32, 228, 287], что количество солнечной энергии, получаемое каждым городом, зависит от угла падения лучей, высоты Солнца на протяжении дня, от высоты расположения города над уровнем моря, широты и продолжительности облучения, атмосферных осадков. Значительное поглощение солнечной энергии в городах происходит вследствие антропогенных загрязнений воздушной среды. Суммарная годовая радиация, принятая в наших иссле-

дованиях, более стабильна, так как колебания прямой и рассеянной радиации часто имеют обратные знаки в процессе обращения Земли вокруг своей оси за сутки и вокруг Солнца за год. Само распределение годовой суммарной радиации близко к широтному. Осенью, с уменьшением высоты положения Солнца и продолжительности дня, приход суммарной радиации значительно уменьшается, при этом большое влияние на изменение суммарной радиации и ее составляющих во времени оказывает облачность.

В то же время интенсивность годовой суммы радиации зависит от некоторых свойств ландшафта, в частности, от отражающих свойств подстилающей поверхности — альбедо [22, 154]. В холодный период года альбедо выше, а его минимальное значение приходится на апрель — май и в целом зависит от географического расположения города. Причина таких явлений — изменение подстилающей поверхности. Несмотря на широкий диапазон значений альбедо, географическое расположение города определяет альбедо, свойственное каждой зоне.

Годовые суммы радиации и среднегодовое альбедо в каждом городе, вследствие диффузионных потоков радиации от различных городских объектов, формируют особый тепловой режим человека, отличный от условий открытой местности, что также влияет на общее удельное среднесуточное водопотребление [32, 228].

Автором исследовано влияние месячной (за январь и за июль) среднегодовой суммы солнечной радиации и среднегодового альбедо (табл. Б.1 приложения Б) на изменение общего удельного среднесуточного водопотребления в городах страны. Получены эмпирические зависимости, изображенные на рис. 4.8–4.10:

$$q = 0,371 + 0,170 \cdot 10^{-4} S^2, \text{ м}^3/\text{сут}; \tag{4.6}$$

$$q = 0,458 + 0,0427 S_1, \text{ м}^3/\text{сут}; \tag{4.7}$$

$$q = 0,2817 + 0,1163410^{-2} S_7^2, \text{ м}^3/\text{сут}, \tag{4.8}$$

где $S$ – годовая сумма солнечной радиации в городах, ккал/см$^2$;

$S_1$ – сумма солнечной радиации в городах за январь, ккал/см$^2$;

$S_7$ — сумма солнечной радиации в городах за июль, ккал/см$^2$.

Линии зависимости удельного среднесуточного водопотребления от суммарной солнечной радиации, описанные уравнениями (4.6)–(4.8) при коэффициентах корреляции, равных 0,56; 0,47; 0,62, показывают, что с увеличением годовой и месячной сумм солнечной радиации в городах растет удельное среднесуточное водопотребление. Отметим, что коэффициенты корреляции, составляющие 0,47 — 0,62, и значительный разброс точек на рисунках вовсе не означают слабость корреляционной связи. Они лишь свидетельствуют о том, что рассматриваемая связь водопотребления и солнечной радиации не является однопараметрической. Как показано далее, учет других независимых параметров приводит к резкому росту коэффициента множественной корреляции.

Один из элементов радиационного баланса — альбедо, характеризующее отражательную способность поверхности, также влияет на водопотребление. Выявленная корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодового альбедо (рис. 4.11) описывается уравнением

$$q = 0,195 + \frac{9,54}{A}, \text{ м}^3/\text{сут}, \tag{4.9}$$

где $A$ — среднегодовое альбедо, %. При этом коэффициент корреляции составляет $R = -0,45$.

Таким образом, с увеличением среднегодового альбедо уменьшается общее удельное среднесуточное водопотребление. Как правило, высокое значение среднегодового альбедо относится к городам, расположенным в зонах тундры, лесотундры, тайги, в высокогорных районах. Развитие городов в степных зонах, пустынях и полупустынях, высокогорных областях усиливает процессы роста общего удельного среднесуточного водопотребления.

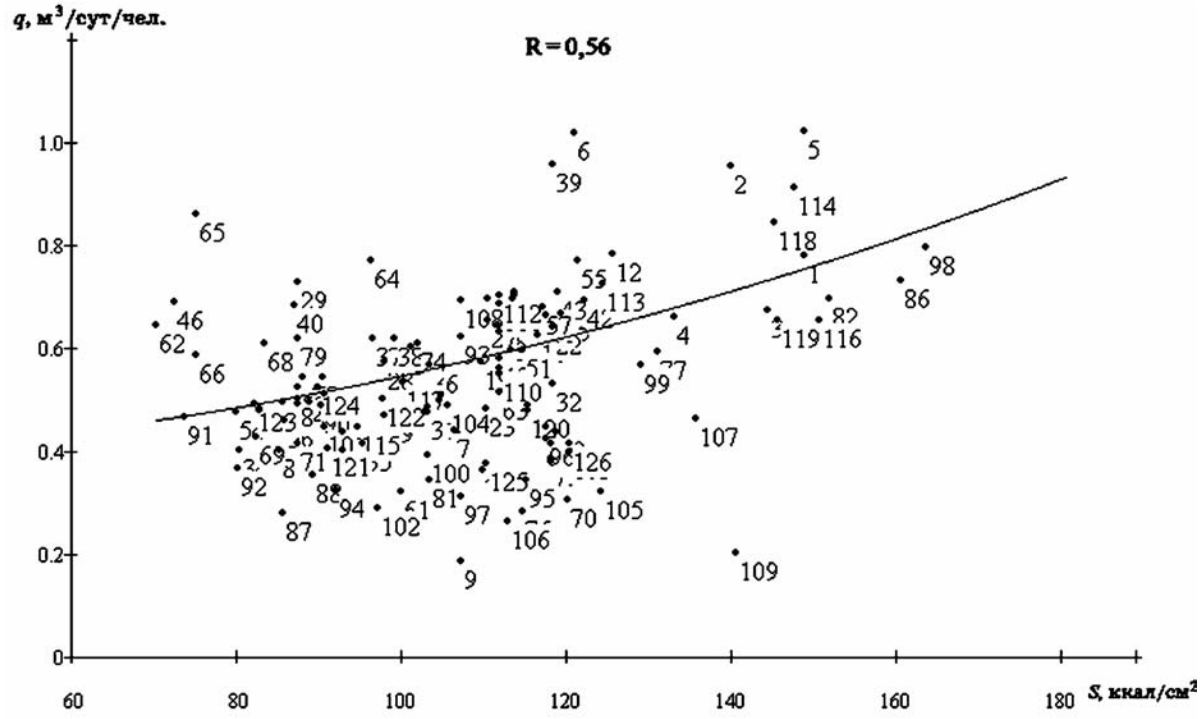



Рис. 4.8. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от годовой суммы солнечной радиации

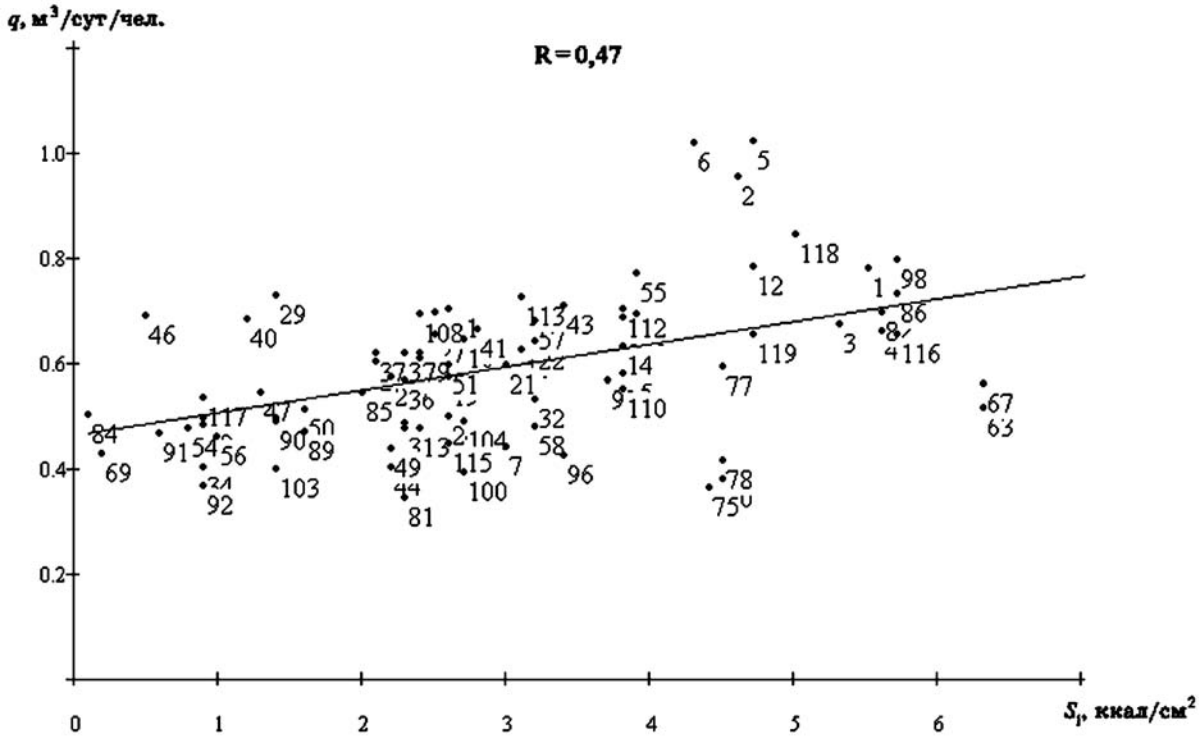



Рис. 4.9. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от суммы солнечной радиации за январь

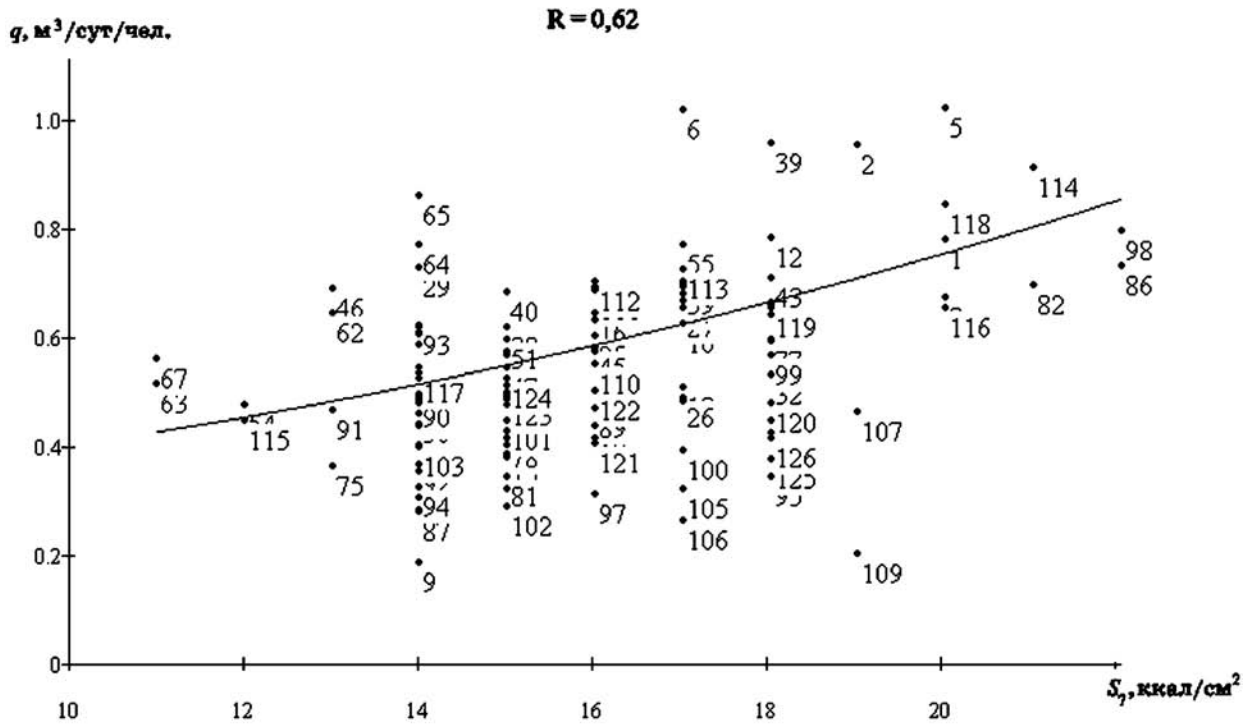



Рис. 4.10. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от суммы солнечной радиации за июль

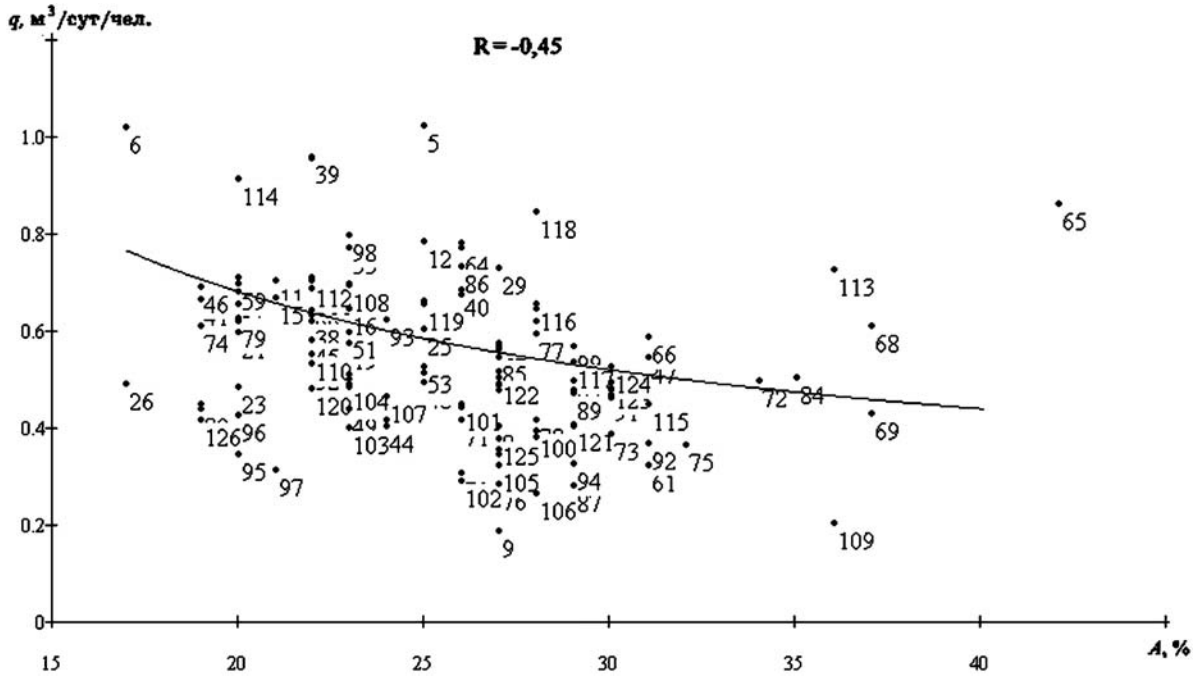



Рис. 4.11. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодового альбедо

## 4.4. ВЛИЯНИЕ УПРУГОСТИ ВОДЯНОГО ПАРА И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ НА ИЗМЕНЕНИЕ УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Содержание водяного пара в воздухе является составной частью водного баланса атмосферы и участвует во многих процессах жизнедеятельности человека. В зависимости от районов формирования воздушных трасс при адекватной температуре в воздухе может содержаться различное количество водяного пара [36]. Наряду с анализом влияния температуры, годовой суммы солнечной радиации и альбедо на изменение удельного среднесуточного водопотребления в промышленных городах страны исследовалось влияние упругости водяного пара и относительной влажности. Поскольку влажный воздух является смесью сухого воздуха и влаги, под воздействием солнечных лучей, частично поглощаемых водяным паром и частично рассеянных, а также за счет интенсивного поглощения водяным паром тепла, идущего от нагретой земли, происходит повышение температуры воздуха. Эти физические процессы тепло-, массообмена существенно влияют на терморегуляцию человека, температурно-влажностный режим города, тепловой комфорт или, наоборот, на дискомфорт человека, на формирование погоды и климата. При исследовании влияния влажности воздуха на водопотребление использовались характеристики среднегодовой упругости водяного пара, давления и относительной влажности по городам бывшего СССР (табл. Б.1 приложения Б).

Годовая динамика изменения упругости водяного пара, как и относительной влажности, существенно зависит от изменения температуры. Между температурой и упругостью водяного пара существует тесная корреляционная связь [36]. При повышении притока солнечной радиации вследствие теплопроводности увеличивается упругость водяного пара, достигая максимального своего значения в июле и минимального — в январе. Относительная влажность является показателем уровня насыщения воздуха водяным паром и в широких пределах меняется в течение года. Относительная влажность противоположна ходу температуры и упругости водяного пара и является индикатором сухости воздуха. Температура воздуха и характер подстилающего слоя в городах влияют на испарение воды с земной поверхности. В нижних слоях атмосферы образуется водяной пар с упругостью различной величины.

Процессы влагопереноса характеризуются сильной изменчивостью во времени, пространстве и скорости. Поэтому для анализа и интерпретации влияния упругости водяного пара и относительной влажности на изменение удельного среднесуточного водопотребления приняты показатели этих параметров за год. Корреляционные зависимости влияния среднегодовых упругости водяного пара и относительной влажности на удельное среднесуточное водопотребление (рис. 4.12 и 4.13) описываются уравнениями

$$q = 0,296 + 0,0338E,\ \text{м}^3/\text{сут}; \tag{4.10}$$

$$q = 1,285 - 0,974 \cdot 10^{-2} FI,\ \text{м}^3/\text{сут}, \tag{4.11}$$

где $E$ — среднегодовая упругость водяного пара в городах, мб;
$FI$ — среднегодовая относительная влажность в городах, %.

Линия зависимости общего удельного среднесуточного водопотребления в городах от изменений упругости водяного пара в течение года (рис. 4.12) описывается уравнением (4.10). Анализ данной зависимости позволяет утверждать, что с ростом упругости водяного пара в городах увеличивается спрос на воду (удельное среднесуточное водопотребление). Что касается влияния относительной влажности, то представленная на рис. 4.13 линия зависимости общего удельного среднесуточного водопотребления от относительной влажности, описанная уравнением (4.11), свидетельствует о том, что с ростом относительной влажности удельное среднесуточное водопотребление уменьшается.

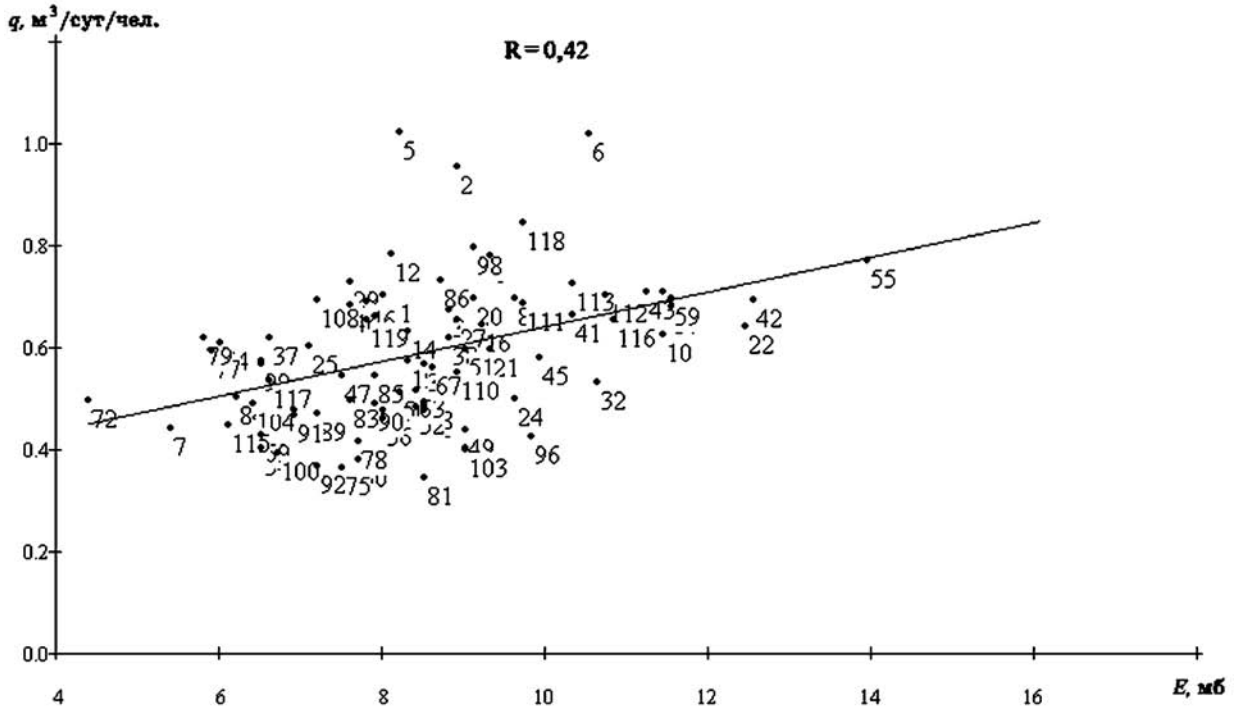



Рис. 4.12. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодовой упругости водяного пара

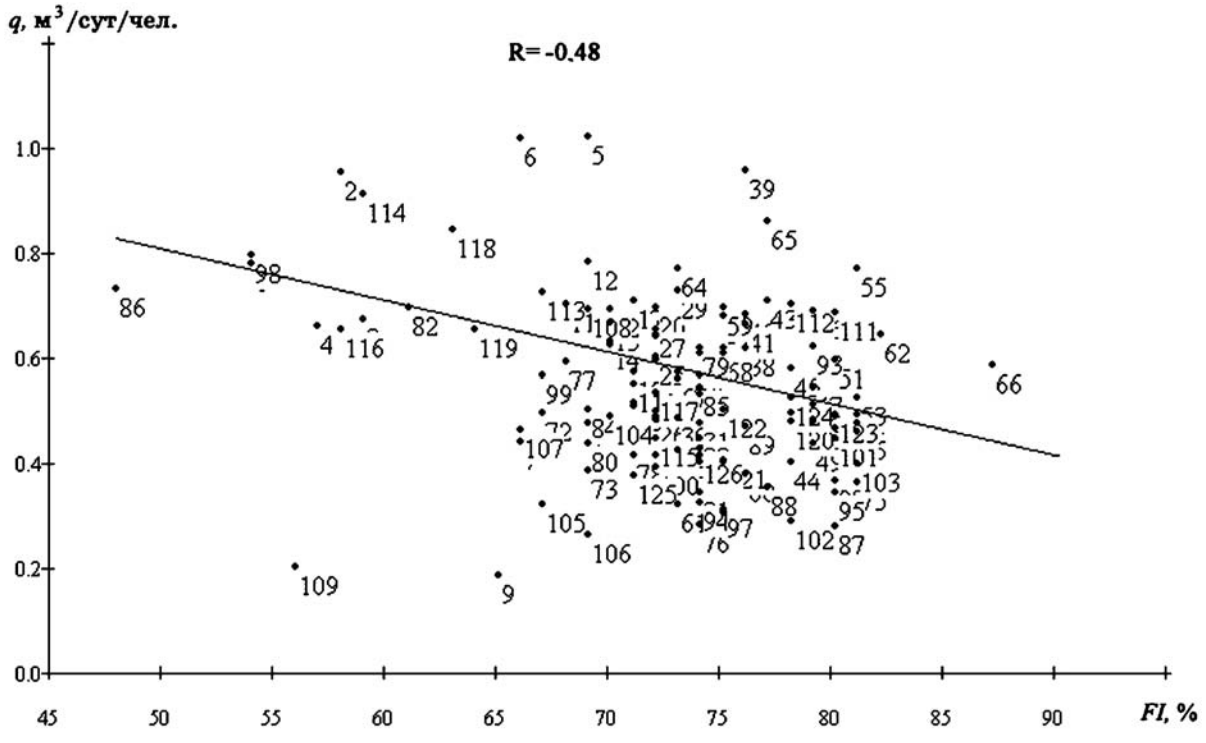



Рис. 4.13. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодовой относительной влажности

# 4.5. ВЛИЯНИЕ СРЕДНЕГОДОВОГО КОЛИЧЕСТВА ОСАДКОВ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОБЩЕГО УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Одним из наиболее важных элементов климата являются атмосферные осадки — приходная часть водного баланса суши. Количество осадков меняется каждый месяц, что существенно влияет на формирование растительности различных ландшафтов городов, на водо- и сельскохозяйственную деятельность. В СНГ имеются большие территории, где выпадает избыточное количество осадков, что связано в основном с влиянием температуры воздуха [83, 92–95]. В течение года их количество зависит от влагосодержания облаков и подоблачного слоя, термодинамической стратификации атмосферы. Интенсивность осадков как во времени, так и в пространстве значительно изменяется. Исследования влияния среднегодового количества осадков (табл. Б.1 приложения Б) на изменение общего удельного среднесуточного водопотребления выявили корреляционную зависимость (рис. 4.14), которая описывается уравнением

$$q = 0,512 + \frac{34,934}{HM},\ \text{м}^3/\text{сут}, \qquad (4.12)$$

где $HM$ — среднегодовое количество осадков в городах, мм.

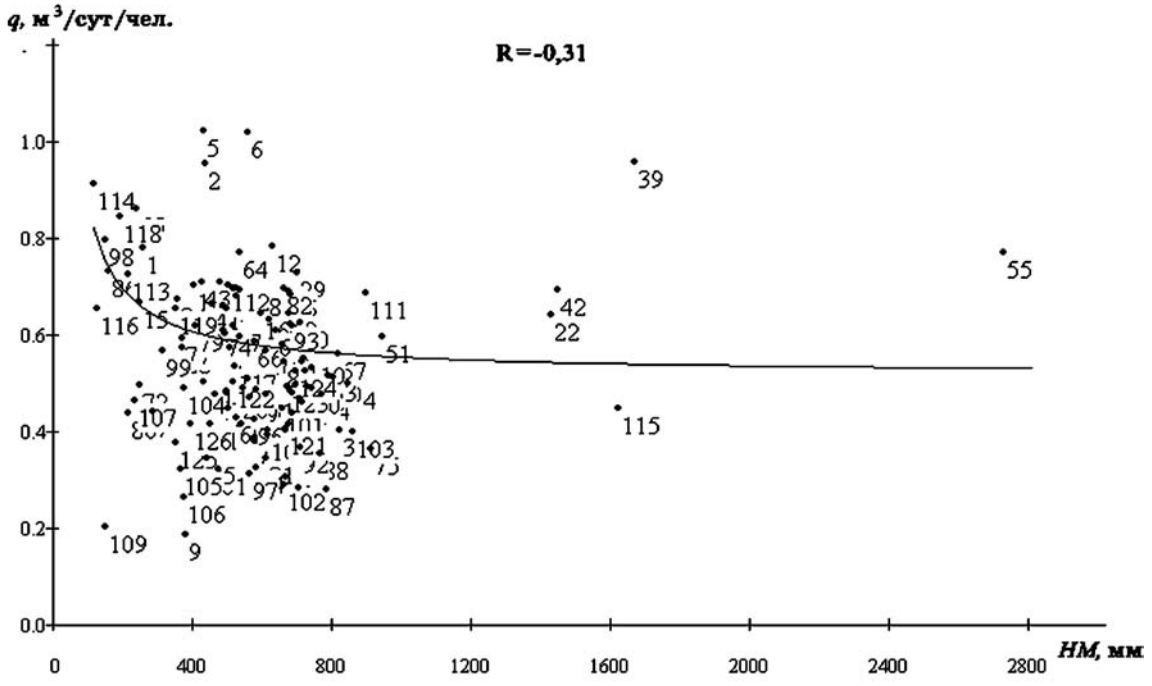



Рис. 4.14. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от среднегодового количества осадков

С увеличением среднегодового количества осадков в городах снижается спрос на воду у населения [193]. Это подтверждается корреляционной зависимостью между величиной $q$ и отношением объема среднегодового водосбора осадков, выпавших на всей площади застройки города ($HM\ F_2$), к общей жилой его площади ($NF_1$).

В приведенной на рис. 4.15 корреляционной зависимости $q = f(W)$, где $W = \left( \frac{HM\ F_2}{N\ F_1 \cdot 1000} \right)^{0,102}$ представляет собой величину, характеризующую среднегодовое количество осадков на всей территории города, отнесенное к жилой площади, где $HM$ — среднегодовое количество осадков в городе, мм; $F_2$ — площадь застройки города за ретроспективный 1984 г., км$^2$; $F_1$ — обеспеченность общей жилплощадью одного жителя города за ретроспективный 1984 г., м$^2$; $N$ — численность населения города за ретроспективный 1984 г., млн чел.

Полученная корреляционная связь $q = f(W)$ описана полиномиальным уравнением

$$q = 4,24634 - 4,71865W + 0,813W^2 + 0,474W^3, \text{ м}^3/\text{сут}. \quad (4.13)$$

В дальнейшем будем обозначать величину, вычисляемую по формуле (4.13), $QW$.

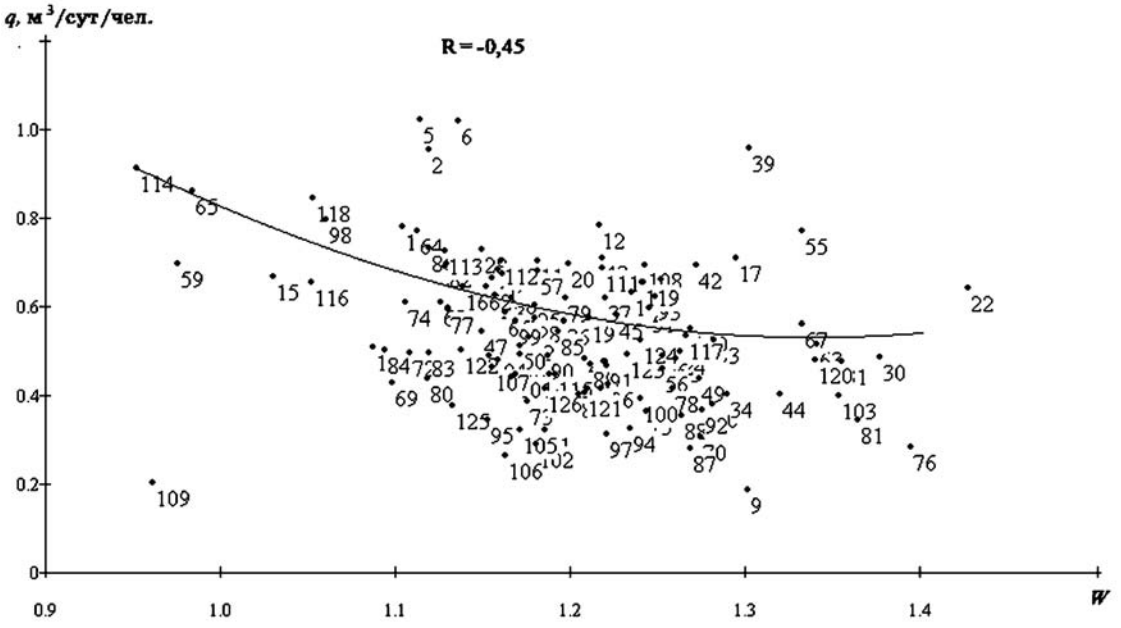



Рис. 4.15. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от отношения объема среднегодового водосбора осадков, выпавших на всей площади застройки города, к общей жилой его площади

## 4.6. ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОРЕОЛА ГОРОДСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ ОБЩЕГО УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ

Тенденция к дестабилизации окружающей природной среды, как саморазвивающейся экосистемы с присущими ей закономерностями, наблюдается в городах мира повсеместно [70, 82, 126, 304, 333]. Эмиссия загрязнений в атмосферу образует вокруг разных по величине городов значительные по размерам ореолы [74, 106, 280]. Об этом свидетельствуют спутниковые телевизионные изображения и картосхемы ореолов загрязнений, составленные по данным космических съемок за ретроспективный 1984 г. (рис. 4.16 — 4.19). На картосхемах площадь застройки каждого города представлена в виде затемненного пятна, контур ореола обозначен сплошной линией, а роза ветров — пунктирной.

Известны многие механизмы воздействия загрязнений в городах на окружающую среду. Обычно они характеризуются зависимостью от микроклимата городов и вещественно-энергетических показателей, отражают особенности потребления, привнесение и перераспределение различных веществ и энергии в процессе разных видов деятельности населения городов.

Идентификация и картографирование зон загрязнения снежного покрова в окрестностях городов — так называемых ореолов загрязнения — играют важную роль в охране природных ресурсов не только в связи с возможностью объективных оценок антропогенного воздействия на окружающую среду. Оценки площадей ореолов загрязнения, сделанные на основе космических снимков, важны также и для определения весомого экологического показателя — удельного среднесуточного водопотребления в городах.

Подтверждением этому являются результаты исследований (табл. 4.1 и 4.2, рис. 4.20 и 4.21), свидетельствующие о существовании зависимости между увеличением ореола загрязнения исследуемых городов и ростом численности населения и плотности застройки городов.

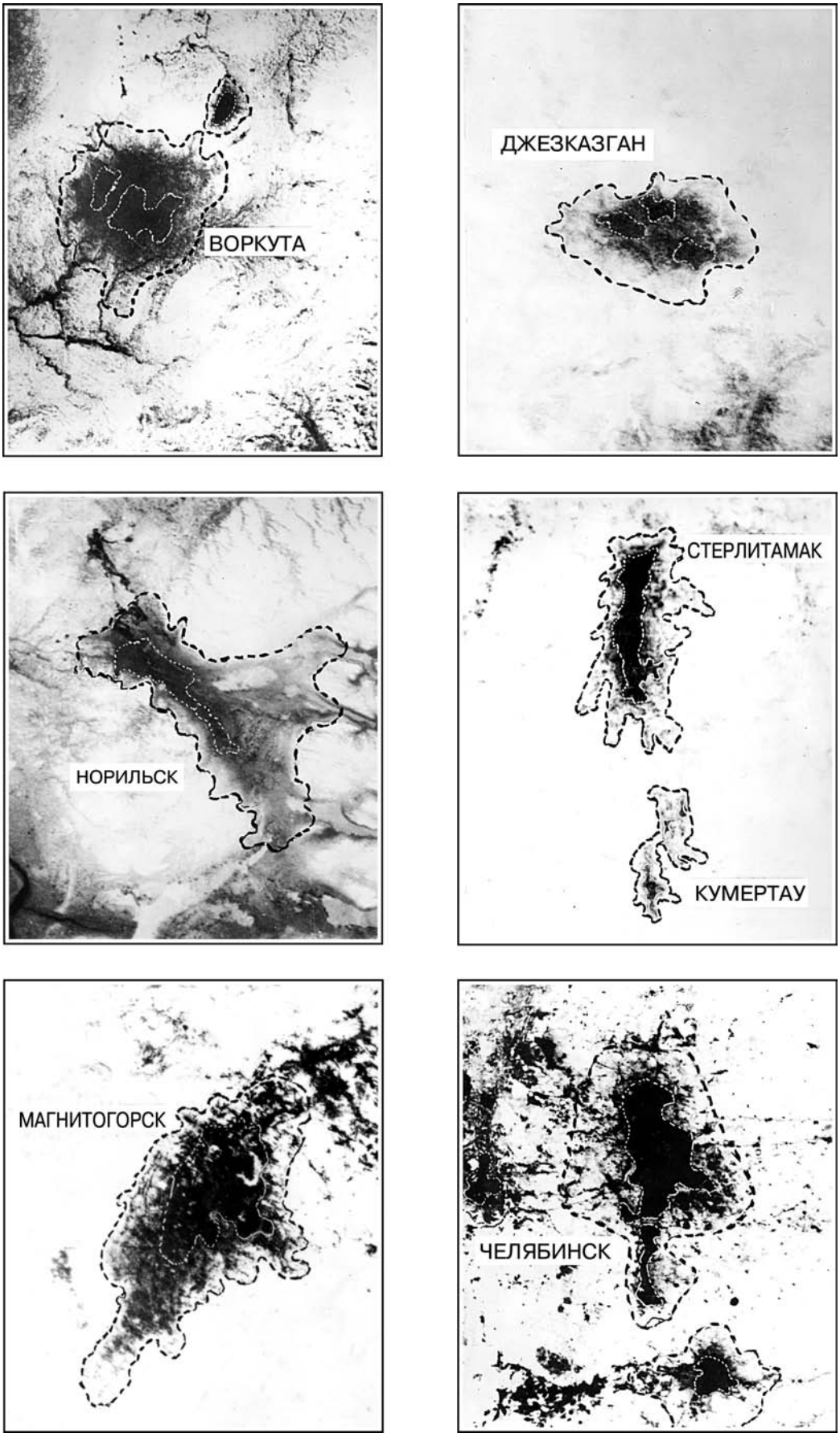



Рис. 4.16. Типичные телевизионные изображения ореолов вокруг сложившихся промышленных центров, сделанные с ИСЗ «Метеор»

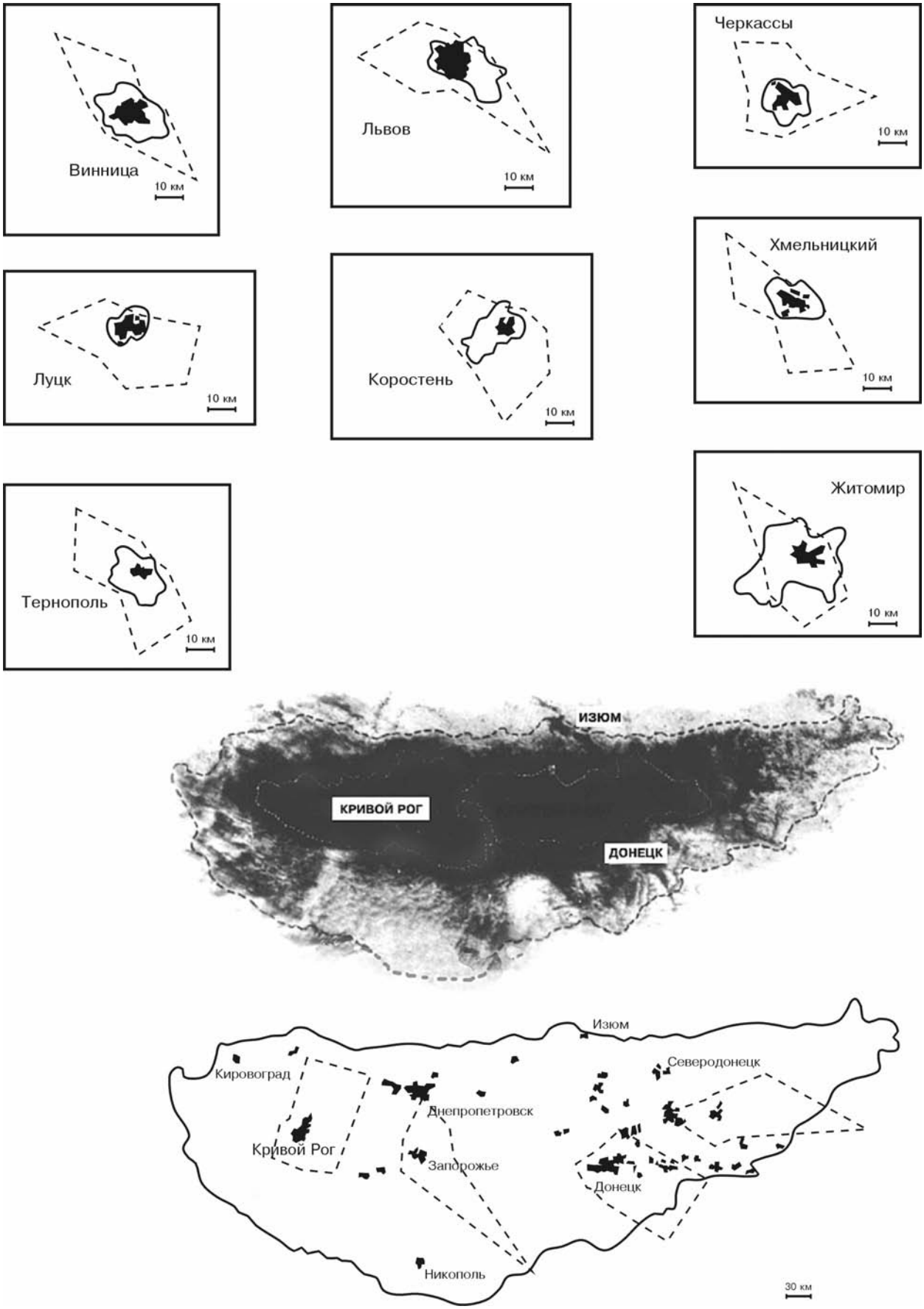



Рис. 4.17. Картосхема ореолов загрязнения снежного покрова для городов по результатам дешифровки телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор»

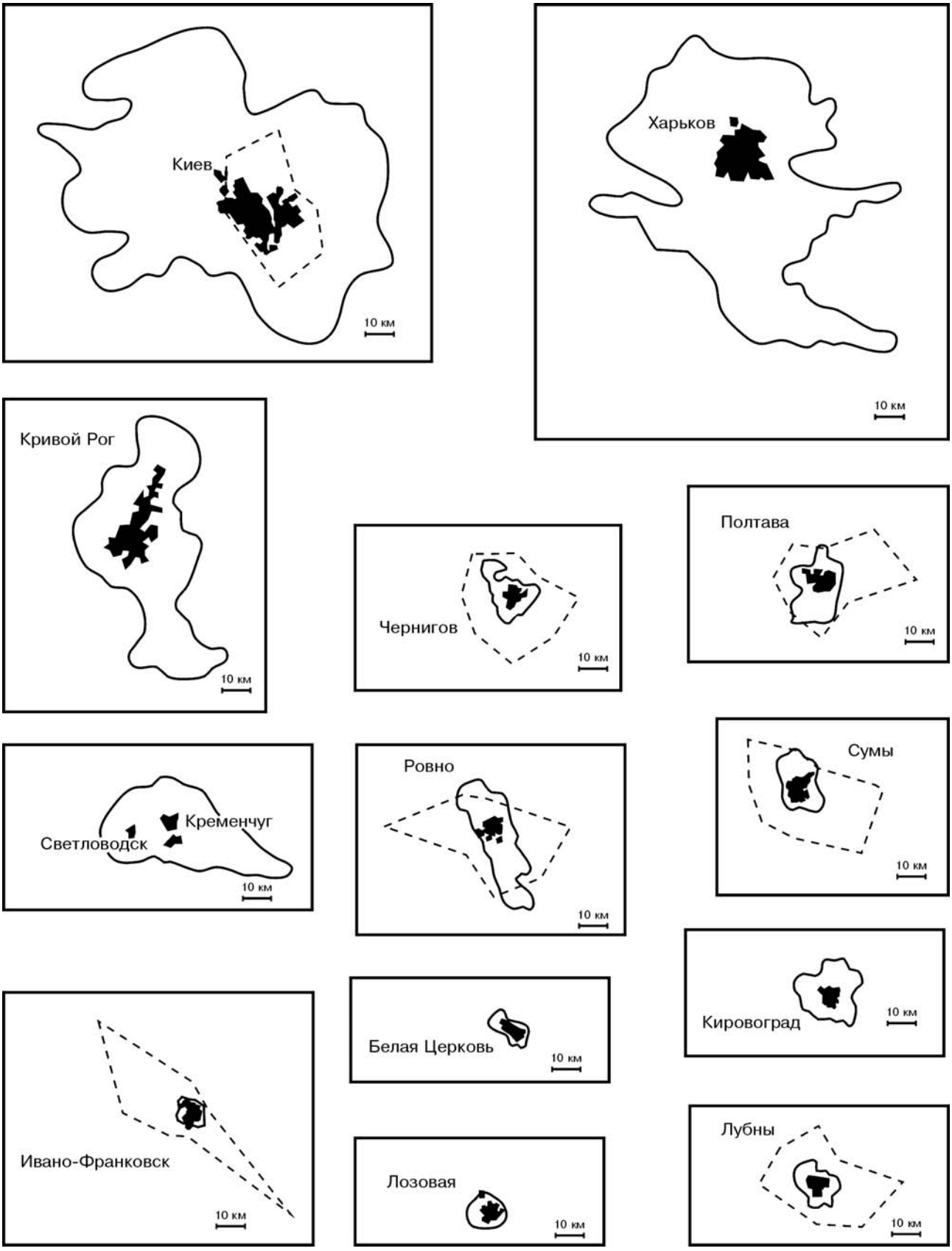



Рис. 4.18. Картосхема ореолов загрязнения снежного покрова для городов по результатам дешифровки телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор»

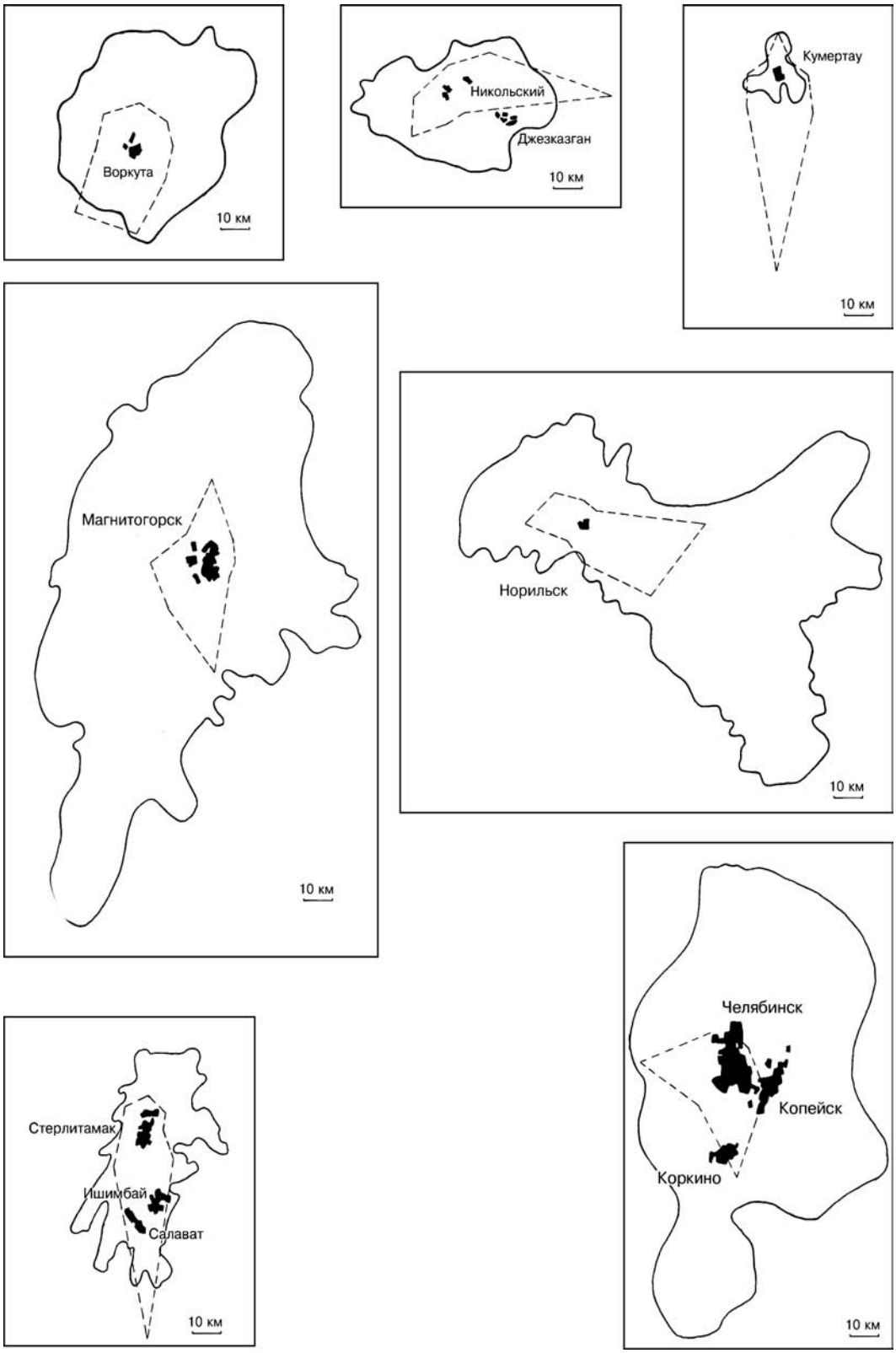



Рис. 4.19. Картосхема ореолов загрязнения снежного покрова для городов по результатам дешифровки телевизионных снимков с ИСЗ «Метеор»

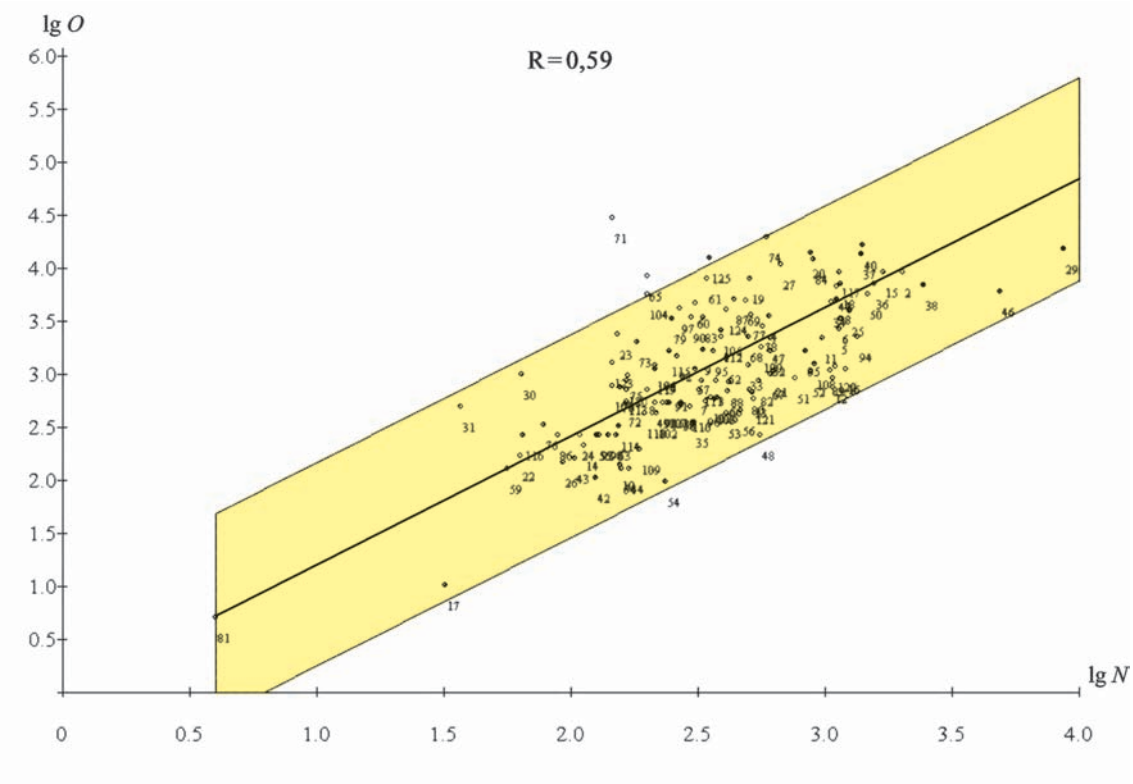



Рис. 4.20. Корреляционная зависимость между ореолом загрязнения и численностью населения

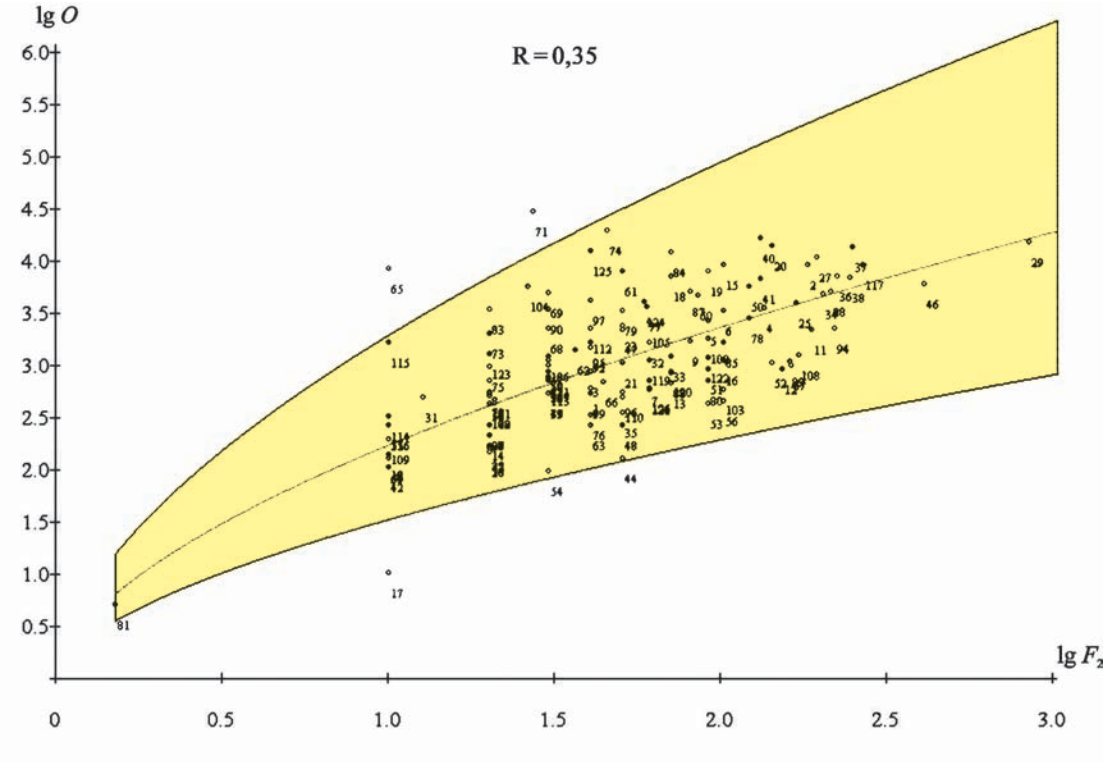



Рис. 4.21. Корреляционная зависимость между ореолом загрязнения и плотностью застройки

Таблица 4.1

**Средние значения ореола загрязнения городов на территории бывшего СССР в зависимости от численности населения**

| *N*, млн чел. | Ореол, км$^2$ | *N*, млн чел. | Ореол, км$^2$ |
|---|---|---|---|
| 0,004 | 5,3 | 4,15 | 15912,2 |
| 0,01 | 15,6 | 4,35 | 16787,2 |
| 0,05 | 100,9 | 4,55 | 17667,7 |
| 0,20 | 498,1 | 4,75 | 18553,4 |
| 0,35 | 946,2 | 4,95 | 19444,1 |
| 0,50 | 1423,5 | 5,15 | 20339,7 |
| 0,65 | 1921,7 | 5,35 | 21239,9 |
| 0,80 | 2436,4 | 5,55 | 22144,7 |
| 0,95 | 2964,9 | 5,75 | 23053,9 |
| 1,10 | 3505,1 | 5,95 | 23967,3 |
| 1,25 | 4055,7 | 6,15 | 24884,9 |
| 1,40 | 4615,4 | 6,35 | 25806,5 |
| 1,55 | 5183,5 | 6,55 | 26731,9 |
| 1,75 | 5952,8 | 6,75 | 27661,2 |
| 1,95 | 6734,2 | 6,95 | 28594,1 |
| 2,15 | 7526,7 | 7,15 | 29530,7 |
| 2,35 | 8329,4 | 7,35 | 30470,7 |
| 2,55 | 9141,4 | 7,55 | 31414,2 |
| 2,75 | 9962,2 | 7,75 | 32361,0 |
| 2,95 | 10791,1 | 7,95 | 33311,1 |
| 3,15 | 11627,7 | 8,15 | 34264,4 |
| 3,35 | 12471,5 | 8,35 | 35220,7 |
| 3,55 | 13322,2 | 8,55 | 36180,2 |
| 3,75 | 14179,4 | 8,75 | 37142,6 |
| 3,95 | 15042,9 | 8,95 | 37143,6 |

Таблица 4.2

**Средние значения ореола загрязнения городов на территории бывшего СССР в зависимости от площади застройки**

| $F_2$, км$^2$ | Ореол, км$^2$ | $F_2$, км$^2$ | Ореол, км$^2$ |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1,5 | 6,2 | 520 | 9721,6 |
| 20 | 382,1 | 545 | 10124,9 |
| 45 | 943,0 | 570 | 10524,5 |
| 70 | 1492,0 | 595 | 10920,6 |
| 95 | 2025,6 | 620 | 11313,3 |
| 120 | 2545,1 | 645 | 11702,7 |
| 145 | 3051,8 | 670 | 12089,0 |
| 170 | 3547,3 | 695 | 12472,3 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 195 | 4032,7 | 720 | 12852,6 |
| 220 | 4509,0 | 745 | 13230,2 |
| 245 | 4976,9 | 770 | 13605,1 |
| 270 | 5437,3 | 795 | 13977,3 |
| 295 | 5890,6 | 820 | 14347,0 |
| 320 | 6337,4 | 845 | 14714,3 |
| 345 | 6778,1 | 870 | 15079,2 |
| 370 | 7213,2 | 895 | 15441,7 |
| 395 | 7642,9 | 920 | 15802,1 |
| 420 | 8067,6 | 945 | 16160,2 |
| 445 | 8487,6 | 970 | 16516,2 |
| 470 | 8903,1 | 995 | 16870,1 |
| 495 | 9314,4 | 1020 | 17222,1 |

Влияние загрязнения городов на окружающую среду носит многофункциональный характер [74, 76, 203]. Зависимость удельного среднесуточного водопотребления от размеров ореола загрязнения, полученных по данным космических съемок (табл. Б.1. приложения Б), видна из рис. 4.22.

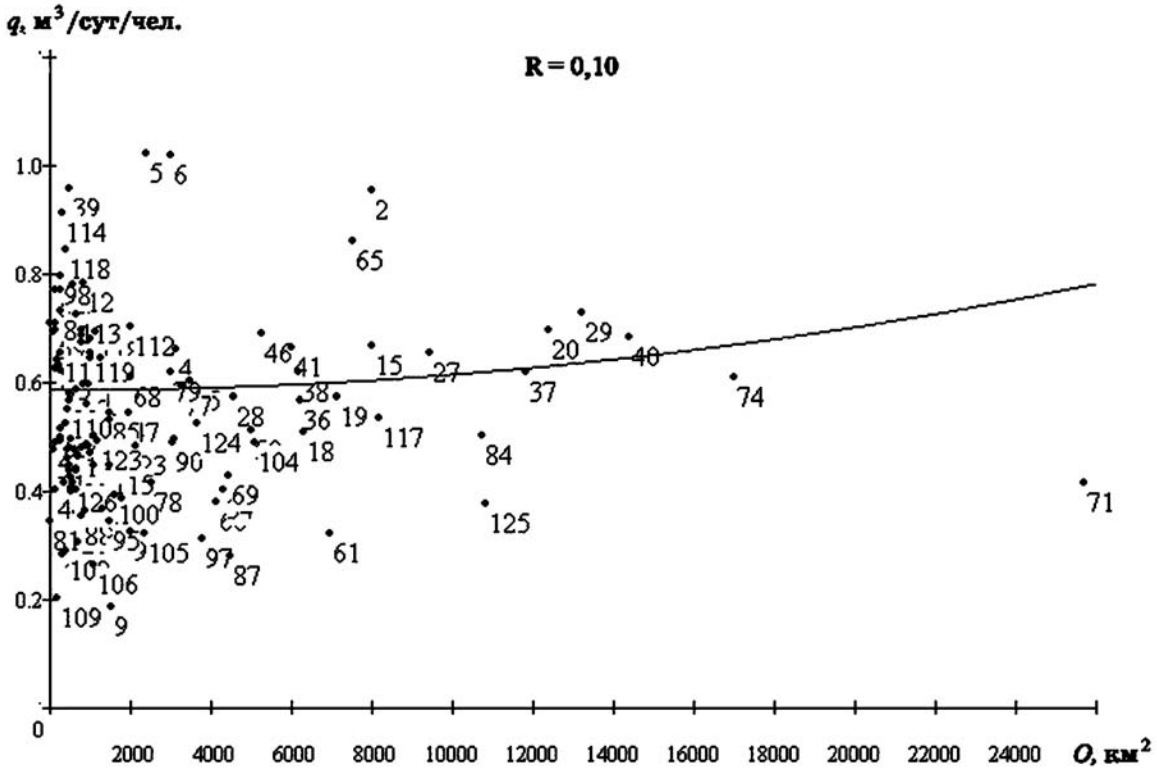



Рис. 4.22. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от ореола загрязнения

Зависимость роста удельного среднесуточного водопотребления от размеров городского ореола загрязнения описывается уравнением

$$q = 0,578 + 0,28726 \cdot 10^{-9} O^2, \qquad (4.14)$$

где $O$ — ореол загрязнения городов по данным космической съемки за 1984 г., км$^2$.

На первый взгляд кажется, что корреляция между величинами $q$ и $O$ практически отсутствует. Количественно это выражается низким коэффициентом парной линейной корреляции между ними ($R_{q,O} = 0{,}10$). При доверительной вероятности 0,95 и числе степеней свободы $f$=126−2=124 данный коэффициент не является значимым. Однако, рассматривая рис. 4.22, можно заметить, что вблизи оси ординат сосредоточены точки, обозначающие южные и приморские города, где ореолы загрязнения практически не наблюдаются или имеют небольшие площади вследствие непродолжительности существования снежного покрова, что и приводит к искажению общей корреляционной зависимости. Количественно этот эффект выражается в том, что наряду с существованием относительно слабой корреляционной зависимости водопотребления от площади ореолов загрязнения существует также и более сильная корреляционная зависимость от ряда географических (климатических) факторов, таких, например, как сумма среднесуточных температур $T$, упругость водяного пара в январе $E_1$, географическая широта $SH$ и другие. При этом между рядом других факторов, оказывающих влияние на водопотребление, существует отрицательная корреляционная связь (табл. 4.3), что приводит к искажению зависимости водопотребления от площади ореолов загрязнения.

Таблица 4.3

**Матрица коэффициентов корреляции между водопотреблением, площадью ореолов загрязнения и некоторыми климатическими факторами**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| $q$ | 1 | | | | |
| $O$ | 0,10 | 1 | | | |
| $T$ | 0,66 | -0,26 | 1 | | |
| $E_1$ | 0,47 | -0,32 | 0,81 | 1 | |
| $SH$ | -0,66 | 0,19 | -0,89 | -0,62 | 1 |
| | $q$ | $O$ | $T$ | $E_1$ | $SH$ |

Исключить влияние географических (климатических) факторов можно методом частного корреляционного анализа. Для частного коэффициента корреляции между величинами $q$ и $O$ при фиксированной величине $E_1$ значение $R_{q,O \cdot E_1} = 0{,}30$. В соответствии с критерием (2.5) полученное значение коэффициента частной корреляции при числе степеней свободы $f$ = n – m – 1 = 126 – 2 – 1=123 является значимым. Таким образом, площадь ореолов загрязнения городов является существенным фактором, влияющим на величину $q$, и, следовательно, материалы космических съемок могут быть использованы при решении задачи прогноза водопотребления городов.

Рассматривая основные тенденции взаимодействия человека с окружающей его средой в перспективе, следует отметить, что выявляется новая проблема и для энергетики. Приведенный анализ увеличения удельного среднесуточного водопотребления в городах за счет воздействия окружающей среды показывает, что будет расти и нерациональное потребление энергоресурсов в городах, зависящее от рассматриваемых факторов.

## 4.7. ВЛИЯНИЕ ВЫСОТЫ РАСПОЛОЖЕНИЯ ГОРОДОВ НАД УРОВНЕМ МОРЯ НА УДЕЛЬНОЕ СРЕДНЕСУТОЧНОЕ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕ

Исторический процесс строительства, развития и обновления городов происходит на различных рельефах земной поверхности — равнинах и низменностях, возвышенностях и плоскогорьях. Своеобразие природного ландшафта, высота расположения городов над уровнем моря, климатические условия не только создают предпосылки для формирования неповторимого облика города, но и определяют различие в удельном среднесуточном водопотреблении. Города территориально размещены по отношению к океанам на различных расстояниях с разнообразием рельефа местности, что оказывает существенное влияние

на циркуляцию атмосферных масс, природные и климатические условия [32, 130]. Известно, что с увеличением высоты над уровнем моря температура воздуха падает, идет процесс более интенсивного охлаждения по мере удаления от экватора. Перепад дневных и ночных температур и в течение сезона особенно заметен в горных районах, где, как правило, наблюдается высокий уровень солнечной радиации, различный температурно-влажностный режим и т. д. [22, 94, 126, 274]. Особенно ощущается перепад температур в городах, расположенных в горной местности, где на незначительном расстоянии находятся горы с ледниками. С учетом многофакторности условий была исследована весомость фактора влияния высоты расположения города над уровнем моря $H$ (табл. Б.1 приложения Б) на общее удельное среднесуточное водопотребление.

Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от высоты (рис. 4.23) при значениях коэффициента корреляции R = 0,41 описывается уравнением

$$q = 0,58972 + 0,333 \cdot 10^{-6} H^2 - 0,9338 \cdot 10^{-2} \lg H, \qquad (4.15)$$

где $H$ — высота расположения города над уровнем моря, м.

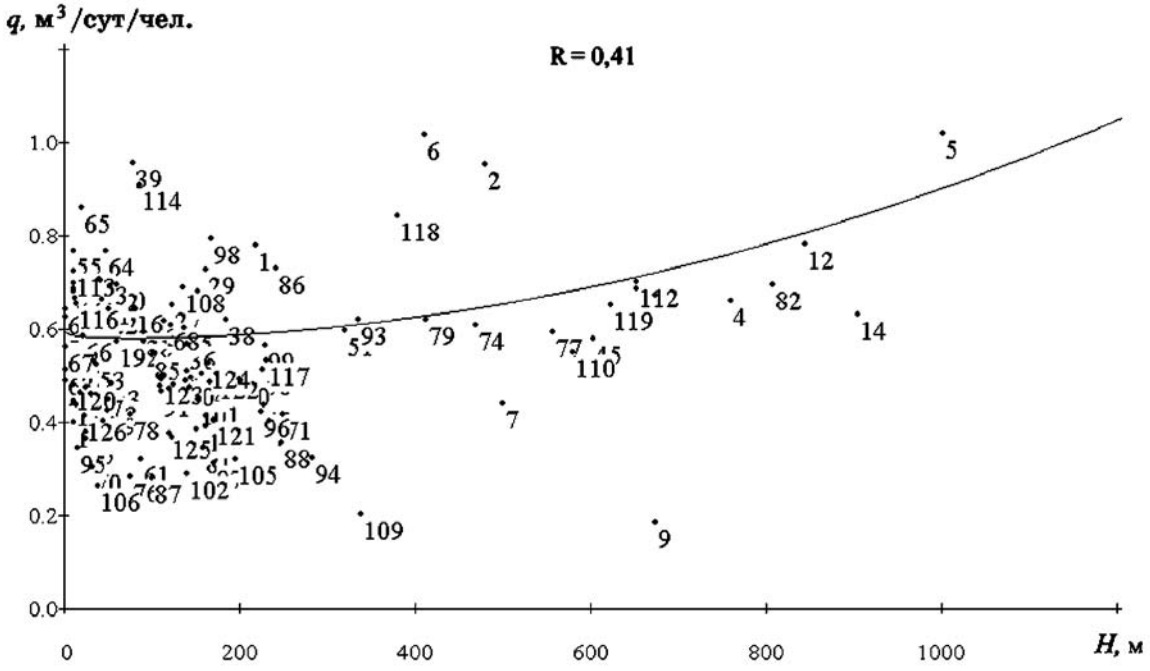



Рис. 4.23. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от высоты расположения города над уровнем моря

Назовем линию, описанную уравнением (4.15), геодезической линией высотного удельного водопотребления (ЛВВ). Рассматривая рис. 4.23, приходим к выводу, что при значениях $0<H<50$ м ЛВВ достигает своего экстремума, а точка минимума разграничивает характер изменения удельного среднесуточного водопотребления в городах. При $H<50$ м и $H>50$ м ветви ЛВВ имеют различный радиус кривизны, свидетельствующий об изменении спроса на воду. При значениях высоты расположения города над уровнем моря $H>50$ м с ростом высоты происходит увеличение приращения общего удельного среднесуточного водопотребления в городах и обратный процесс — при $0<H<50$ м. При этом коэффициент корреляции R = 0,41.

Таким образом, в различных природно-климатических условиях при H>50 м с увеличением высоты расположения города над уровнем моря растет водопотребление. Этот рост, естественно, зависит от температуры, атмосферного давления, разреженности воздуха, насыщенности воздушных масс влагой, конденсации водяного пара, образования осадков и других факторов, особенно присущих горным районам.

## 4.8. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ СВЯЗИ МЕЖДУ ЧИСЛЕННОСТЬЮ НАСЕЛЕНИЯ, ЕГО ПЛОТНОСТЬЮ, РАЗМЕРАМИ ЖИЛОЙ ПЛОЩАДИ И УДЕЛЬНЫМ СРЕДНЕСУТОЧНЫМ ВОДОПОТРЕБЛЕНИЕМ

Известно, что даже одинаковые по численности населения города существенно отличаются друг от друга размерами жилой площади, национальными обычаями живущих там людей, этажностью застройки, концентрацией промышленности, мощностью водохозяйственных систем и т. п. В одних городах интенсивный механический приток населения происходит вследствие промышленного строительства, в других — из-за благоприятных природно-климатических и социально-экономических условий или за счет избыточных трудовых ресурсов из близлежащих населенных мест и т. д. При усилении контроля за размещением производительных сил на территории Украины и стран СНГ стремление к повышению жизненного уровня народа в средних городах способствует снижению тенденции роста механического притока населения в крупные города, создаются специфические особенности в возрастной, трудоспособной группе городского населения. Таким образом, развитие водообеспечения городов определяется многими факторами, включая и межнациональные отношения в странах СНГ. Бывают скачки в развитии городов в разных регионах, которые также воздействуют на изменение общего удельного среднесуточного водопотребления. Существенное влияние на это оказывают экономика и проводимая государственная политика. Естественно, что даже при строгом соблюдении и реализации утвержденных технико-экономических обоснований генеральных планов развития городов, различной доле в них промышленного водопотребления невозможно учесть все факторы, влияющие на водопотребление. В большинстве случаев при составлении ТЭО генпланов городов в расчетах водопотребления принимается прогнозируемый отрезок времени 20—25 лет с учетом территориальных схем комплексного использования и охраны вод генеральных планов городов, генеральных планов промышленных узлов [56]. Разработчики проектов систем водоснабжения городов пытались прогнозировать увеличение водопотребления по существующим ступеням их развития, не применяя для прогнозов такие методы математической статистики, как корреляционный анализ водопотребления, связанный с численностью населения, общей площадью жилого фонда, городской плотностью населения и т. д. Такой подход, по сути своей, не позволяет актуализировать результаты прогноза водопотребления для развития градостроительства, уменьшить риск в водообеспечении (дефицит воды для населения) на более длительные сроки развития города, что существенно снижает надежность оценки «границы насыщения» сооружениями водоснабжения городов при определении его генеральных схем. Данные исследования зависимостей $q = f(N)$ и $q = f(F_1 \cdot N)$, где $N$ — численность населения в городе, млн чел.; $F_1$ — общая жилая площадь, м$^2$, приходящаяся в городе на одного человека (табл. Б.1 приложения Б), позволили построить модель процессов водопотребления, происходящих в городах с суммарной численностью населения более 75 млн человек.

Для зависимости $q = f(N)$ наиболее целесообразной явилась аппроксимация полиномиальной зависимостью от величины $GN = (N \cdot 10^6)^{-0,102}$. Данная зависимость имеет вид

$$q = 2,534 - 13,1\,GN + 13,89\,GN^2 + 48,38\,GN^3 - 152,8\,GN^4 + \\ + 405,3\,GN^5 - 588,09\,GN^6. \qquad (4.16)$$

Эта зависимость характеризуется коэффициентом корреляции R = −0,3 (рис. 4.24). Для зависимости $q = f(F_1\ N)$ наиболее целесообразной явилась аппроксимация полиномиальной зависимостью от величины $FN = \lg(F_1\ N \cdot 10^6)$.

Данная зависимость имеет вид

$$q = -2,052 + 0,299FN + 0,125FN^2 - 0,603 \cdot 10^{-2} FN^3 - 0,252 \cdot 10^{-2} FN^4 - 0,136 \cdot 10^{-3} FN^5 + \\ +0,166 \cdot 10^{-4} FN^6 + 0,42 \cdot 10^{-5} FN^7 + 0,317 \cdot 10^{-6} FN^8 - 0,615 \cdot 10^{-7} FN^9. \qquad (4.17)$$

Зависимость (4.17) характеризуется коэффициентом корреляции R = 0,29 (рис. 4.25). Зависимости $q = f(GN)$ и $q = f(FN)$ обозначим $P_1$ и $P_2$ соответственно.

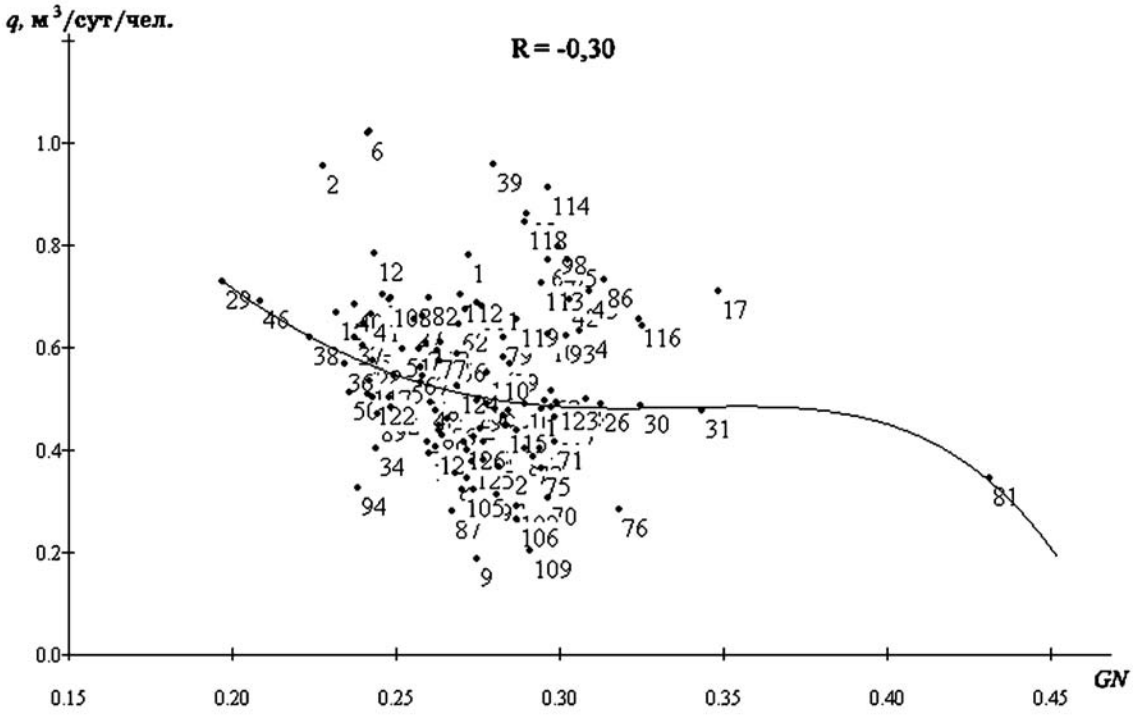



Рис. 4.24. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от численности населения

Кривые (рис. 4.25), описывающие изменения фактического общего удельного среднесуточного водопотребления в городах второго климатического района, подрайона II В [249], в зависимости от численности населения, а также от размеров общей жилой площади, показывают, что существуют три зоны, отличающиеся крутизной зависимости удельного среднесуточного водопотребления от параметров $F_1$ и $N$.

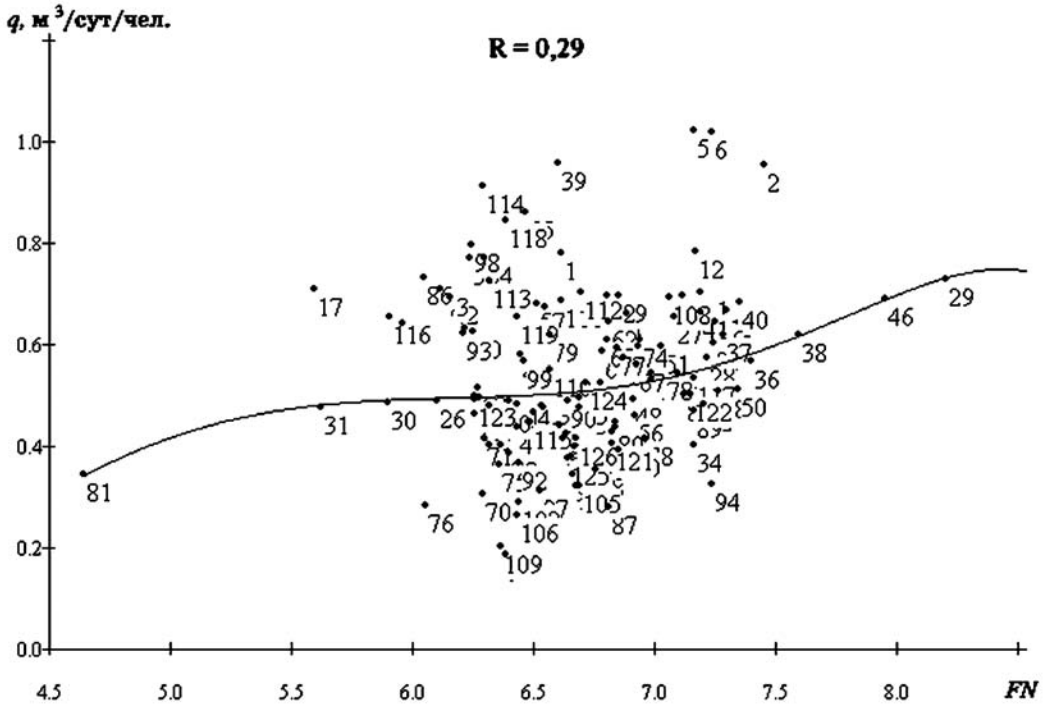



Рис. 4.25. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от численности населения и размеров общей жилой площади

Таблица 4.4

**Зависимость удельного среднесуточного водопотребления в городах от численности населения $q_p = f(GN)$ при 0,004 ≤ N ≤ 15 млн человек**

| *N*, млн чел. | *GN* | $q_p$, м³/сут/чел. | *N*, млн чел. | *GN* | $q_p$, м³/сут/чел. |
|---|---|---|---|---|---|
| 0,004 | 0,429 | 0,335 | 1,304 | 0,238 | 0,568 |
| 0,029 | 0,351 | 0,479 | 1,404 | 0,236 | 0,573 |
| 0,034 | 0,345 | 0,479 | 1,504 | 0,235 | 0,577 |
| 0,134 | 0,300 | 0,479 | 1,604 | 0,233 | 0,582 |
| 0,139 | 0,299 | 0,479 | 1,704 | 0,232 | 0,586 |
| 0,204 | 0,288 | 0,485 | 1,804 | 0,230 | 0,590 |
| 0,254 | 0,281 | 0,491 | 1,904 | 0,229 | 0,594 |
| 0,304 | 0,276 | 0,496 | 2,004 | 0,228 | 0,598 |
| 0,354 | 0,272 | 0,501 | 2,504 | 0,223 | 0,614 |
| 0,404 | 0,268 | 0,506 | 3,004 | 0,219 | 0,629 |
| 0,454 | 0,265 | 0,511 | 3,504 | 0,215 | 0,641 |
| 0,504 | 0,262 | 0,515 | 4,003 | 0,212 | 0,653 |
| 0,554 | 0,260 | 0,519 | 5,003 | 0,208 | 0,672 |
| 0,604 | 0,257 | 0,524 | 6,003 | 0,204 | 0,688 |
| 0,654 | 0,255 | 0,527 | 7,003 | 0,201 | 0,702 |
| 0,704 | 0,253 | 0,531 | 8,003 | 0,198 | 0,714 |
| 0,754 | 0,252 | 0,535 | 8,503 | 0,197 | 0,720 |
| 0,804 | 0,250 | 0,538 | 8,998 | 0,195 | 0,725 |
| 0,854 | 0,249 | 0,542 | 10,000 | 0,193 | 0,735 |
| 0,904 | 0,247 | 0,545 | 11,000 | 0,192 | 0,745 |
| 0,954 | 0,246 | 0,548 | 12,000 | 0,190 | 0,753 |
| 1,004 | 0,244 | 0,551 | 13,000 | 0,188 | 0,761 |
| 1,104 | 0,242 | 0,557 | 14,000 | 0,187 | 0,768 |
| 1,204 | 0,240 | 0,562 | 15,000 | 0,186 | 0,775 |

***Примечание:*** $q_p$ означает удельное среднесуточное водопотребление, вычисленное по формуле (4.16), $GN = \left(N \cdot 10^6\right)^{-0,102}$.

Рассматривая рис. 4.24 и данные табл. 4.4, можно также выделить три зоны на кривой $q = f(GN)$.

При значениях аргумента $0,429 \geq GN \geq 0,186$ для численности населения $0,004 \leq N \leq 15$ млн человек первая зона образуется на отрезке, фиксируемом значениями аргумента 0,186—0,299, что соответствует численности населения 15—0,139 млн человек (рис. 4.24). Здесь функция монотонно и непрерывно убывает, резко замедляя скорость при значении аргумента 0,299 и приближаясь к условиям, отражающим стабилизацию и рациональность общего удельного среднесуточного водопотребления в городах в пределах от 775 до 479 л/сут на человека. Это является доказательством нецелесообразности роста крупных городов, говорит в пользу развития малых и средних городов, необходимости конкретизации и комплексного изучения проблемы развития каждого города, процессов расселения и т. д.

Преимущество в рациональном общем удельном среднесуточном водопотреблении демонстрируется во второй зоне, на отрезке кривой при значениях аргумента 0,299 — 0,345 для численности населения от 0,139 до 0,034 млн человек. Здесь скорость изменения функции можно практически принять нулевой, величина общего удельного среднесуточного водопотребления составляет 479 л/сут на человека. Этот показатель необходимо учитывать при принятии решений рационального водохозяйствования в поисковом демографическом прогнозе развития городов.

В третьей зоне на отрезке кривой, фиксируемой значениями аргумента 0,345–0,429 для численности населения $0{,}034 \geq N \geq 0{,}004$ млн человек, функция начинает резко изменять скорость и монотонно убывать. Размер минимального общего удельного среднесуточного водопотребления составляет 335 л/сут. на человека.

Заметим, что эмпирическая формула (4.16) включает в себя среднесуточное удельное водопотребление в городах, потери и нерациональный расход воды, расход воды на полив зеленых насаждений, хозяйственно-питьевые и промышленные нужды, на собственные нужды водопроводных хозяйств города, затраты воды на гидропневматическую и гидравлическую промывку водопроводных сетей города, санитарную обработку водопроводной сети, промывку тупиковых сетей, на нужды пожаротушения.

Здесь учитываются природно-климатические условия только подрайона II В, климатического района II по СНиП 2.01.01-82. Плотность населения в исследуемых городах колеблется от 2715 чел./км$^2$ для Кочетка с численностью населения 0,004 млн человек до 16524 чел./км$^2$ для Владимира, где численность населения составляет 0,3305 млн человек. Следует отметить, что плотность застроек в городах, как правило, значительно колеблется, в зависимости от концепции расселения, проектов детальной планировки жилых и производственных комплексов и общественных центров, принятых в генеральных планах городов бывшего СССР, которые разрабатывались на двадцатилетний период. Таким образом, установлено, что для городов с численностью населения от 0,139 до 15 млн человек скорость роста общего удельного среднесуточного водопотребления значительно выше, чем в городах, где живет от 0,004 до 0,034 млн человек. В городах с численностью населения 0,034–0,139 млн человек рост общего удельного среднесуточного водопотребления практически стабилизируется.

Кривая, построенная по формуле (4.16) и изображенная на рис. 4.24, проходит через точки фактического удельного среднесуточного водопотребления в городах, принятых в качестве базовых. В них отсутствует дефицит воды и приняты действенные меры для водосбережения.

К 2010 г. численность населения каждого из почти 60 городов СНГ, расположенных в различных природно-климатических зонах, будет составлять 0,139 млн человек. Они войдут уже в первую зону распределения роста общего удельного среднесуточного водопотребления (рис. 4.24). Это приведет к необходимости привлечения дополнительных водных ресурсов, принятия более жестких мер по водосбережению для нормального водообеспечения городов. Если учесть к тому же тенденцию изменения фактического удельного среднесуточного водопотребления в зависимости от общей жилой площади города (рис. 4.25, уравнение (4.17)), то при возможном повышении комфортности жилья вследствие увеличения его общей жилой площади до 20 м$^2$ на одного человека проблемы водообеспечения городов возрастут еще больше.

Рассмотрим зависимость удельного среднесуточного водопотребления от площади жилой застройки города, отнесенной к площади всей его застройки, т. е. от отношения $\frac{F_1 N}{F_2}$. Эта зависимость хорошо аппроксимируется полиномиальной функцией от величины $FF = \left(\frac{F_1 N}{F_2}\right)^{0{,}102} / 0{,}698$ (0,698 — значение величины $\left(\frac{F_1 N}{F_2}\right)^{0{,}102}$ для базового Кочетка):

$$q = 2{,}0194 - 10{,}091FF + 13{,}832FF^2 - 5{,}334FF^3. \qquad (4.18)$$

Данная зависимость характеризуется коэффициентом корреляции R = 0,30 (рис. 4.26). В дальнейшем под водопотреблением, вычисляемым по формуле (4.18), будем понимать величину, обозначенную *QFN*.

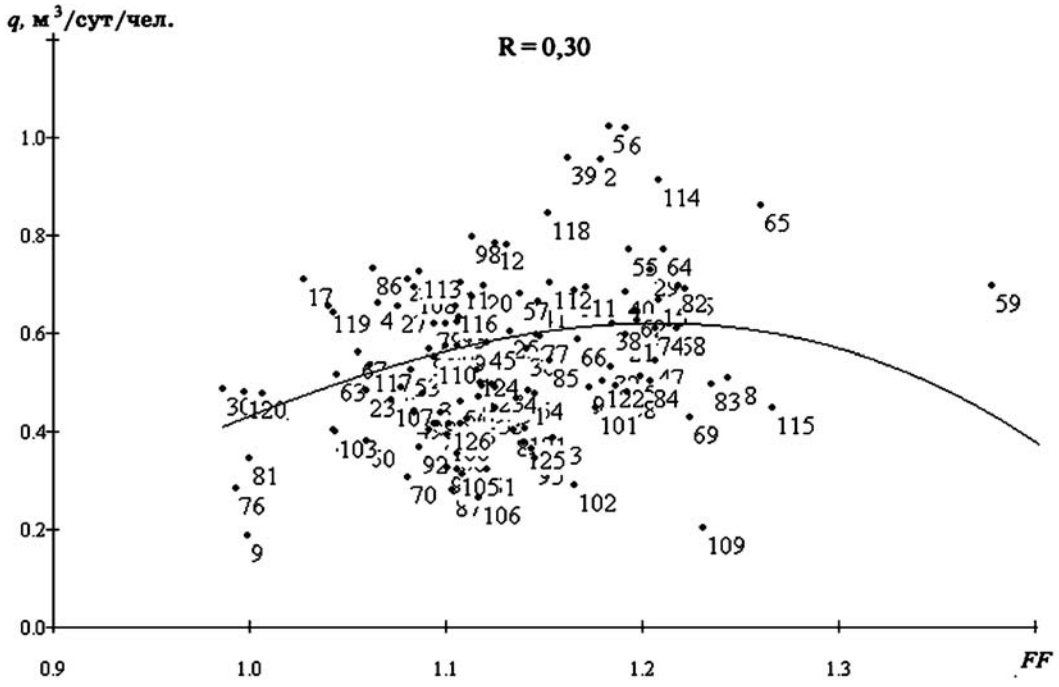



Рис. 4.26. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от площади жилой застройки города, отнесенной к площади пятна застройки

Каждый город занимает свое исторически сложившееся место в индустрии, экономике. В послевоенный период облик многих из них значительно изменился благодаря их обновлению и высоким темпам гражданского и промышленного строительства. Плотность населения увеличилась в различной степени из-за неоднородности тенденции роста численности, социально-экономического развития, динамики строительства комфортного жилья.

Все это влияет на процессы роста удельного среднесуточного водопотребления, что наглядно видно на рис. 4.27, где изображены результаты исследований корреляционной зависимости $q = f\left(\frac{N \cdot 10^6}{F_2}\right)$. Обозначим $NF = \frac{N \cdot 10^6}{F_2}$. Для оценки изменения удельного среднесуточного водопотребления были выбраны города, расположенные во втором климатическом районе бывшего СССР.

Зависимость (коэффициент корреляции R = 0,32) описывается уравнением

$$q = 0,364 + 0,0892 \ln NF \qquad (4.19)$$

и показывает, что с увеличением плотности населения в городе растет водопотребление.

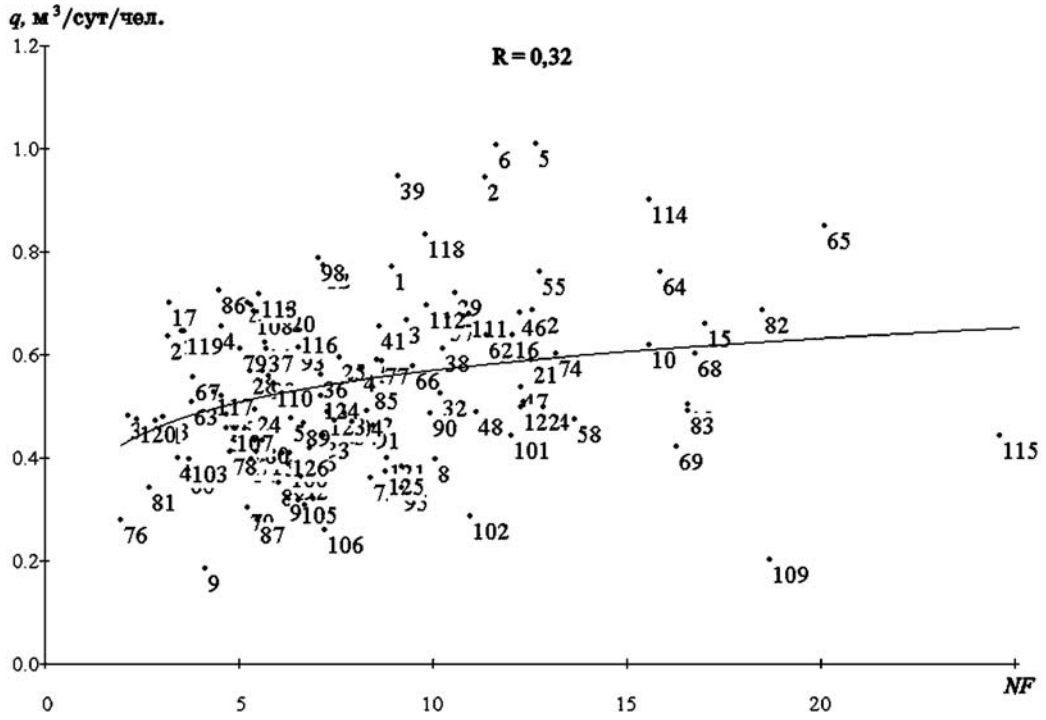



Рис. 4.27. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от плотности населения

## 4.9. ЗАВИСИМОСТЬ УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ОТ ГЕОГРАФИЧЕСКОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ ГОРОДОВ

Расположение городов на различных географических широтах является одним из факторов, определяющих разнообразие тех климатических явлений, которые влияют на изменение удельного водопотребления. Всеобъемлющая единая классификация городов для оценки водопотребления, исходя из большого круга их признаков, весьма сложна. Географическое положение — условие, но не причина для развития городов, уровень которого меняется с течением времени. И в то же время пространственно-географическое положение городов (широта и долгота) с характерными особенностями природы и климата влияет на водопотребление.

Исследование влияния географического положения городов (табл. Б.1 приложения Б) на удельное среднесуточное водопотребление в городах бывшего СССР позволило построить модели парных зависимостей этой величины от широты *SH* и долготы *DO* (рис. 4.28, 4.29), которые описываются уравнениями (4.20), (4.21).

В первом случае корреляционная зависимость $q = f(SH)$, при значении коэффициента корреляции R = −0,66, имеет вид

$$q = 1{,}779 + 0{,}523 \cdot 10^{-3} SH - 0{,}124 \cdot 10^{-2} SH^2 + 0{,}1457 \cdot 10^{-4} SH^3, \qquad (4.20)$$

где *SH* — географическая широта месторасположения города в градусах. В дальнейшем эту величину обозначим *QSH*.

Во втором случае корреляционная зависимость $q = f(DO)$ при значении коэффициента корреляции R = 0,46 имеет вид:

$$q = 0{,}146 + 0{,}0205 DO - 0{,}259 \cdot 10^{-3} DO^2 + 8{,}913 \cdot 10^{-7} DO^3, \qquad (4.21)$$

где *DO* — географическая долгота месторасположения города в градусах. Указанную величину *q* обозначим *QDO*.

Участок кривой, ограниченной $36^\circ \le SH \le 55^\circ$ с.ш., будем считать первой зоной. Здесь происходит монотонное и непрерывное убывание функции. При этом локальный минимум

функции имеет место около 55° с.ш. Этой широте соответствует минимальное удельное среднесуточное водопотребление на территории бывшего СССР.

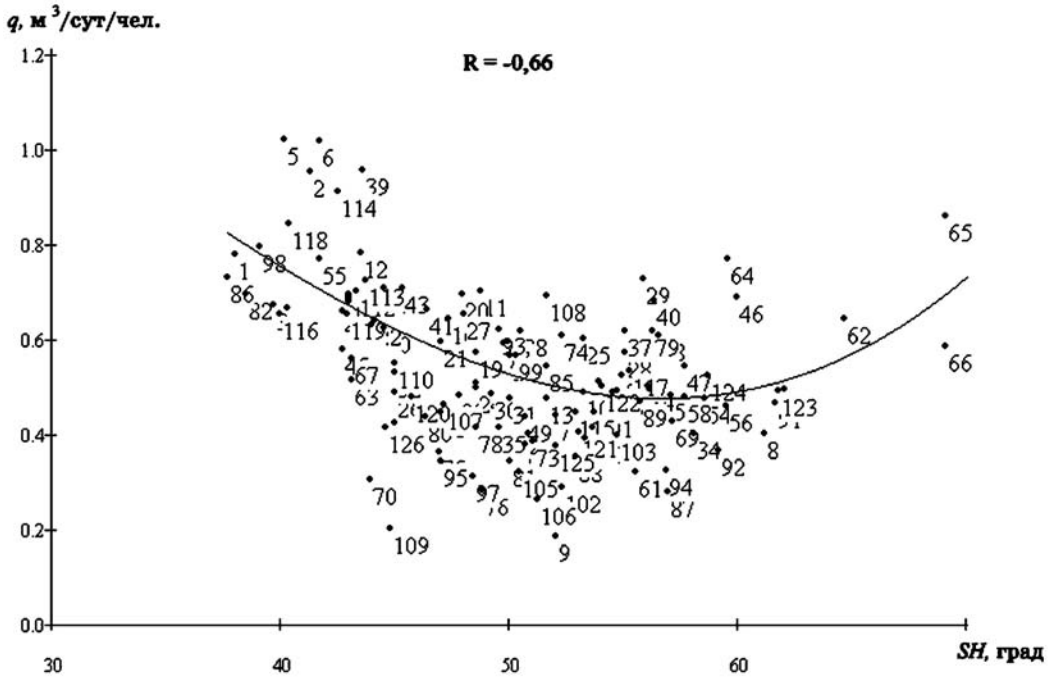



Рис. 4.28. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от географической широты

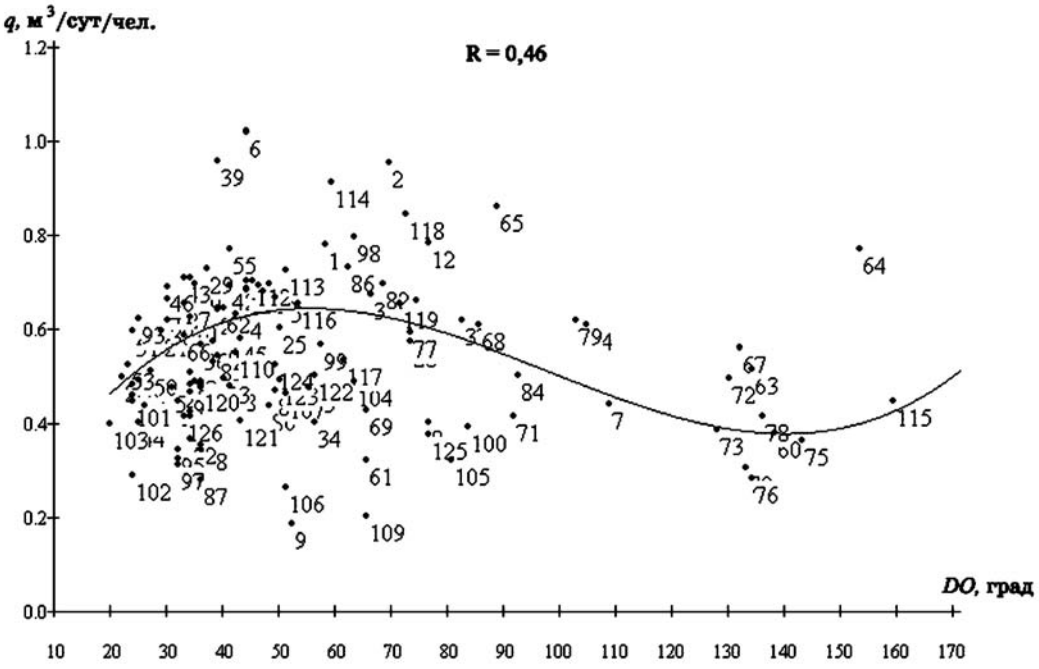



Рис. 4.29. Корреляционная зависимость удельного среднесуточного водопотребления от географической долготы

Во второй зоне ($55° \le SH \le 62°$ с.ш.) функция q, напротив, монотонно возрастает. Таким образом, в первой зоне с уменьшением величины широты и приближением к субтропическому поясу увеличивается водопотребление, во второй зоне при значениях широты более 55° с.ш. и приближении к субарктическому поясу водопотребление также растет. Это объясняется увеличением количества дней отопительного сезона, что требует дополнительного расхода воды. Приведенная на рис. 4.28 зависимость также свидетельствует о влиянии долготы на удельное среднесуточное водопотребление в городах.

# 4.10. ПОСТРОЕНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ЗАВИСИМОСТИ УДЕЛЬНОГО СРЕДНЕСУТОЧНОГО ВОДОПОТРЕБЛЕНИЯ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДРУГИХ ПАРАМЕТРОВ

Для построения многокритериальной модели, т.е. модели, одновременно учитывающей множество рассмотренных выше природно-климатических, градостроительных и других факторов, был применен метод регрессионного анализа. Исходными данными для ее построения послужили результаты приведенных в данной главе исследований. При построении множественной регрессионной модели для большинства из исследуемых факторов использовались нелинейные преобразования, вид которых задавался приведенными ранее уравнениями.

Для предварительной оценки приоритетности влияния каждого из факторов на отклик была рассчитана матрица коэффициентов парной корреляции (табл. 4.5). Анализ матрицы позволил сделать вывод о существенном влиянии на зависимую переменную следующих параметров: $\Theta_7$ ($R$ = 71); $T$ ($R$ = 66); $SH$ ($R$ = −66); $S_7$ ($R$ = 62), где $R$ — коэффициент корреляции, умноженный на 100. Матрица показала также наличие тесной корреляционной связи между факторами: $T$ и $\Theta$ ($R$ = 90); $S$ и $\Theta$ ($R$ = 73); $\Theta$ и $\Theta_1$ ($R$ = 93); $E$ и $\Theta$ ($R$ = 77) и т. д. Это обстоятельство обусловливает необходимость учета явлений мультиколлинеарности при построении множественной регрессионной модели [129, 286].

Задача построения последней решалась методом шаговой регрессии [129]. Применялся один из вариантов данного метода — алгоритм последовательного включения переменных.

Таблица 4.5

**Матрица коэффициентов парной линейной корреляции между удельным среднесуточным водопотреблением городов и различными природно-климатическими, градостроительными и другими факторами**

| | $\Theta$ | $g$ | $q$ | $FI$ | $FN$ | $H$ | $S$ | $DO$ | $F_1$ | $E$ | $A$ | $F_2$ | $O$ | $\Theta_1$ | $\Theta_7$ | $T$ | $SH$ | $DM$ | $E_1$ | $E_7$ | $S_1$ | $S_7$ | $W$ | $QT$ | $E_{17}$ | $F$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $\Theta$ | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $g$ | -85 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $q$ | 69 | -61 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $FI$ | -45 | 58 | -48 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $FN$ | -13 | 26 | 29 | 8 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $H$ | 37 | -37 | 41 | -31 | 1 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $S$ | 73 | -86 | 56 | -73 | -25 | 38 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $DO$ | 52 | -26 | 46 | -29 | 7 | 25 | 26 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $F_1$ | -21 | 35 | 43 | 35 | 53 | -22 | -38 | -21 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $E$ | 77 | -66 | 42 | 0 | -20 | -11 | 41 | 27 | -7 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| $A$ | -49 | 40 | -45 | -1 | -11 | -17 | -24 | -14 | -14 | -51 | 100 | | | | | | | | | | | | | | | |
| $F_2$ | -19 | 29 | 15 | 8 | 86 | -6 | -27 | 4 | 48 | -23 | -4 | 100 | | | | | | | | | | | | | | |
| $O$ | -29 | 27 | 10 | 6 | 41 | -1 | -23 | 0 | 33 | -32 | -7 | 30 | 100 | | | | | | | | | | | | | |
| $\Theta_1$ | 93 | -67 | 57 | -19 | -10 | 21 | 50 | 48 | -10 | 81 | -50 | -16 | -30 | 100 | | | | | | | | | | | | |
| $\Theta_7$ | 79 | -80 | 71 | -75 | -10 | 51 | 83 | 56 | -35 | 43 | -32 | -15 | -15 | 54 | 100 | | | | | | | | | | | |
| $T$ | 90 | -87 | 66 | -62 | -19 | 17 | 81 | 48 | -31 | 74 | -38 | -24 | -26 | 75 | 86 | 100 | | | | | | | | | | |
| $SH$ | 83 | -94 | -66 | -64 | -24 | 39 | 84 | 28 | -38 | 61 | -29 | -29 | -31 | 65 | 83 | 88 | 100 | | | | | | | | | |
| $DM$ | -90 | 79 | -58 | 41 | 21 | -10 | -67 | -35 | 21 | -86 | 49 | 27 | 34 | -86 | -69 | -92 | -81 | 100 | | | | | | | | |
| $E_1$ | 87 | -63 | 47 | -17 | -17 | -1 | 48 | 41 | -10 | 90 | -51 | -23 | -32 | 92 | 52 | 81 | 63 | -92 | 100 | | | | | | | |
| $E_7$ | 24 | -34 | 12 | 26 | -19 | -33 | 6 | -7 | 1 | 73 | -22 | -17 | -17 | 27 | 6 | 33 | 27 | -41 | 41 | 100 | | | | | | |
| $S_1$ | 61 | -89 | 47 | -63 | -26 | 39 | 85 | 1 | -34 | 38 | -24 | -25 | -28 | 39 | 67 | 67 | 85 | -56 | 31 | 18 | 100 | | | | | |
| $S_7$ | 74 | -69 | 62 | -69 | -11 | 36 | 79 | 57 | -28 | 42 | -29 | -19 | -11 | 55 | 89 | 82 | 72 | -69 | 58 | -2 | 53 | 100 | | | | |
| $W$ | 17 | -16 | -45 | -49 | 20 | 13 | 34 | 25 | -1 | -9 | 10 | -1 | 18 | 2 | 41 | 30 | 29 | -18 | 6 | -21 | 13 | 46 | 100 | | | |
| $QT$ | 88 | -85 | 71 | -55 | -20 | 20 | 76 | 44 | -31 | 77 | -43 | -26 | -25 | 75 | 82 | 96 | 86 | -91 | 81 | 37 | 63 | 80 | 27 | 100 | | |
| $E_{17}$ | 86 | -64 | 48 | -38 | -15 | 12 | 60 | 34 | -14 | 72 | -49 | -21 | -29 | 86 | 61 | 81 | 69 | -91 | 92 | 13 | 41 | 69 | 17 | 81 | 100 | |
| $FF$ | 3 | 8 | 30 | 11 | 47 | 10 | -9 | 12 | 28 | 1 | -8 | 15 | 23 | 6 | 1 | 2 | 0 | -3 | 5 | -5 | -14 | 8 | 53 | 5 | 2 | 100 |

При оценке качества получаемых моделей общего удельного среднесуточного (за год) водопотребления использовалось несколько критериев:

коэффициент множественной корреляции и его значимость;

отклонение линии регрессии от базовых городов;

значимость оценок параметров регрессии.

С учетом этих критериев было получено уравнение:

$$q = -134{,}9904 + 0{,}0055 \cdot K_7 + 0{,}9609 \cdot QNF + 1.3289 \cdot QT + 0{,}5847 \cdot 10^{-4} \cdot H - 2{,}0573 \cdot E_{17} + 0{,}54496 \cdot QW - 0{,}4601 \cdot 10^{-2} \cdot A - 0{,}01741 \cdot S_7 + 0{,}01506 \cdot F_1 - 0{,}03019 \cdot E_7 - 0{,}1278 \cdot 10^{-2} \cdot DM + 0{,}522 \cdot 10^{-2} \cdot FI - 0{,}5523 \cdot QFN + 0{,}5577 \cdot 10^{-5} \cdot O + 0{,}9031 \cdot QSH + 13{,}6115 \cdot g + 0{,}03847 \cdot E_1 + 0{,}1184 \cdot 10^{-2} \cdot S, \quad (4.23)$$

где $q$ — удельное среднесуточное водопотребление в городе, с учетом нерациональных потерь воды, утечек в системе ПРВ и расходов воды на собственные нужды городских водопроводов;

$\Theta_7$ — среднемесячная температура воздуха в городе за июль (шкала Кельвина);

$$QNF = 0{,}3602 - 0{,}753\,(P_1 + P_2) + 1{,}431\,(P_1 + P_2)^2 - 0{,}455\,(P_1 + P_2)^3 - 0{,}155\,(P_1 + P_2)^4 + 0{,}0383\,(P_1 + P_2)^5 + 0{,}0297\,(P_1 + P_2)^6 \quad (4.24)$$

(здесь $P_1$ и $P_2$ определяются выражениями (4.16) и (4.17) соответственно);

$$QT = 1{,}203 - 2{,}53\left(\frac{T}{3165}\right) + 2{,}624\left(\frac{T}{3165}\right)^2 - 0{,}755\left(\frac{T}{3165}\right)^3 \quad (4.25)$$

(здесь $T$ — сумма среднесуточных температур воздуха в городах выше 0 °С; 3165 – сумма среднесуточной температуры воздуха выше 0 °С в Кочетке, 0 °С);

$H$ — геодезическая высота расположения города над уровнем моря, м;

$$E_{17} = 0{,}471 + 1{,}284\left(\frac{E_1}{E_7 - E_1}\right)^2 - 1{,}294\left(\frac{E_1}{E_7 - E_1}\right)^4 - 0{,}398\left(\frac{E_1}{E_7 - E_1}\right)^6 \quad (4.26)$$

(здесь $E_1$, $E_7$ — модули упругости водяного пара за январь и июль соответственно);

$QW$ — функция от отношения $\frac{HM\,F_2}{N\,F_1}$, определяющаяся выражением (4.13),

(здесь $HM$ — среднее в году количество осадков с поправками к показаниям осадкомера, мм;

$F_2$ — площадь застройки города по данным дешифровки космической съемки, км$^2$,

$N$ — численность населения города, млн чел.;

$F_1$ — общая жилая площадь на одного жителя города, м$^2$);

$A$ — среднее в году альбедо города, %;

$S_7$ — суммы радиации в городе за июль, ккал/см$^2$;

$FI$ — относительная влажность воздуха в городе, %;

$QFN$ — функция от отношения $\frac{F_1\,N}{F_2}$, определяющаяся выражением (4.18);

$O$ — ореол антропогенного загрязнения города, км$^2$;

$QSH$ — полиномиальная функция географической широты, определяющаяся выражением (4.20);

$g$ — ускорение свободного падения для каждого города, м/сек$^2$;

$S$ — годовая сумма солнечной радиации в городе, ккал/см$^2$.

Полученное регрессионное уравнение характеризуется высоким коэффициентом множественной корреляции $R = 0{,}919$, что подтверждает правильность выбранного подхода к оценке влияния природно-климатических условий и других факторов на общее удельное среднесуточное водопотребление в городах бывшего СССР.

Результаты сопоставления фактических значений удельного среднесуточного водопотребления $q_ф$ и расчетных значений $q_p$, полученных согласно уравнению множественной регрессии (4.23), видны из рис. 4.30.

Для оценки точности регрессионной модели был построен доверительный интервал прогнозных оценок величины удельного среднесуточного водопотребления, расчет границ которого ($q_{min}$ и $q_{max}$) выполнялся по формулам

$$q_{\max} = q_p + K_p s\,,\ \ q_{\min} = q_p - K_p s\,, \tag{4.27}$$

где $K_p$ — доверительный множитель, величина которого зависит от принятой доверительной вероятности (квантиль нормального распределения). Для доверительной вероятности 95 % $K_p$ = 1,96;

σ — стандартное отклонение (среднеквадратичное отклонение), вычисляемое по формуле

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\Delta q_i)^2}{n-1}}, \tag{4.28}$$

где $n$ — число городов;

$\Delta q_i$ — абсолютное отклонение $q_p$ от $q_ф$:

$$\Delta q_i = q_p^i - q_ф^i \tag{4.29}$$

(здесь $i$ — номер города).

Для удобства построения сначала были определены доверительные границы для минимального $q_ф$ на графике (рис. 4.30). Из формул (4.27) найдены:

$$q_{\max} = q_p + K_p s = 0,3 + 1,96 \cdot 0,033 = 0,365;$$
$$q_{\min} = q_p - K_p s = 0,3 - 1,96 \cdot 0,033 = 0,235.$$

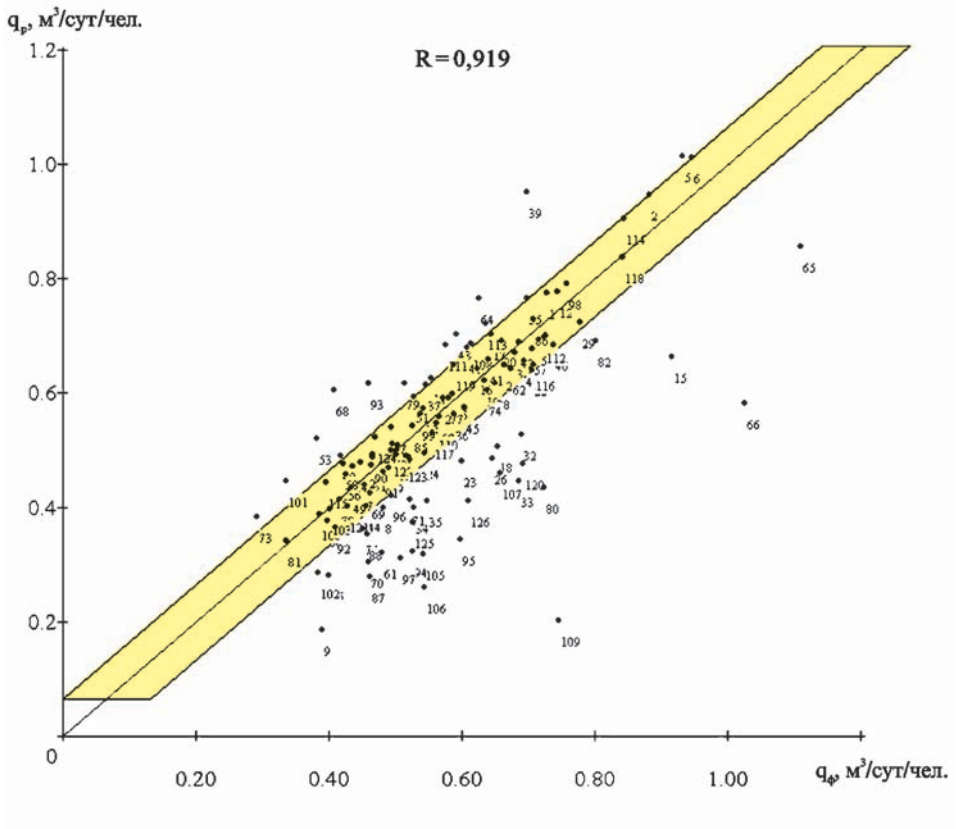



Рис. 4.30. Регрессионная зависимость фактического и расчетного удельного среднесуточного водопотребления промышленных центров

Через эти точки проведены прямые параллельно линии регрессии (рис. 4.30). Таким образом получены доверительные верхняя и нижняя границы доверительного интервала. На графике (рис. 4.30) обозначена область, заключенная между построенными доверительными границами, которая представляет собой 95 %-ный доверительный интервал для значений величины удельного среднесуточного водопотребления на человека. Это позволяет утверждать, что значения q для каждого города с вероятностью 95 % соответствуют этому интервалу, а незначительная ширина доверительного интервала свидетельствует о возможности практического использования предлагаемой модели для прогноза водопотребления городов с учетом природно-климатических условий.

Необходимо отметить, что, используя уравнение (4.23), можно не только оценить дефицит воды (на рис. 4.30 — зона ниже линии нижнего доверительного интервала) или рациональное использование ее в городах, но и охарактеризовать жизнедеятельность города, его индустриально-промышленное состояние, культуру водопотребления, оценить специальное назначение населенного пункта (морской порт, потенциал присутствия военного контингента и т. д.).

Особое значение модель приобретает в условиях начала глобального изменения климата на Земле в XXI веке [334, 337–340, 347–350, 353], так как на ее основе можно оценить различные варианты изменения общего удельного среднесуточного водопотребления на человека в городах.

Влияние изменения климатических условий на общее среднесуточное водопотребление исследовалось на примере Харькова и взятого в качестве базового Кочетка (поселка городского типа в Харьковской области), который, располагаясь в 40 км от Харькова, имеет равные с ним природно-климатические условия, но в 389 раз меньше по численности населения. Для этого в формулу (4.23) вводили такие климатические параметры Харькова и Кочетка, как солнечная радиация, относительная влажность, среднее за год количество осадков с поправками по показаниям осадкомера, термодинамическая температура, альбедо, упругость водяного пара, сумма среднесуточных температур воздуха в городе выше 0 °С, продолжительность периода со среднесуточной температурой ниже 0 °С. Отметим, что коэффициенты корреляции $R$ по всем вышеперечисленным климатическим параметрам составляют величину от 0,31 до 0,69. Для используемого в модели количества городов (126) в соответствии с таблицей критических значений коэффициентов корреляции (табл. 4.6) можно утверждать с вероятностью 99 %, что приведенные параметры оказывают значительное влияние на общее удельное среднесуточное водопотребление на человека в городах. О том, как может измениться удельное среднесуточное водопотребление при различных вариантах изменения климата, можно судить по данным табл. 4.7.

Таблица 4.6

**Критические значения коэффициента корреляции [43]**

| Число степеней свободы | Уровни значимости α | | Число степеней свободы | Уровни значимости α | | Число степеней свободы | Уровни значимости α | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 5 % | 1 % | | 5 % | 1 % | | 5 % | 1 % |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 1 | 1,00 | 1,00 | 30 | 0,35 | 0,45 | 120 | 0,18 | 0,23 |
| 2 | 0,95 | 099 | 35 | 0,32 | 0,42 | 150 | 0,16 | 0,21 |
| 3 | 0,88 | 0,96 | 40 | 0,30 | 0,39 | 200 | 0,14 | 0,18 |
| 4 | 0,81 | 0,92 | 50 | 0,27 | 0,35 | 300 | 0,11 | 0,15 |
| 5 | 0,75 | 0,87 | 60 | 0,25 | 0,33 | 400 | 0,10 | 0,13 |
| 10 | 0,58 | 0,71 | 70 | 0,23 | 0,30 | 500 | 0,09 | 0,11 |
| 15 | 0,48 | 0,61 | 80 | 0,22 | 0,28 | 700 | 0,07 | 0,10 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 20 | 0,42 | 0,53 | 90 | 0,21 | 0,26 | 900 | 0,06 | 0,09 |
| 25 | 0,38 | 0,49 | 100 | 0,19 | 0,25 | 1000 и больше | < 0,06 | < 0,09 |

Из табл. 4.7 видно, что расчетное удельное водопотребление Харькова в природно-климатических условиях Ташкента возрастает на 44 %, а в природно-климатических условиях Якутска снижается на 14 %.

Таблица 4.7

**Общее удельное среднесуточное водопотребление Харькова и Кочетка в климатических условиях Ташкента и Якутска, м³/сут/чел.**

| Населенный пункт | Фактическое водопотребление, $q_ф$ | Расчетное водопотребление, $q_р$ | В условиях Ташкента | | В условиях Якутска | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | $q_р$ | Увеличение водопотребления, $\Delta q$ | $q_р$ | Уменьшение водопотребления, $\Delta q$ |
| Харьков | 0,560 | 0,581 | 0,838 | +0,257 | 0,500 | -0,081 |
| Кочеток | 0,341 | 0,334 | 0,572 | +0,238 | 0,207 | -0,127 |

Неоспоримо, что при интенсификации водоснабжения городов следует учитывать степень влияния глобального изменения климата на водообеспечение, она должна проводиться на базе стратегического плана, основанного на анализе работы элементов систем водоснабжения города, на критической оценке существующей ситуации и работы прежде всего систем распределения и транспортировки воды, где имеются значительные по своему удельному весу потери воды. Эти проблемы приобретают особое значение для Украины, имеющей ограниченные запасы водных ресурсов.

## ВЫВОДЫ

1. Анализ отечественных и зарубежных работ, систематизация и критическая оценка современного состояния водопотребления в населенных пунктах Украины и странах СНГ показали, что удельное среднесуточное водопотребление населенных пунктов зависит от целого ряда факторов, к которым относятся: среднесуточная температура воздуха, упругость водяного пара, относительная влажность, среднегодовое количество осадков, суммарная солнечная радиация. среднегодовое альбедо, геодезическая высота населенных пунктов, географическая широта и долгота, численность населения, жилая площадь, приходящаяся на одного жителя, площадь застройки населенного пункта, площадь ореолов загрязнения городов, суммы положительных среднесуточных температур, продолжительность периода с отрицательной среднесуточной температурой.

2. Влияние перечисленных факторов на удельное среднесуточное водопотребление городов может иметь различную направленность. Например, с увеличением годовой и месячной суммы солнечной радиации в городах удельное среднесуточное водопотребление растет, и, напротив, с повышением среднегодового альбедо, а также с ростом относительной влажности удельное среднесуточное водопотребление уменьшается. На величину водопотребления существенное влияние оказывает температурный режим в городах. Установлено также, что при высоте расположения города над уровнем моря $H>50$ м с ростом высоты происходит увеличение приращения удельного среднесуточного водопотребления в городах и обратный процесс — при $0<H<50$ м. Следовательно, развитие городов, расположенных в степных зонах, пустынях, полупустынях и высокогорных областях, усиливает процессы роста общего удельного среднесуточного водопотребления.

3. Получена эмпирическая зависимость между удельным среднесуточным водопотреблением и перечисленными факторами.

4. Разработана методика прогнозирования водопотребления городов, в основу которой положена многофакторная модель, позволяющая оценивать характер его изменения и активно воздействовать на принятие рациональных управленческих решений с учетом стратегической весомости населенных пунктов.

5. Использование методики позволяет не только оценить дефицит воды или рациональное ее использование в городах, но и охарактеризовать жизнедеятельность города, его индустриально-промышленное состояние, культуру водопотребления, определить специальное назначение населенного пункта.

6. Установлено, что для городов с численностью населения от 0,139 до 15 млн человек скорость роста общего удельного среднесуточного водопотребления значительно выше, чем для городов с численностью населения от 0,004 до 0,034 млн человек. В городах с численностью населения 0,034 до 0,139 млн человек происходит процесс стабилизации темпов роста удельного среднесуточного водопотребления. Рациональное водопотребление характерно для городов с ограниченной численностью до 140 тыс. человек.

# ГЛАВА 5

# РАЗРАБОТКА МЕТОДА ДВУХКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ

## 5.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ О СИСТЕМЕ ДВУХКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Общие подходы, разработанные в [103, 229, 318], не дают возможности повысить эффективность работы насосных станций.

Действующие в городах системы подачи и распределения воды (ПРВ) не обеспечивают надежного и систематического снабжения водой и тем более работы насосных станций вблизи максимальных КПД. В настоящей главе рассмотрены вопросы, затрагивающие указанные недостатки работы системы ПРВ.

Основные задачи, которые необходимо решить для реализации предложенной идеи двухконтурного управления системой ПРВ, заключаются в следующем:

выявить основные гидродинамические параметры — потокораспределение в действующей системе ПРВ, состояние пьезометрии, эквивалентное гидравлическое сопротивление системы;

с использованием этих параметров определить местонахождения диктующей точки для оперативного управления;

систематически измеряя указанные гидродинамические параметры и используя материалы, изложенные в главе 3, определить с помощью расчетов величину гидравлических сопротивлений отдельных ветвей и эквивалентного сопротивления;

обеспечить системе оперативного управления стабилизацию давления в диктующей точке с использованием полученных результатов (в реальном масштабе времени);

выявить в условиях стабилизации давления в диктующей точке (одноконтурная система управления), при заметном изменении режима работы насосной станции, состояние распределения потоков в водосети и обнаружить повреждения (второй контур управления системой) для оперативного принятия решения диспетчером.

Изложенные задачи решались на действующей насосной станции № 25А Харькова и в разветвленной водосистеме Алексеевского жилого массива, Павлова поля и нагорной части города с учетом работы системы водоснабжения города в целом.

Ниже приводятся результаты реализации этих задач.

## 5.2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДОВ

Большинство водопроводов крупных регионов Украины не имеют развязки по отдельным уровням, что снижает надежность и эффективность их функционирования и значительно усложняет реализацию управления водоснабжением.

При проектировании сети необходимо учитывать рельеф местности. Резервуары, расположенные на достаточно высоких отметках, могут служить напорными (активными) емкостями, аналогичными водонапорным башням, так как при одной и той же вместимости резервуар всегда значительно дешевле башни. Напорные емкости следует устраивать в виде «нагорных» резервуаров везде, где это позволяет рельеф местности и где они не будут представлять угрозу для безопасности населения.

Резервуары второго типа — безнапорные (пассивные), т.е. такие, из которых вода может поступать в систему лишь путем перекачки ее насосом. Такого типа резервуары заодно являются регулирующими емкостями.

Таким образом, при эксплуатации региональной водопроводной сети, управляемой по водораспределению и обладающей иерархической структурой с развязкой уровней через резервуары, следует иметь:

разумное количество резервуаров, объем которых, исходя из стратегических целей, должен соответствовать объему трехсуточного запаса воды, необходимой городу;

требуемый объем каждого резервуара.

Второй уровень (городской водовод большого диаметра), естественно, присутствует в структуре водоснабжения современных городов. К этому уровню можно отнести участки магистральных водоводов от станции 3-го подъема. К недостаткам таких водоводов (рис. 5.1) следует отнести:

низкий уровень надежности;

древовидность структуры, которая служит причиной высоких напоров, что также приводит к снижению надежности, и др.

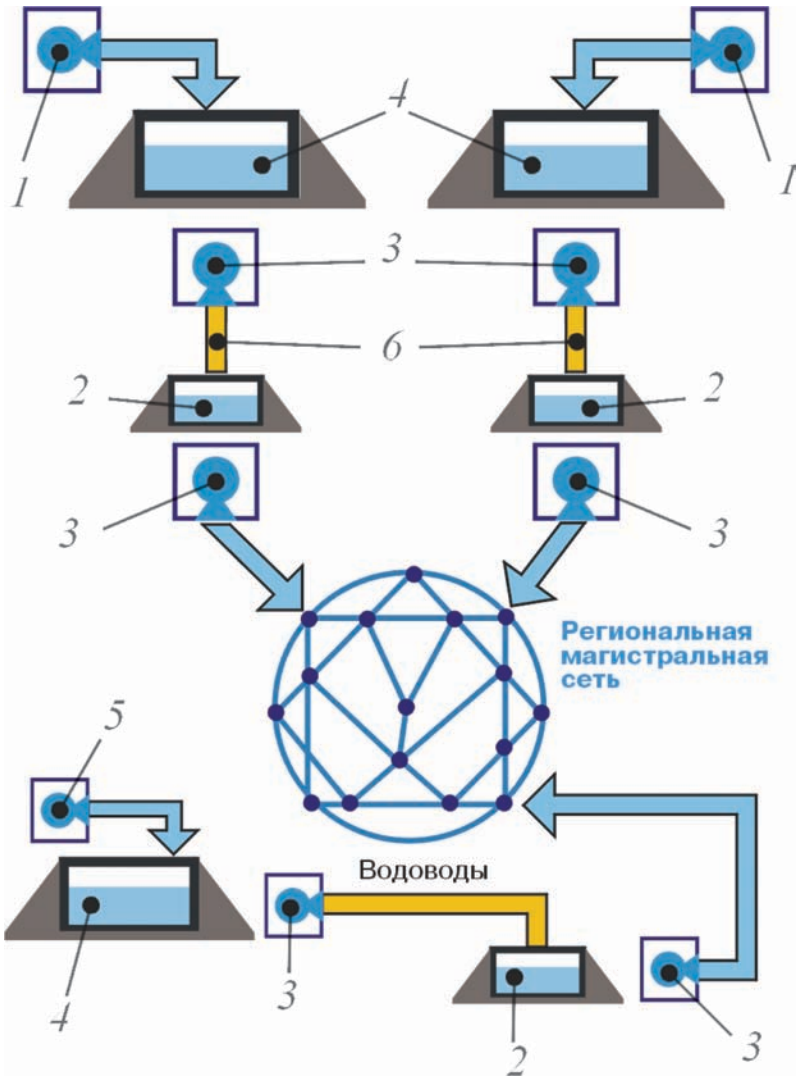



Рис. 5.1. Пример распространенной структуры водоснабжения:
*1* — выходные станции 2-го подъема; *2* — зональные резервуары;
*3* — насосные станции; *4* — региональные резервуары; *5* — выходная станция;
3-го подъема; *6* — водоводы

При решении поставленных задач необходимо учитывать размеры обслуживаемой территории, численность населения, объем и режим водопотребления, требуемые расходы и напоры, разность геодезических отметок.

Указанные выше недостатки можно устранить, если городской водовод построить так, чтобы группа насосных станций питалась от общего гравитационно-напорного водовода. В пределе такой водовод может иметь кольцевую (рис. 5.2) или полукольцевую структуру для города с наклонным рельефом (рис. 5.3).

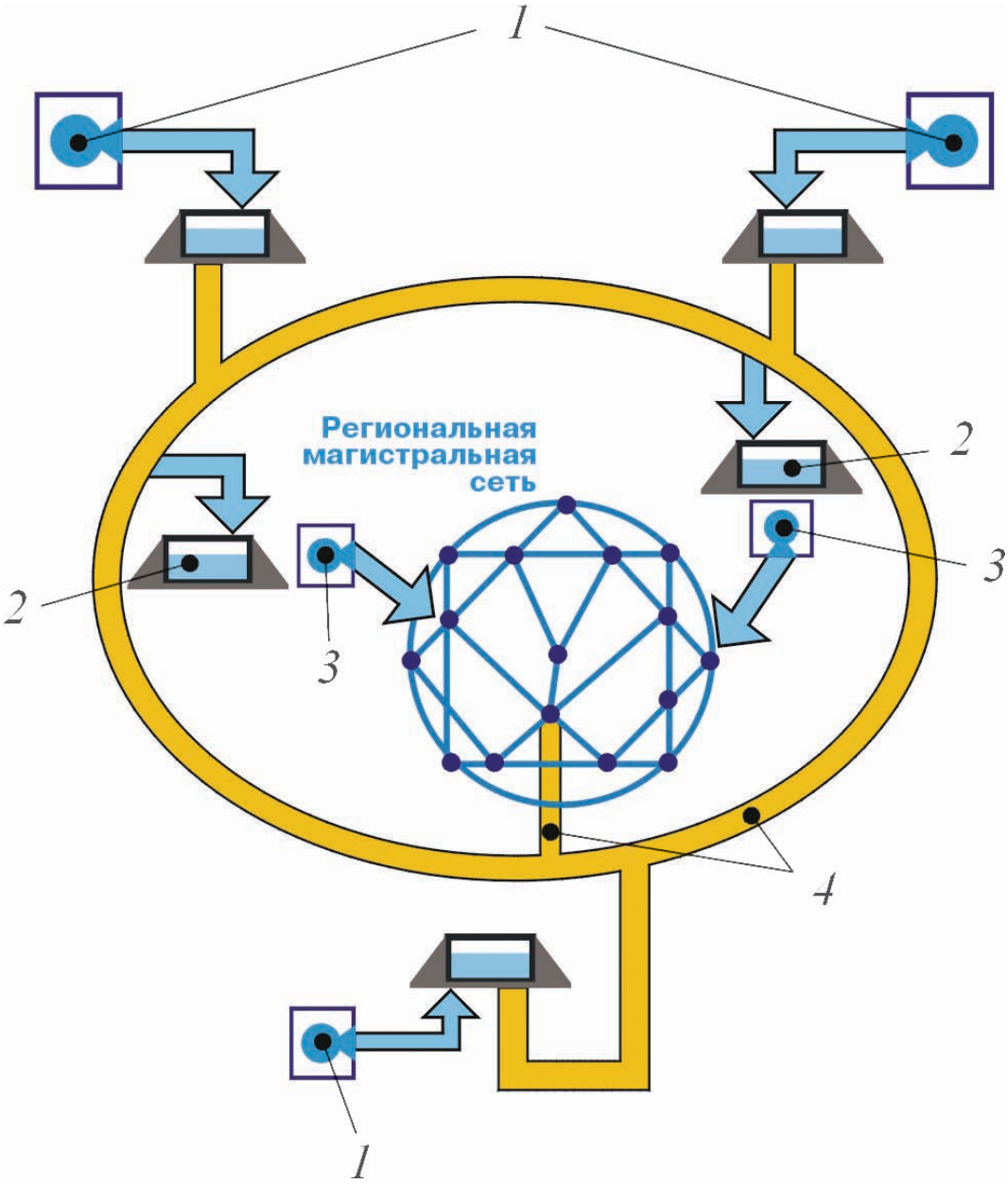



Рис. 5.2. Принципиальная схема водоснабжения с региональным кольцевым водоводом:
*1* — выходные станции 3-го подъема; *2* — зональные резервуары;
*3* — насосные станции; *4* — гравитационно-напорный региональный водовод

Приведенные схемы водоснабжения (рис. 5.2 и 5.3) сглаживают на практике вероятностный характер водопотребления, повышают пропускную способность системы и ее надежность, а также существенно упрощают проблему управления водораспределением, сводя ее к простой задаче контроля и регулирования. Отметим также, что сам напорный водовод является достаточно большой аккумулирующей емкостью.

Задачи рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды существенно упрощаются, если из общей сети можно выделить любой отдельный уровень. Достигается это путем развязки существующих уровней через различные регулирующие элементы. Ими могут быть, в частности для городских водопроводных сетей, резервуары. При этом структура сети примет вид, представленный на рис. 5.4.

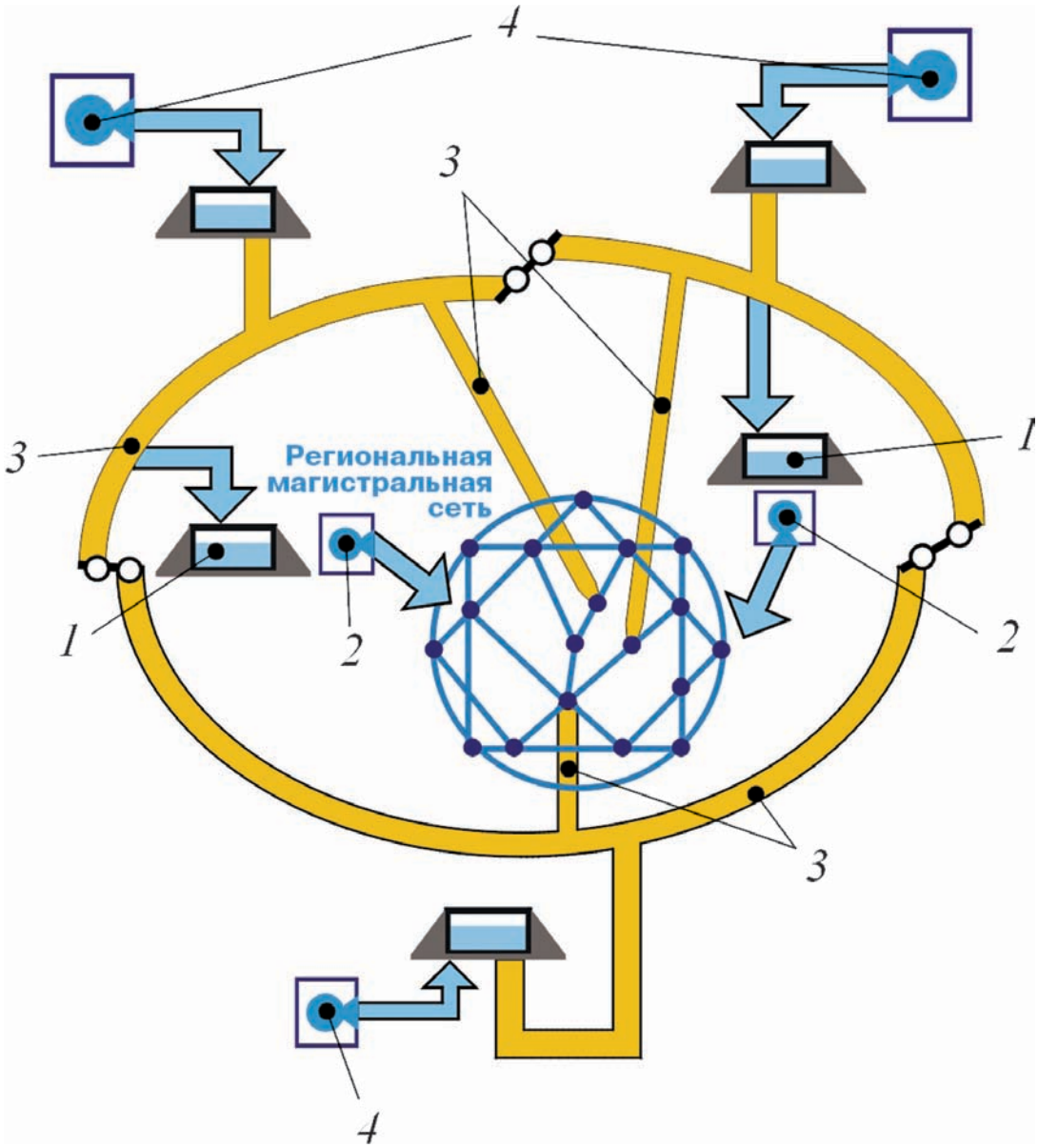



Рис. 5.3. Принципиальная схема водоснабжения с группой водоводов:
*1* — зональные резервуары; *2* — насосные станции;
*3* — гравитационно-напорные региональные водоводы;
*4* — выходные станции 3-го подъема

В отличие от рассмотренных, в данной книге предложена [241] и осуществлена схема, изображенная на рис. 5.5. Кольцевой водовод вокруг города позволяет осуществлять радиальную подачу воды для вертикальных и горизонтальных зон водоснабжения как с помощью насосных станций, так и по гравитационно-напорным водоводам. Кольцевая система обеспечивает необходимую маневренность водоснабжения в случае отключения одного из источников, питающего кольцевой водовод.

При наличии такой системы стало возможным исследовать магистральные водоводы в широком диапазоне изменения чисел Рейнольдса (см. главу 3), а также реализовать идеи оперативного управления системы, изложенные в данной главе.

Только сейчас, с появлением современных технических средств, создалась экспериментальная база, которая позволила увидеть и понять реальную жизнь системы ПРВ.

Существующие системы автоматического управления, работающие по принципу стабилизации одного параметра, как правило, являются одноконтурными и по эффективности сравнимы

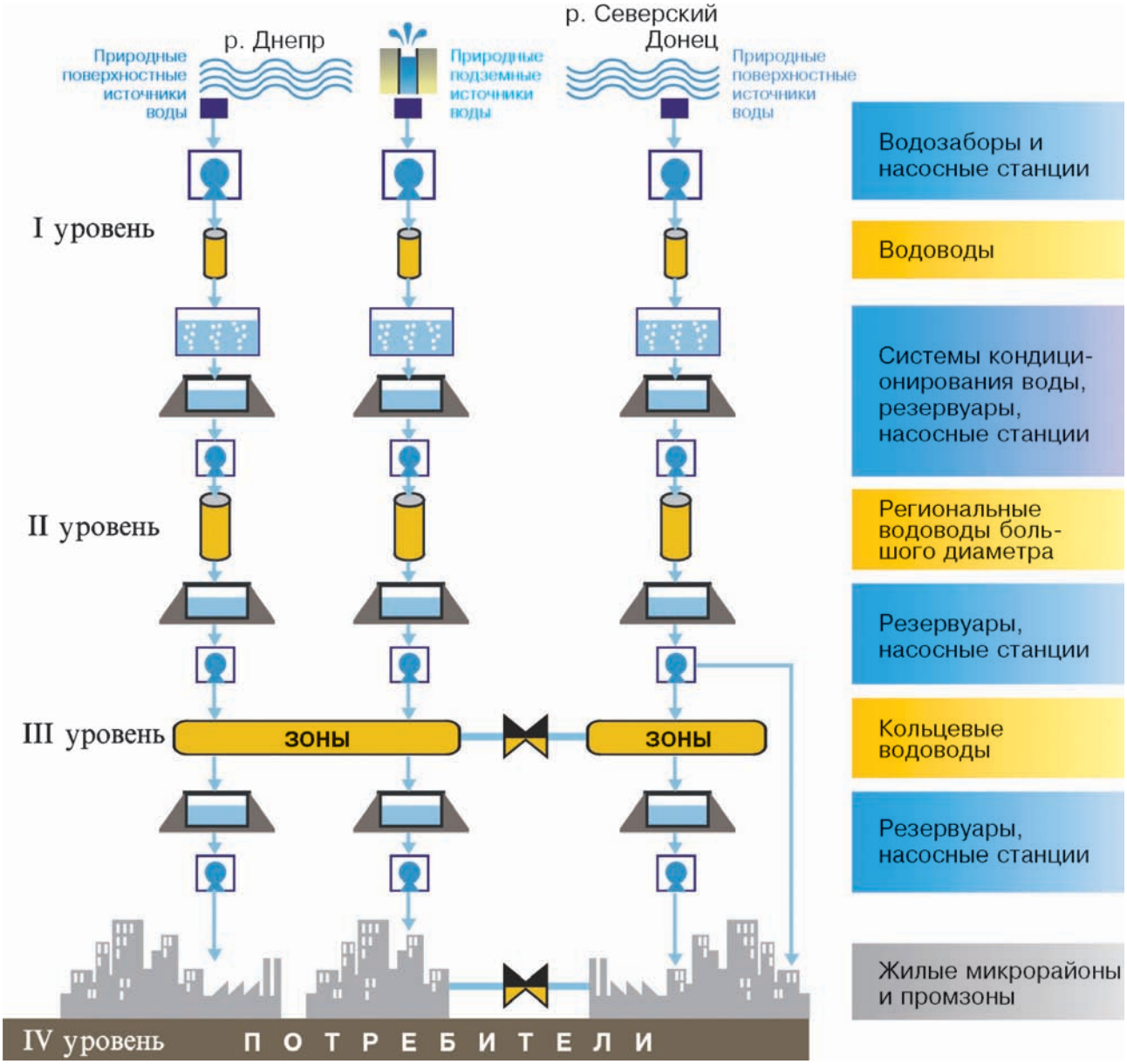



Рис. 5.4. Структура системы водоснабжения региона

с ручным регулированием. Они до сих пор используются в управлении многими насосными станциями, вследствие чего происходят значительные потери электроэнергии [103, 229].

Для эффективного управления системами ПРВ необходимо многообразие возмущающих воздействий привести в соответствие с управляющими воздействиями, обеспечив многоконтурность системы управления несколькими насосными станциями. Известно [75, 275], что одноконтурная система в принципе не может обладать необходимым разнообразием свойств для надежного и устойчивого управления работой системы ПРВ и контроля ее параметров.

Эта идея была высказана еще в 1958 г. проф. Г.В. Щипановым [275]. По его утверждению, увеличение контуров обратных связей придает системе качественно новые свойства. Действительно, качественно новые свойства системы водоснабжения должны исходить из условия бесперебойности водоснабжения с минимальными затратами ресурсов. Однако до сих пор большинство систем ПРВ строится на недостаточно обоснованном представлении о возможности одноконтурного управления системой ПРВ при любом числе внешних возмущений.

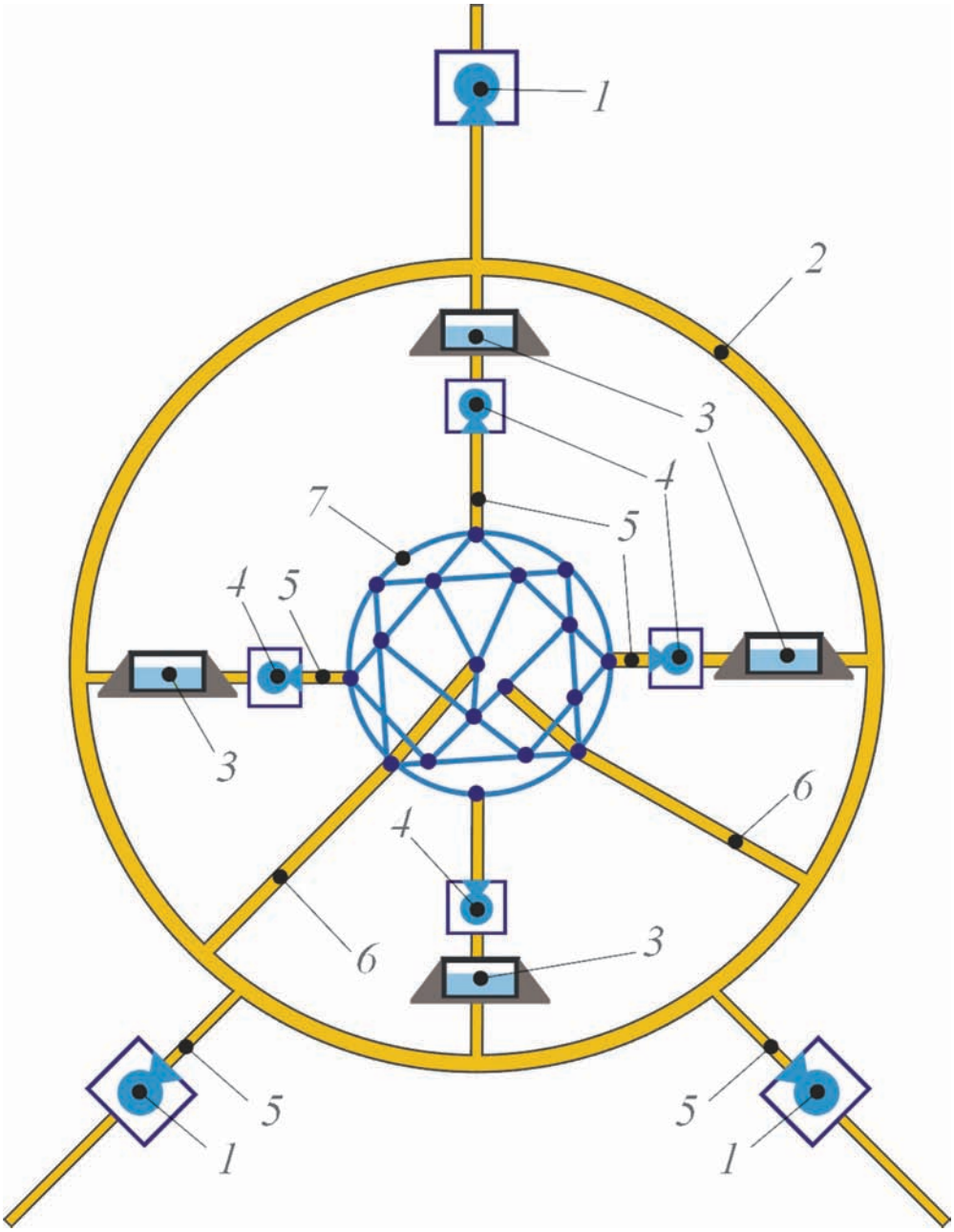



Рис. 5.5. Принципиальная схема водоснабжения с линейным подключением системы ПРВ к кольцевому водоводу: *1* — насосные станции 3-го подъема; *2* — кольцевой водовод; *3* — резервуары; *4* — насосные станции; *5* — водоводы; *6* — гравитационно-напорные водоводы; *7* — магистральная система водоводов внутри города

Учитывая технологические требования к процессу подачи и распределения воды, все разнообразие задач управления режимом работы насосной станции и диктующей точки можно представить в виде

$$\begin{aligned} &1)\ Q = \text{var}, \quad P_{\text{вых}} = \text{var}, \quad P_{\text{дт}} = \text{var};\\ &2)\ Q = \text{const}, \quad P_{\text{вых}} = \text{var}, \quad P_{\text{дт}} = \text{var};\\ &3)\ Q = \text{var}, \quad P_{\text{вых}} = \text{const}, \quad P_{\text{дт}} = \text{var};\\ &4)\ Q = \text{var}, \quad P_{\text{вых}} = \text{var}, \quad P_{\text{дт}} = \text{const}. \end{aligned} \qquad (5.1)$$

Здесь $Q$ — расход насосной станции; $P_{\text{вых}}$ — давление на выходе из насосной станции; $P_{\text{дт}}$ — давление в диктующей точке.

Первый пункт иллюстрирует ручной режим работы насосной станции в сети — наиболее характерный случай для подавляющего большинства систем водоснабжения городов Украины, остальные — возможные варианты регулирования одного из параметров, что соответствует более совершенному уровню управления системой ПРВ.

Для анализа параметров и выбора способа управления будем классифицировать переменные, влияющие на процесс подачи и распределения воды, представив их в виде управляемых $[X(t)]$, управляющих $[Y(t)]$ и возмущающих воздействий $[Z(t)]$ (табл. 5.1).

Данная классификация не является исчерпывающей. Тем не менее она дает представление о разнообразии переменных и влиянии их на процесс водоснабжения, а также позволяет наметить пути возможных решений при анализе системы ПРВ как объекта управления.

Если ставить задачу изучения влияния многообразия отдельных факторов на процесс подачи и распределения воды, то, как видно из табл. 5.1, программа исследований, которые необходимо провести для решения, представляется довольно сложной. Несоизмеримо сложнее она становится при выявлении взаимосвязей между переменными. Поэтому при проведении исследований актуальным представляется выявление характера функциональной связи между основными переменными.

Таблица 5.1

**Классификация переменных, влияющих на процесс подачи и распределения воды**

| Управляемые параметры $[X(t)]$ | Управляющие воздействия $[Y(t)]$ | Возмущающие воздействия $[Z(t)]$ |
|---|---|---|
| $Q(t)$ — производительность насосной станции<br>$P_{вых}(t)$ — давление на выходе насосной станции<br>$P_{дт}(t)$ — давление в диктующей точке | $Q(t)$ — производительность насосной станции<br>$P_{вых}(t)$ — давление на выходе насосной станции<br>$P_{дт}(t)$ — давление в диктующей точке | $Q_с(t)$ — суточная неравномерность водопотребления<br>$Q_А(t)$ — утечка, связанная с авариями на водопроводных сетях<br>$f(t)$ — частота сети электродвигателя |
| $N(t)$ — мощность, потребляемая насосной станцией<br>$\eta(t)$ — коэффициент полезного действия установки | $n(t)$ — частота вращения рабочего колеса насосного агрегата<br>$Z_{dv}(t)$ — состояние выходной задвижки | $P_в(t)$ — давление на входе насосной станции<br>$R_к(t)$ — износ рабочего колеса насоса<br>$Q_у(t)$ — утечки на водопроводных сетях<br>$Q_х(t)$ — прочие потери воды, носящие случайный характер<br>$З(t)$ — состояние запорной арматуры<br>$\lambda(t)$ — зарастание труб |

Известно [24, 303, 333], что подача насоса $Q$ и напор насоса $H$ связаны с частотой вращения вала рабочего колеса насоса $n$ соотношениями

$$Q_1 = \frac{n_1}{n} Q; \tag{5.2}$$

$$H_1 = \left(\frac{n_1}{n}\right)^2 H, \tag{5.3}$$

где $Q_1$, $H_1$ — значения подачи и напора при частоте вращения вала $n_1$.

На величинах выходных параметров $Q$ и $H$ сказывается влияние возмущающих воздействий, приведенных в третьей колонке табл. 5.1, которые имеют случайный характер

и значения которых прогнозируются с некоторой ошибкой $\pm Q^*$. Следовательно, величину подачи насосной станции $Q$ правильнее было бы представить в виде

$$Q = Q_c \pm Q^*, \tag{5.4}$$

где $Q_c$ – величина расхода подаваемой насосной станцией воды, которую можно предсказать с достаточной точностью путем обработки статистических данных, измеренных в течение суток, месяца, года;

$Q^*$ – изменение величины подачи, вызванное случайными факторами (возмущающие воздействия, третья колонка табл. 5.1).

На первый взгляд может показаться, что изменение $Q^*$, приводящее к изменению связанного с ним давления, можно легко скорректировать изменением подачи насосного агрегата. Однако если не знать природы возмущения, вызвавшего эти изменения, то подобная корректировка будет не только ошибочной, но и убыточной, так как приведет к увеличению расхода воды, электроэнергии и, естественно, к снижению прибыли водопроводного хозяйства, а нередко и к прямому ущербу.

Вместе с тем при аварии на водосети традиционная одноконтурная система стабилизации давления будет компенсировать падение давления увеличением подачи, «не понимая», что работает на увеличение потерь ресурса (энергии потока воды — напора, электроэнергии и т. д.). В мировой практике водоснабжения крупных городов Америки и Европы известны случаи серьезнейших аварий такого типа, приведших к колоссальному ущербу [107].

Как видно из табл. 5.1, основными параметрами регулирования работы насосной станции является величина ее подачи и давление на выходе.

## 5.3. О ПОВЫШЕНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ НАСОСНЫХ СТАНЦИЙ

Регулирование режима работы насосной станции осуществляется тремя основными методами: регулированием подачи путем повторяющегося включения или выключения насосного агрегата; изменением характеристики сети и изменением характеристики насоса.

По первому методу электродвигатель насосного агрегата потребляет электроэнергию только во время его работы [276]. Периодичность включения и отключения насоса соответствует требуемой подаче. Этот метод не нашел применения в системах водоснабжения (за исключением насосных станций водоотведения), так как приводил к быстрому износу пусковой аппаратуры и электромеханического оборудования, а также к возникновению гидроударов в системе.

До 80-х годов регулирование подачи насоса изменением характеристики сети было, пожалуй, единственным методом, позволяющим управлять производительностью насосного агрегата. Изменение характеристики сети производилось дросселированием либо перепуском (байпасированием) [24, 276].

Как правило, насосы оснащаются нерегулируемым электроприводом, при этом единственным способом регулирования является дросселирование на стороне нагнетания. Регулирование подачи воды насосами применяют в следующих случаях.

1. Если необходимо регулировать количество подаваемой насосом воды в связи со случайным изменением ее потребности или с требованиями технологического процесса.

2. Если требуется снизить создаваемый насосом избыточный напор, т.е. обеспечить требуемую подачу воды первоначальной подрегулировкой положения задвижки (неполным открытием напорной задвижки).

Регулирование с помощью напорной задвижки, т.е. изменение подачи воды способом дросселирования, осуществляется весьма просто, однако оно крайне невыгодно с энергетической точки зрения. Дросселирование ведет к существенному снижению КПД агрегата по двум причинам: а) из-за потери мощности в задвижке, б) вследствие уменьшения КПД самого насоса [276].

Как видно из рис 5.6, при открытой задвижке рабочая точка $A$ соответствует максимальной подаче $Q_1$ и напору $H_1$ (рис. 5.6, *а*). Прикрывая задвижку, т.е. вводя дополнительное сопротивление $S_з$, вызывающее уменьшение подачи $Q$, происходит переход к работе в новой точке $B$ с параметрами $Q_2$ и $H_2$. При пониженной подаче $Q_2$ насос создает повышенный напор $H_2$, однако в сети из-за потерь напора $\Delta H_з$ напор $H_с$ не изменится (точка $C$ соответствует новой характеристике сети $S_2 = S_1 + S_з$ ).

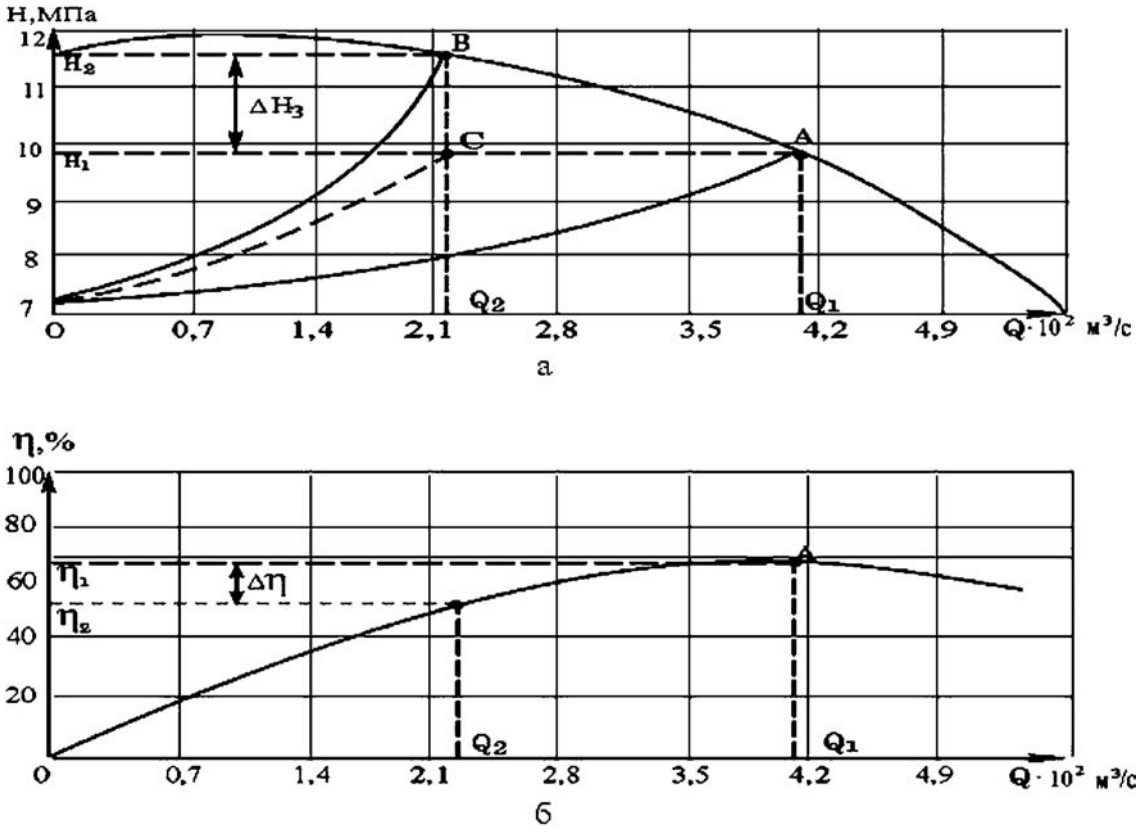



Рис. 5.6. Зависимость напора (*а*) и КПД насоса типа ЦН150-100 (*б*) от подачи (потока) $Q$ при регулировании дросселированием

Наиболее распространенное плавное регулирование способом дросселирования потока воды в напорной линии, как сказано ранее, весьма неэкономично из-за значительных потерь энергии на преодоление дополнительного сопротивления регулирующей арматуры. Кроме того, применяемые для дросселирования задвижки, клапаны, затворы по техническим характеристикам предназначены для работы в режиме полного открытия или закрытия, а при использовании их в режиме регулирования они быстро выходят из строя. Несмотря на неэкономичность и другие недостатки способа дросселирования, при проектировании насосных станций другие способы регулирования не предусматривались. В то же время существует теория автоматизированного электропривода, базирующаяся на математических методах [302], и разработаны одноконтурные системы автоматического регулирования насосных установок с регулируемым электроприводом [103, 229, 276].

К концу 60-х годов на насосных станциях водоснабжения начали использовать способ регулирования изменением угловой скорости рабочего колеса насоса. В качестве средств регулирования вначале использовались электроприводы с гидравлическими либо индукторными муфтами скольжения [119, 320]. Но они не нашли широкого применения из-за неэкономичности, сложности и ненадежности в эксплуатации.

Позднее, с 70-х годов, стали предприниматься попытки использования в качестве средств регулирования угловой скорости частотно-регулируемого электропривода на базе преобразователей частоты.

Как известно [97, 267], между производительностью $Q$, мощностью насоса $N$ и частотой вращения вала рабочего колеса насоса $n$ существуют следующие зависимости:

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{Q_1}{Q_2}\right)^3 = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3. \qquad (5.5)$$

Отсюда следует, что уменьшение производительности $Q$ насосного агрегата, вызванное снижением частоты вращения $n$ вала насоса, резко уменьшает потребляемую мощность $N$ по сравнению с дроссельным регулированием, предназначенным для достижения той же цели.

Как следует из приведенного фирмой «Стремберг» [276] графика экономии электроэнергии (рис. 5.7), которую можно получить при регулировании с помощью преобразователя частоты, в сравнении с дроссельным регулированием, для обеспечения подачи воды методом дроссельного регулирования в объеме 75 % номинального, необходимо затратить мощность, равную 95 % номинальной (точка $A$), а при регулировании числом оборотов — всего лишь 42 %.

По данным этой же фирмы, при испытаниях двух аналогичных насосных агрегатов мощностью 100 кВт двумя методами регулирования — дросселированием и изменением частоты вращения вала насоса при подаче, равной 70 % номинальной, КПД при дросселировании составил 0,4, а при регулировании частотой вращения вала насоса — 0,69.

Подобные сравнительные данные приводятся и в других источниках [88] (рис. 5.8). Они аналогичны результатам, полученным в процессе многолетней эксплуатации преобразователей частоты на объектах КП «ПТП «Вода» [114].

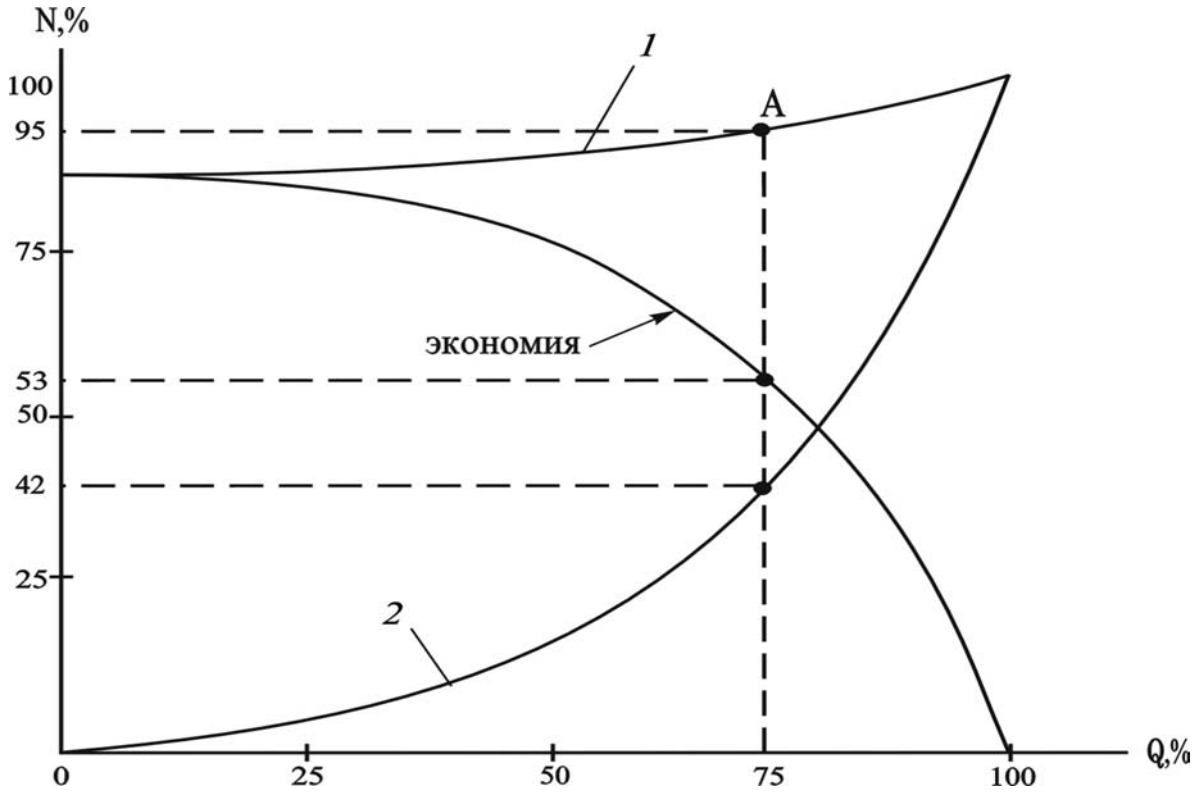



Рис. 5.7. Экономия электроэнергии при регулировании насоса с помощью преобразователя частоты:
*1* — регулирование при помощи клапана;
*2* — регулирование при помощи преобразователя частоты

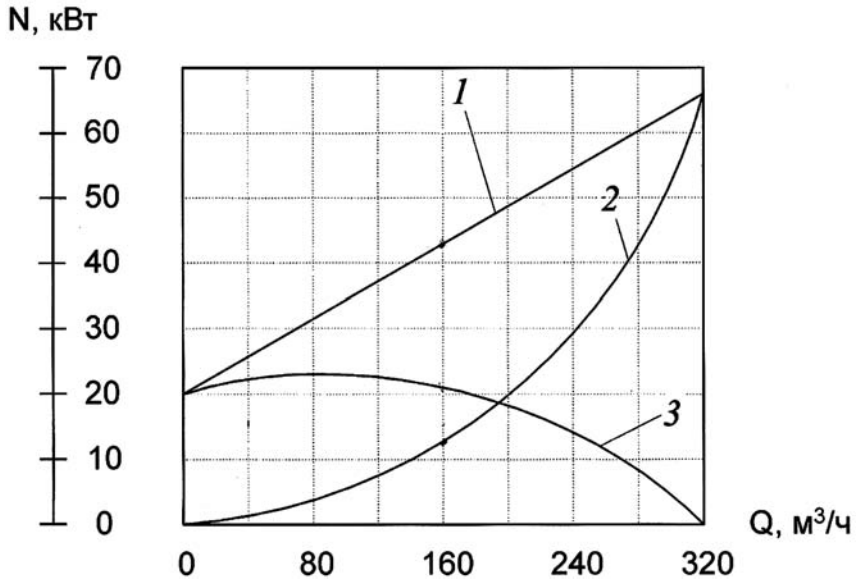



Рис. 5.8. Потребление мощности при различных способах регулирования скорости вращения насосов:
*1* — при дросселировании; *2* — при частотном регулировании;
*3* — уменьшение потребляемой мощности

На рис. 5.9 и 5.10 показаны зависимости $H$, $N$, КПД от $Q$, полученные экспериментальным путем в течение суток на насосной станции № 25А Харькова при совместной работе двух насосов D4000-95, один из которых оснащен регулируемым электроприводом мощностью 1250 кВт.

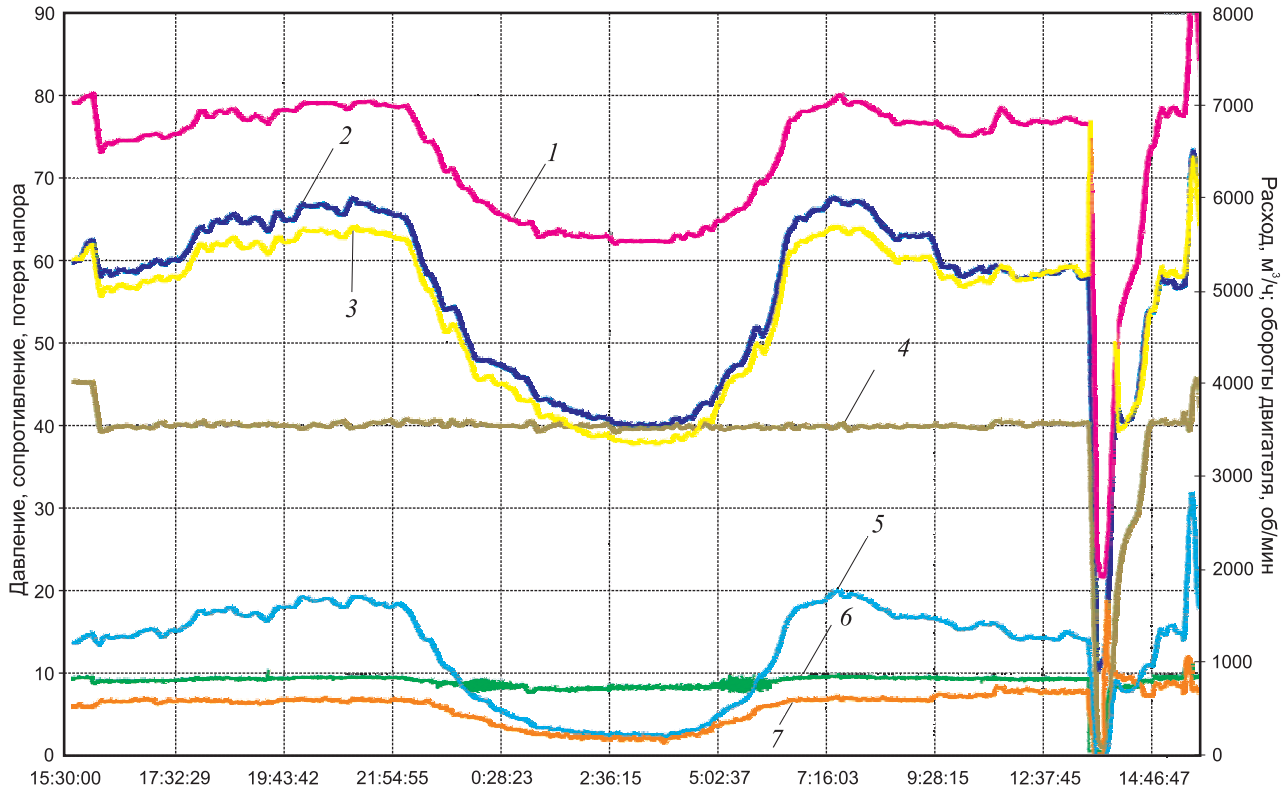



Рис. 5.9. Автоматическое управление системой ПРВ от насосной станции № 25А на жилые массивы Павлова Поля, Алексеевки и нагорной части Харькова:
*1* — давление на насосной станции; *2* — расход воды на насосной станции; *3* — КПД насосной станции;
*4* — давление в диктующей точке КТ № 1; *5* — потеря напора на сети;
*6* — число оборотов двигателя; *7* — сопротивление сети

Как показывают результаты измерений основных рабочих параметров системы (рис. 5.9), система регулирования обеспечивала стабильность заданного давления в диктующей точке, несмотря на заметно изменяющиеся режимы водопотребления. Способ выбора места диктующей точки будет описан в главе 6. В рассматриваемый здесь период времени зафиксированы результаты искусственно созданных режимов гидроудара (в 13.30 ч) и аварии (в 15.30 ч), сымитированной открытием сбросной задвижки на водосети. Система работала в режиме двухконтурного управления. Характеристики насосов, а также рабочие точки режимов, приведенных на рис. 5.9, попадают в закрашенную область (рис. 5.10). Последняя характеризуется значениями КПД, близкими к максимальному. Как видим, предложенное двухконтурное управление является оптимальным для данных условий работы (КПД в пределах 60 %).

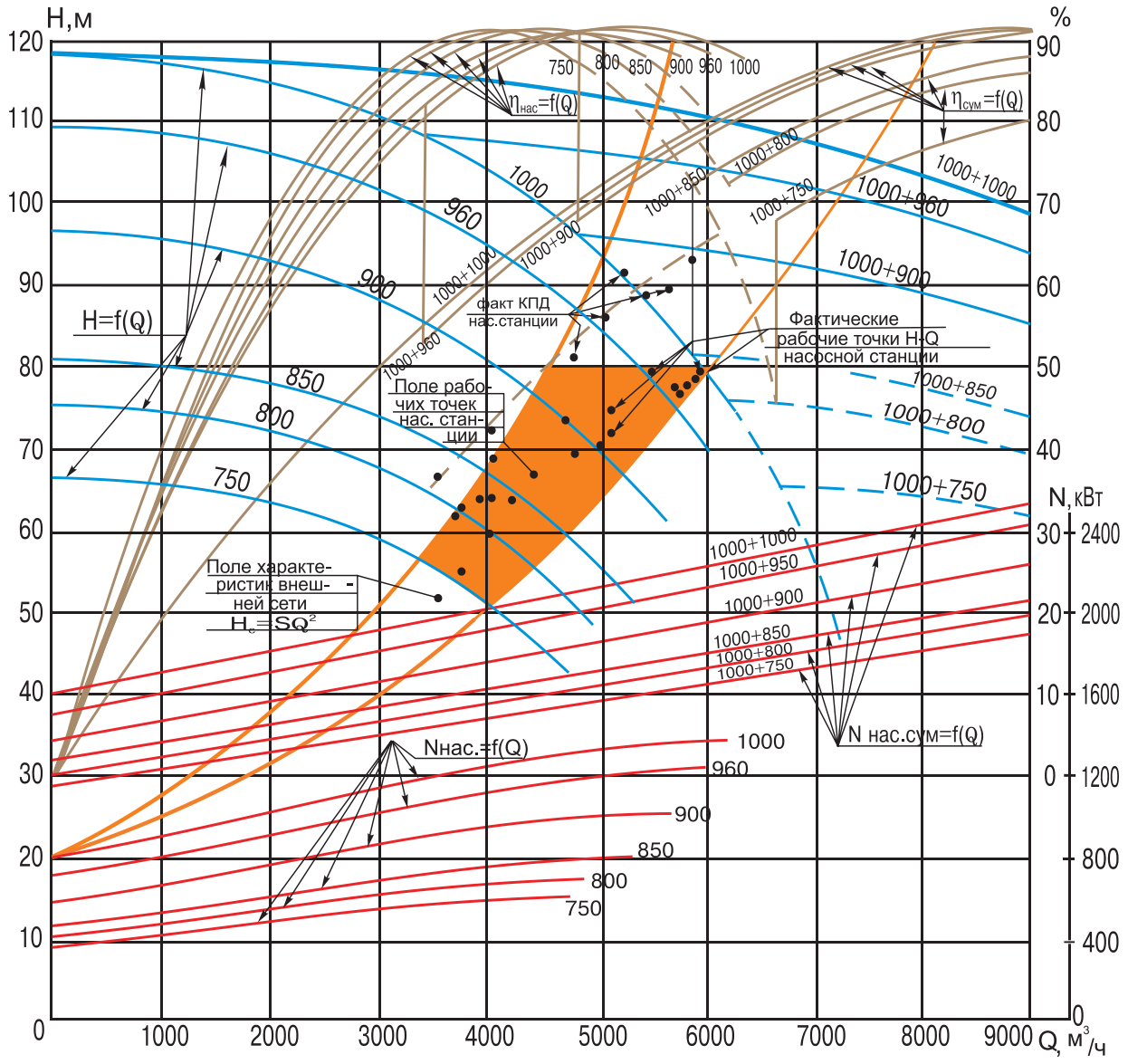



Рис. 5.10. Характеристики работы насосной станции № 25А при параллельной работе регулируемого и нерегулируемого насосных агрегатов

В дневное время суток требуемый режим работы насосной станции обеспечивался совместной работой двух насосов. Первый — нерегулируемый, а второй имел возможность изменять частоту вращения своего рабочего колеса посредством изменения частоты питающего напряжения на приводном электродвигателе от преобразователя частоты серии ПЧВН. Ночной режим работы обеспечивался одним регулируемым насосным агрегатом.

Как следует из рис. 5.9 и 5.10, регулирование изменением частоты вращения вала насоса вниз от номинальной приводит к новым положениям характеристик насоса, которые смещаются почти параллельно в сторону снижения напора (кривые $H-Q$ для оборотов $n$ = 960, 900, 850, 750).

При этом рабочая точка на кривой характеристики сети (рис. 5.10) смещается, занимая новые положения на поле рабочих точек насосной станции (область, ограниченная крайними положениями характеристик сети).

Новым положениям рабочей точки соответствуют и новые значения напоров, расходов, сопротивления системы, потребляемой мощности и КПД. В дневное время суток требуемый режим работы насосной станции осуществлялся нерегулируемым и регулируемым насосными агрегатами. Графики совместной работы двух насосов, полученные суммированием характеристик по линии равных напоров, представлены для различных частот вращения регулируемого насоса.

Для всех режимов работы насосной станции получены значения потребляемой мощности и КПД (рис. 5.10 и 5.11). Метод регулирования режима работы насосной станции посредством изменения частоты вращения вала насоса практически не приводит к дополнительным потерям в системе «насосный агрегат — сеть», как это происходит с дросселированием режимов подачи воды от насосной станции в водосеть. КПД насосной установки максимален в точке, соответствующей номинальному (паспортному) для данного насоса числу оборотов, в данном случае 1000 об/мин, и снижается при отклонении от нее в любую сторону.

Представленные на рис. 5.10 характеристики получены экспериментальным путем на насосной станции № 25А, управляемой системой автоматики и поддерживающей постоянный напор в диктующей точке сети на уровне 40 м; рис. 5.11 является дополнительной иллюстрацией к сказанному.

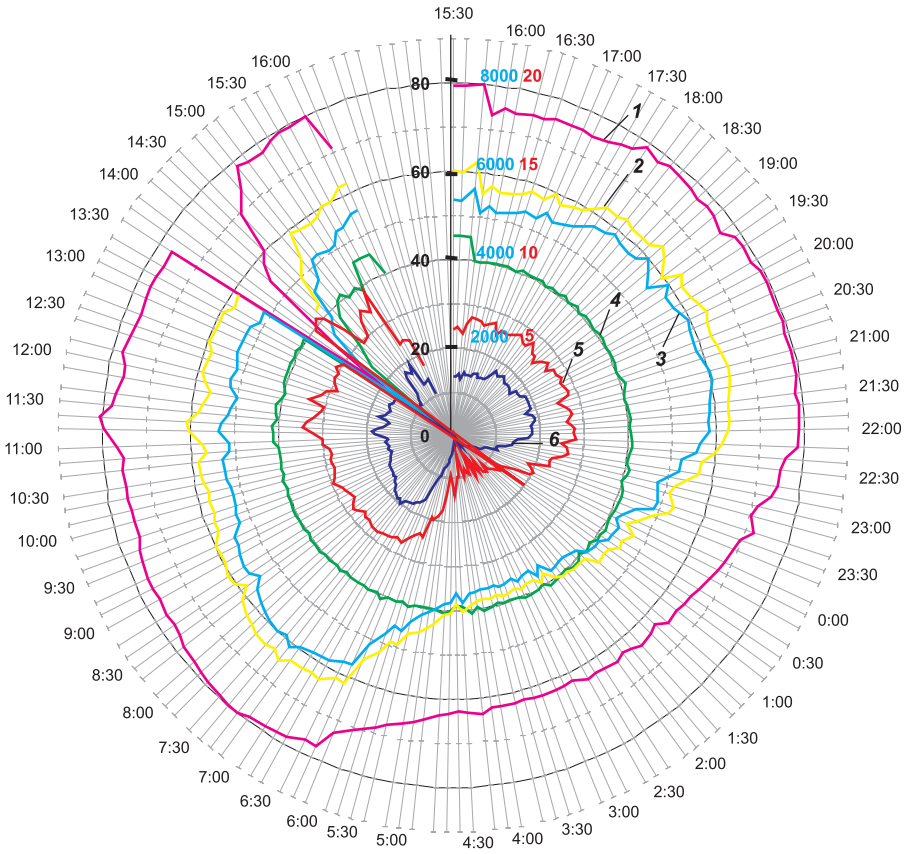



Рис. 5.11. Характеристики режимов совместной работы системы ПРВ от насосной станции № 25А по часам суток и динамика изменения КПД насосной станции. КПД = $f$ ($Q_H$, $H_L$, $h_{L+M}$):
*1* — давление на насосной станции (шкала 0–80);
*2* — КПД насосной станции (шкала 0–80); *3* — расход воды на станции (шкала 0–8000); *4* — давление в диктующей точке КТ №1 (шкала 0–80);
*5* — сопротивление сети (шкала 0–20); *6* — потеря напора (шкала 0–80)

Напор в диктующей точке сохранялся неизменным до момента, когда была включена имитация аварийного режима (15 ч 30 мин). С этого времени немедленно началось возрастание расходов воды. Система автоматики, реагирующая на уменьшение давления в диктующей точке, сразу же вызвала повышение давления на выходе из насоса путем увеличения частоты вращения двигателя насосного агрегата. Такие изменения параметров преобразовываются в световой и звуковой сигналы для лица, принимающего решение. Гидроудар, вызванный отключением электроэнергии (13 ч 30 мин), также зафиксирован этой диаграммой. Изменения всех отраженных на диаграмме параметров использованы в последующих исследованиях гидроудара в системе ПРВ.

Система автоматического управления построена в соответствии с принципом инвариантности [75, 275] и предусматривает одновременное использование регулирования по отклонению напора в диктующей точке и по скорости изменения расхода как выходного параметра.

Реализация двухконтурного управления осуществляется заданием давления в диктующей точке сети, которое производится оператором насосной станции с клавиатуры компьютера. Эта величина передается в контроллер КОМКОН, где сохраняется в энергонезависимой памяти в качестве уставки.

На аналоговые входы контроллера поступают данные о всех контролируемых параметрах насосной станции. На дискретные входы контроллера подаются параметры телесигнализации о состоянии технологического оборудования станции.

Заданная оператором уставка необходимой величины давления в контрольной точке сравнивается в контроллере с величиной текущего значения данного параметра и вычисляется величина рассогласования (отклонения). В зависимости от величины отклонения и его знака (в сторону увеличения или уменьшения) полученное значение с помощью таймера-счетчика блока преобразования контроллера преобразовывается в число-импульсную последовательность и передается в блок преобразования число-импульсного кода в частоту (один импульс на 0,2 герца).

Преобразованная величина рассогласования подается на вход преобразователя частоты, который увеличивает или уменьшает количество оборотов двигателя в зависимости от пришедших на преобразователь импульсов, тем самым поднимая или понижая давление в сети и в диктующей точке.

В зависимости от скорости изменения давления в диктующей точке, контроллер изменяет частоту подаваемых импульсов на вход преобразователя частоты, сокращая время реакции системы на возмущение. Кроме того, система занимается сбором и отображением на экране ПЭВМ необходимых технологических параметров. Необходимо отметить, что система способна быстро реагировать на значительные аварии в водосети.

Как видно из рис. 5.12, где приведена универсальная характеристика насоса, содержащая кривые $QH$ при регулируемом числе оборотов [97], насосы имеют максимальные коэффициенты полезного действия (до 0,95) при изменении подачи не более чем на 20 % от номинальной (в сторону уменьшения или увеличения). Данное обстоятельство надо иметь в виду при проектировании насосных станций и их реконструкции, одновременно учитывая прогноз водопотребления. Эти соображения, а не среднеарифметические значения расходов и напоров

$$Q_{cp} = \frac{Q_{\min} + Q_{\max}}{2}; \tag{5.6}$$

$$H_{cp} = \frac{H_{\min} + H_{\max}}{2}, \tag{5.7}$$

должны лежать в основе проектов насосных станций и их реконструкции.

Следует также учитывать, что при регулировании частоты вращения в более широких пределах КПД постепенно падает. Однако, несмотря на это, регулирование частоты вращения рабочего колеса насоса является наиболее экономичным и предпочтительным способом регулирования, поскольку, кроме всего прочего, оно полностью исключает гидроудары

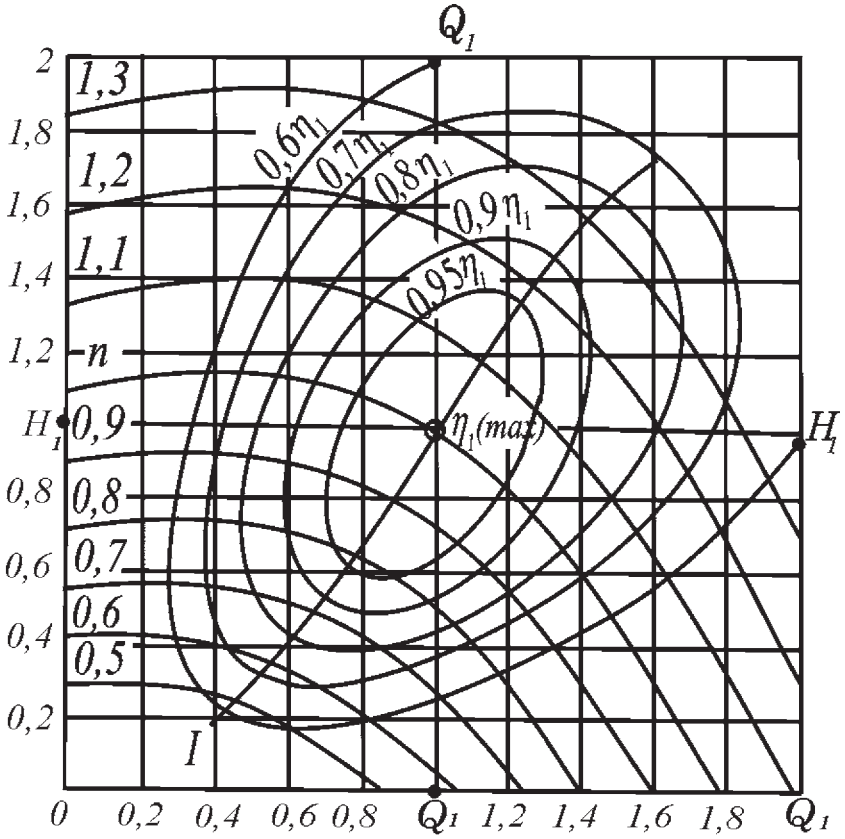



Рис. 5.12. Универсальная характеристика насоса при различной частоте вращения

в трубопроводах, позволяет производить плавный запуск и остановку насосного агрегата, значительно снижая гидромеханические нагрузки на оборудование.

В ТПО «Харьковкоммунпромвод», ныне КП «ПТП «Вода», с 1985 г. были начаты работы по оснащению насосных станций частотно-регулируемыми электроприводами. В числе первых был внедрен преобразователь частоты мощностью 8000 кВт на ПУВХ «Днепр». Сейчас на объектах КП «ПТП «Вода» работает шесть установок с регулируемым электроприводом мощностью от 1,25 до 8,0 мВт и более 40 установок мощностью от 22 до 250 кВт.

Экономия электроэнергии в зависимости от режима работы насосной станции и ее места в технологической схеме водоснабжения составляет до 20 %.

Из этого следует, что в настоящее время изменение частоты вращения рабочего колеса насосного агрегата является наиболее предпочтительным управляющим воздействием в системе автоматизации управления региональными системами ПРВ.

Параметром управления насосной станцией, работающей на водопроводную сеть, который наиболее полно отвечает требованиям управления и надежности водоснабжения, является давление в диктующей точке сети [193, 229]. Стабилизация этого параметра путем изменения частоты вращения рабочего колеса насосного агрегата — наиболее приемлемый способ оперативного управления на втором этапе.

Необходимо отметить, что эффективность такого управления будет весьма высока, если для отрезка времени $T$ решен первый этап оперативного управления — рациональное планирование водораспределения на плановый период $T$.

Исходя из этих требований и классификации, приведенной в табл. 5.1, можно сформулировать требования к системе управления процессом ПРВ как к системе, близкой к оптимальной, и определить ее критерии.

Особенность подхода заключается в том, что вместо одноконтурной системы управления режимом работы насосной станции будет рассмотрена двухконтурная система. Суть ее состоит в следующем.

На первом этапе решается задача синтеза одноконтурной системы автоматического регулирования насосной станции при стабилизации напора в диктующей точке. На втором этапе контролируются расход воды и напор в узлах фрагмента сети управляемой зоны с обработкой по специальной программе, позволяющей с большой точностью определить внештатную ситуацию (аварию в водосети, отключение большой группы потребителей, несанкционированный крупный отбор воды и т. д.). Поскольку оба эти этапа (стабилизация и контроль) реализуются одновременно, то такую систему управления режимом работы насосной станции можно назвать двухконтурной. Как правило, такой принцип управления осуществляется на нижнем уровне диспетчерского управления, т.е. локальным диспетчерским пунктом.

## 5.4. АНАЛИЗ ПОТОКОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ В УЗЛАХ СЕТИ И СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ

Для достижения поставленной цели надо было выполнить следующие основные виды работ:

обследовать состояние запорно-регулирующих устройств в водосети;

установить контрольно-измерительные приборы для оценки потокораспределения и пьезометрии;

определить основные исходные данные, необходимые для проведения расчетов водосети.

В качестве иллюстрации рассмотрим основной узел водораспределения КТ № 15 Алексеевского жилого массива, питающийся от насосной станции № 25А (рис. 5.13). На этом рисунке дополнительно показаны места расположения приборов, измеряющих расход воды. Замеры проводили накладным ультразвуковым расходомером UFM 610 р. Как видно из табл. 5.2 и рис. 5.14, алгебраическая сумма расходов по узлам сети $\sum_{j \in V} q_j$ практически равна нулю, что соответствует закону Кирхгофа, а следовательно, свидетельствует о достаточной точности наших измерений.

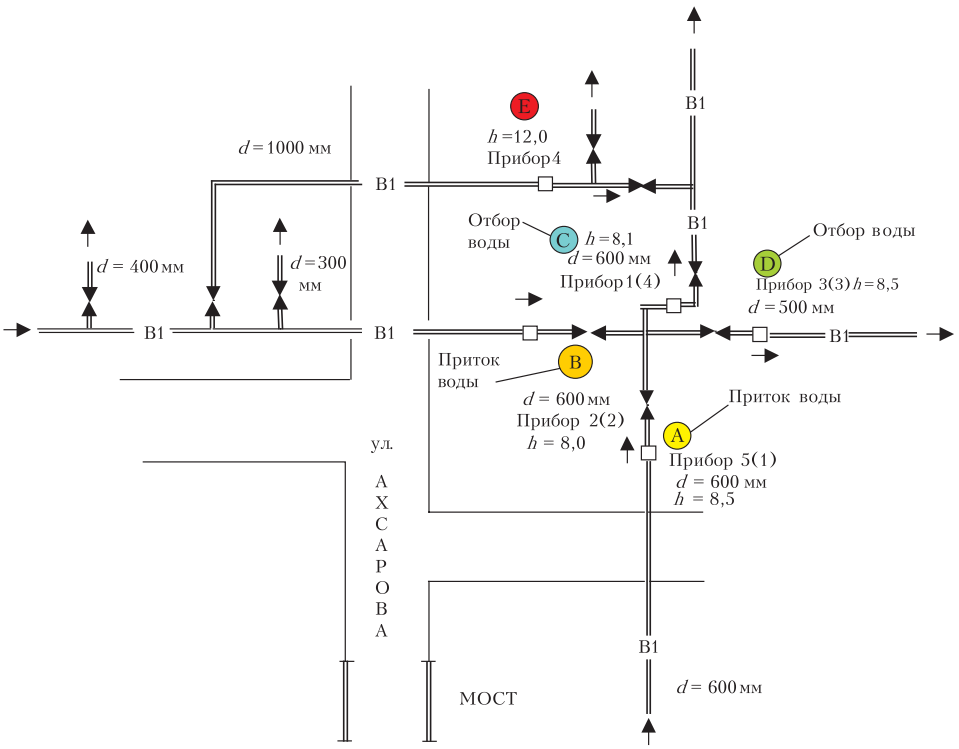



Рис. 5.13. Узел водопроводной сети КТ № 15

Таблица 5.2

**Расход воды по КТ №15 (ул. Ахсарова, Алексеевский жилой массив) в течение суток (15.02.2001 г. — 16.02.2001 г.)**

| Время суток, *T*, ч | Приток воды к узлу, *q*, м³/ч | | Отбор воды от узла, *q*, м³/ч | |
|---|---|---|---|---|
| | в точке A | в точке B | в точке C | в точке D |
| 15:00 | 739,6 | 115,8 | 532,2 | 323,2 |
| 16:00 | 758,0 | 111,0 | 530,6 | 338,4 |
| 17:00 | 783,0 | 110,0 | 541,4 | 351,6 |
| 18:00 | 821,5 | 108,3 | 565,4 | 364,4 |
| 19:00 | 832,2 | 104,5 | 567,0 | 369,7 |
| 20:00 | 871,5 | 94,5 | 585,5 | 380,5 |
| 21:00 | 871,0 | 97,1 | 587,2 | 380,9 |
| 22:00 | 826,4 | 109,6 | 534,3 | 401,7 |
| 23:00 | 606,5 | 116,1 | 438,8 | 283,8 |
| 0:00 | 453,8 | 115,5 | 343,3 | 226,0 |
| 1:00 | 371,2 | 120,3 | 305,0 | 186,5 |
| 2:00 | 348,0 | 121,4 | 292,7 | 176,7 |
| 3:00 | 348,6 | 122,1 | 295,5 | 175,2 |
| 4:00 | 412,9 | 130,7 | 324,3 | 219,3 |
| 5:00 | 540,4 | 137,0 | 402,0 | 275,4 |
| 6:00 | 791,4 | 118,2 | 547,1 | 362,5 |
| 7:00 | 861,2 | 100,6 | 598,0 | 363,8 |
| 8:00 | 834,9 | 91,2 | 582,4 | 343,7 |
| 9:00 | 799,3 | 96,2 | 563,9 | 331,6 |
| 10:00 | 805,0 | 90,3 | 557,1 | 338,2 |
| 11:00 | 762,1 | 117,7 | 533,7 | 346,1 |
| 12:00 | 743,1 | 120,6 | 530,1 | 333,6 |
| 13:00 | 748,6 | 108,6 | 525,1 | 332,1 |
| 14:00 | Отключение насосной станции | | | |
| 15:00 | 682,5 | 125,9 | 522,1 | 286,3 |

В действующих системах водоснабжения городов на одну и ту же водопроводную сеть работает, как правило, одновременно несколько насосных станций, что приводит к сильной взаимозависимости режимов их работы и к снижению КПД насосных станций. Поскольку процессы водопотребления в сети имеют случайный характер, в неуправляемой системе возникают такие ситуации, при которых режимы работы насосных станций далеки от оптимальных. В результате увеличиваются потери электроэнергии и непроизводительный расход воды, повышается вероятность аварийных ситуаций из-за возрастания избыточных свободных напоров в узлах сети. Кроме того, в системах водоснабжения складываются ситуации, когда свободные напоры в узлах сети значительно меньше минимально допустимых. Это может привести к тому, что часть потребителей в какие-то моменты времени вообще не получит воды, за что несет ответственность управление системой ПРВ.

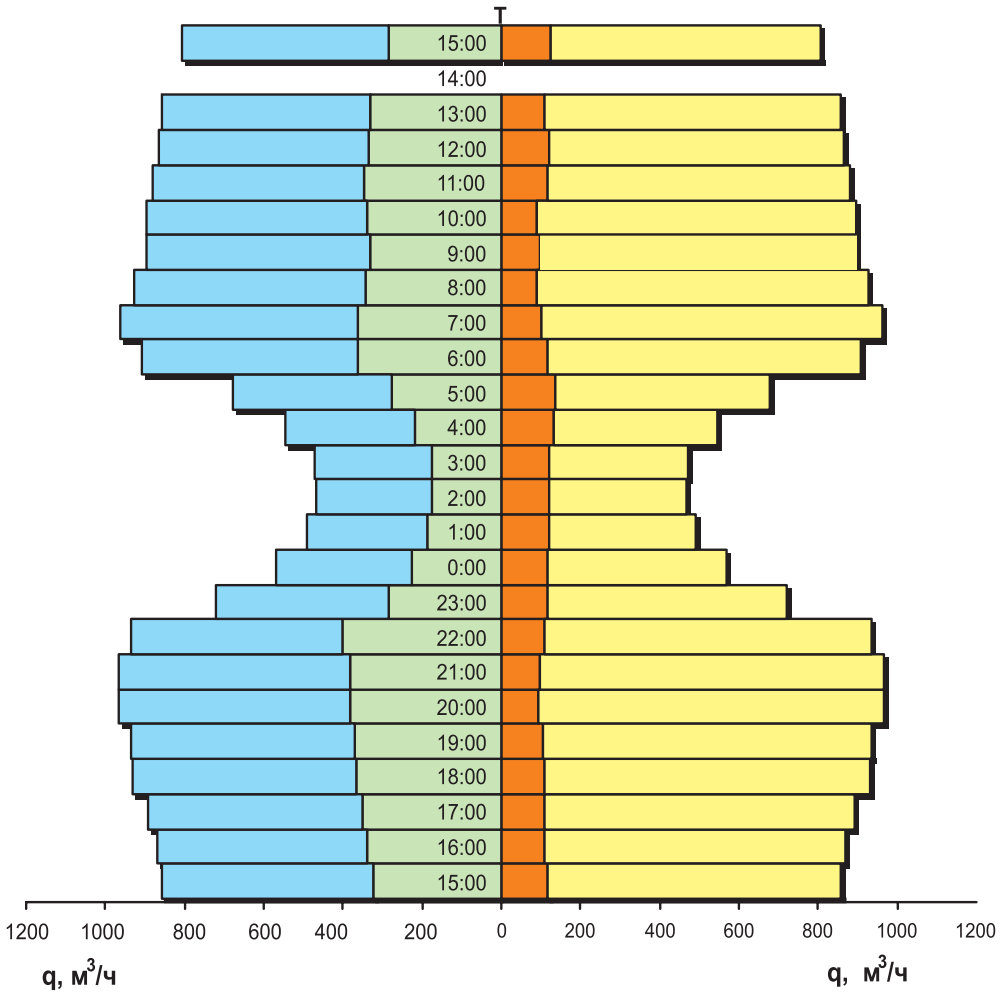



Рис. 5.14. Распределение узловых расходов:
*1* — приток воды в точке A; *2* — приток воды в точке B;
*3* — отбор воды в точке C; *4* — отбор воды в точке D

Принцип построения двухуровневой схемы управления действующей системой ПРВ (рис. 5.15) позволяет совершенствовать оперативное управление системой ПРВ, достичь ее необходимого качества и степени детализации, необходимой для операционного моделирования ПРВ.

Следует отметить, что активные элементы водопроводных сетей обладают высокой степенью резервирования, поэтому отказ того или иного агрегата не оказывает значительного влияния на эффективность функционирования водопроводной сети, так как он оперативно заменяется резервным. Отказ (авария) линейных участков водопроводной сети приводит к значительному ущербу вследствие прямых потерь воды, изменения пьезометрии и режима функционирования водопроводной сети, возникновения дефицита воды в районе аварии и районах, прилегающих к аварийному участку, а в некоторых случаях и во всей системе.

Кроме того, значительный ущерб может наноситься самой водой (размыв дорог, затопление зданий и т.п.).

Задача обнаружения аварийной ситуации сводится к идентификации пьезометрии сети, отдельных участков и зон водопроводной сети, к определению скорости и времени изменения пьезометрии сети и к принятию решения о наличии аварийной ситуации по фиксации контролируемых параметров систем, например эквивалентного гидродинамического сопротивления системы, что хорошо видно из рис. 5.16.

Оперативное управление водораспределением в водопроводных сетях при аварийных ситуациях заключается в обнаружении этих ситуаций, поиске рациональной структуры водопроводной сети (путем переключений запорно-регулирующих устройств), с тем чтобы исключить из нее аварийный участок и минимизировать суммарные избыточные напоры.

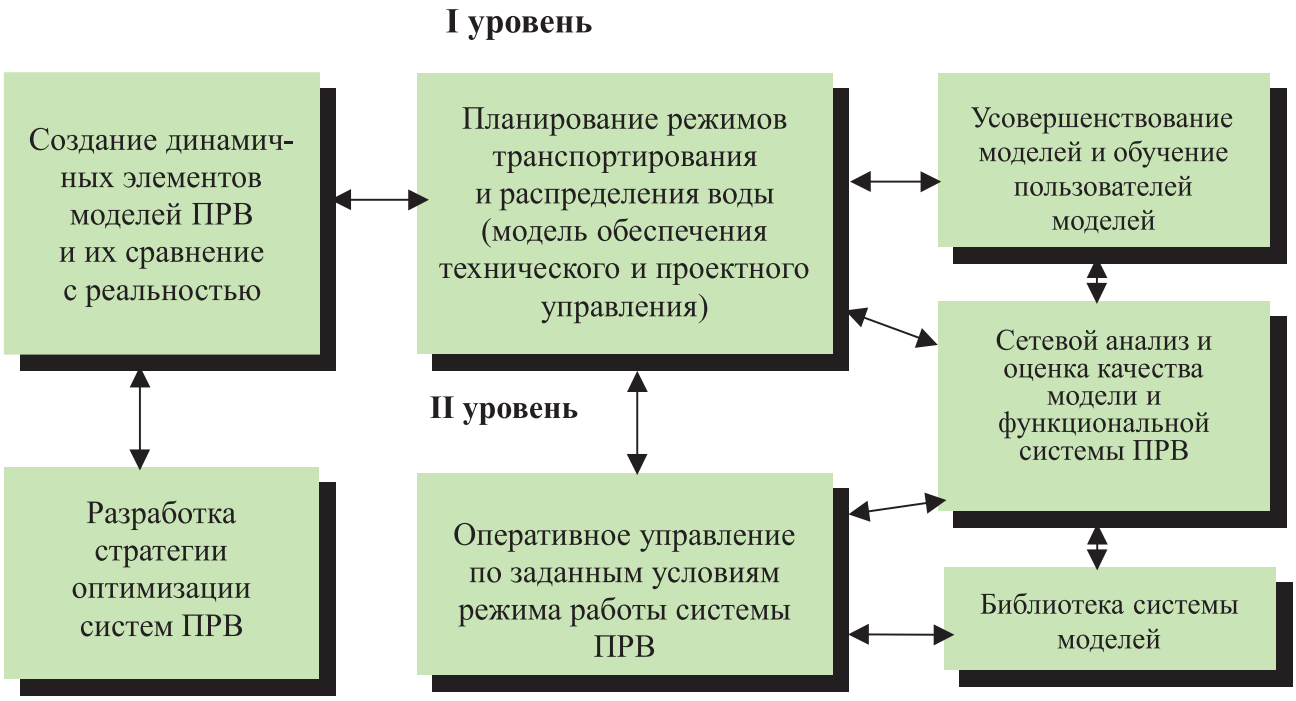



Рис. 5.15. Двухуровневая схема управления ПРВ

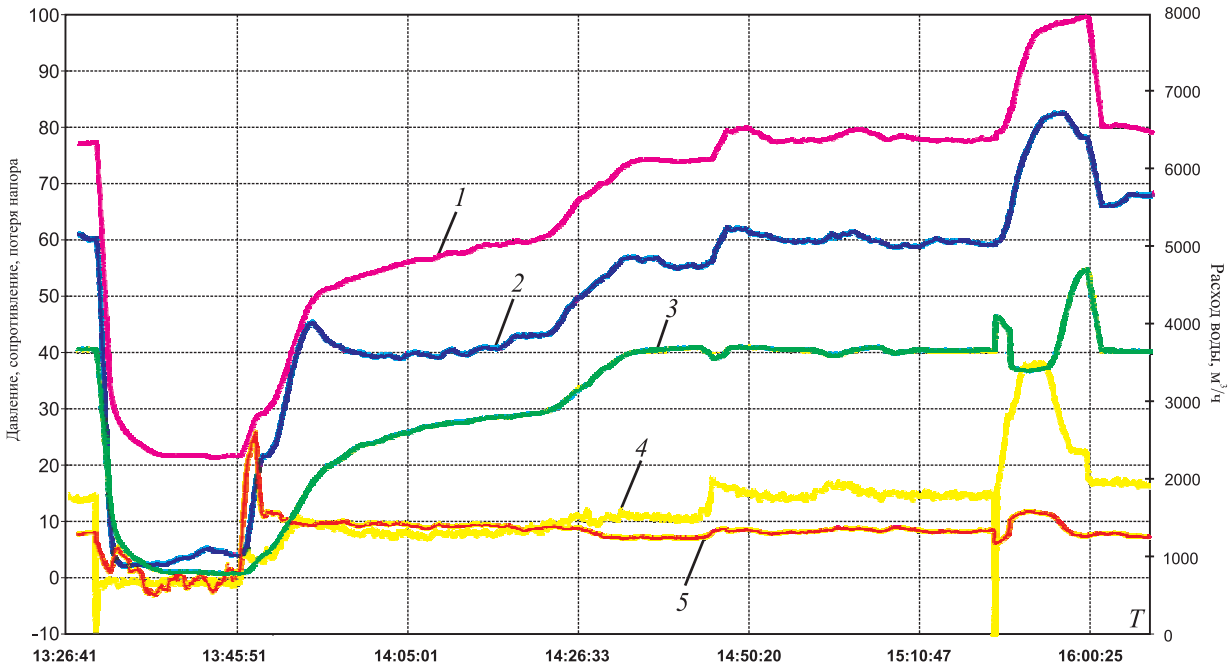



Рис. 5.16. Фрагмент изменения режимов в системе ПРВ от насосной станции № 25А в период гидроудара (13:29:48,1 — 13:30:00) и аварии (15:25:00 — 15:30:00):
*1* — давление на насосной станции; *2* — расход воды на насосной станции;
*3* — давление в диктующей точке КТ № 1;
*4* — потеря напора от насосной станции до диктующей точки;
*5* — сопротивление сети ПРВ от насосной станции до диктующей точки

## 5.5. СТАБИЛИЗАЦИЯ НАПОРА В ДИКТУЮЩЕЙ ТОЧКЕ СЕТИ

Рассмотрим следующую упрощенную эквивалентную схему функционирования сети (рис. 5.17), в которой сеть заменяется одной трубой с эквивалентным гидравлическим сопротивлением $S$.

Модель водораспределения в такой расчетной схеме может быть представлена в виде

$$P_{н} - P_{дт} - \Delta h^{(Г)} = Sq^2, \tag{5.8}$$

а задача оценки состояния водораспределения (2.56), (2.30)–(2.33) (см. главу 2) примет вид

$$y = \frac{1}{s^2_{P_н}}(\hat{P}_н - P_н)^2 + \frac{1}{s^2_{q}}(\hat{q} - q)^2 + \frac{1}{s^2_{Pдт}}\left(\hat{P}_{дт} - P_{дт}\right)^2 \to \min_{P_н, P_{дт}, q \in \Omega}, \tag{5.9}$$

$$\Omega: \quad S = \frac{P_н - P_{дт} - \Delta h^{(Г)}}{q^2}, \tag{5.10}$$

где $P_н$, $P_{дт}$ — напор на выходе насосной станции и в диктующей точке соответственно;

$q$ — расход воды на выходе насосной станции;

$\Delta h^{(Г)}$ — разность между геодезическими отметками диктующей точки и насосной станции;

$\hat{P}_н$, $\hat{P}_{дт}$, $s^2_{P_н}$, $s^2_{P_{дт}}$ – среднее значение напора и дисперсия на выходе насосной станции и в диктующей точке соответственно;

$\hat{q}$ и $s^2_{q}$ — среднее значение и дисперсия расхода воды на выходе насосной станции на некотором отрезке времени (например, в определенный час суток в течение месяца) соответственно.

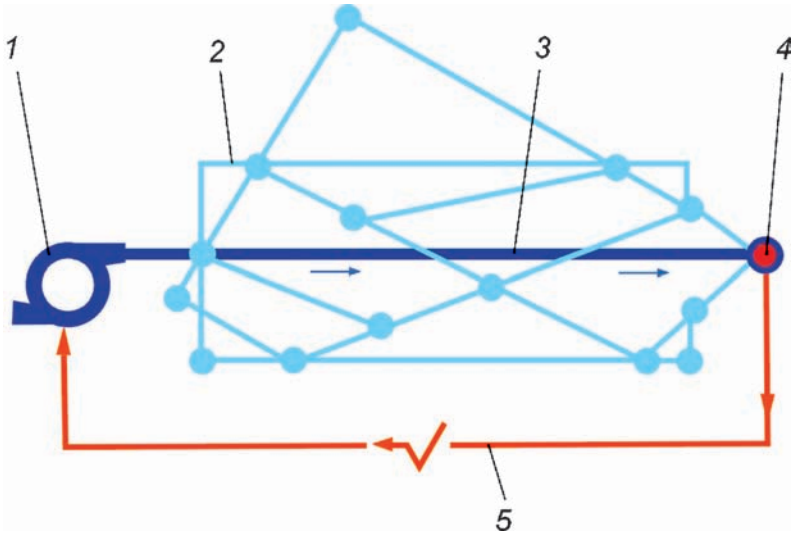



Рис. 5.17. Стабилизация напора в диктующей точке сети:
*1* — насосная станция; *2* — водопроводная сеть;
*3* — водовод с эквивалентным гидравлическим сопротивлением водопроводной сети;
*4* — диктующая точка; *5* — связь от датчика давления в диктующей точке для управления насосами станции

Поскольку переменная $S$ не входит в минимизируемую функцию, то решение задачи (5.9), (5.10) дает следующее:

$$P_{\text{н}} = \hat{P}_{\text{н}};\ \ q = \hat{q};\ \ P_{\text{дт}} = \hat{P}_{\text{дт}},$$

$$S = \frac{\hat{P}_{\text{н}} - \hat{P}_{\text{дт}} - \Delta h^{(\Gamma)}}{q^2}, \qquad (5.11)$$

т.е. оценка измеряемых параметров не зависит от дисперсии и совпадает с их средними значениями.

На рис. 5.19—5.22 показаны изменение (в будние дни, субботы и воскресенья декабря 2000 г.) давления $P_{\text{н}}$ на насосной станции № 25А, давления в диктующей точке $P_{\text{дт}}$, изменение водопотребления $q$ Алексеевского жилого массива от насосной станции и гидравлического сопротивления $S$ системы ПРВ Алексеевского жилого массива (рис. 5.18).

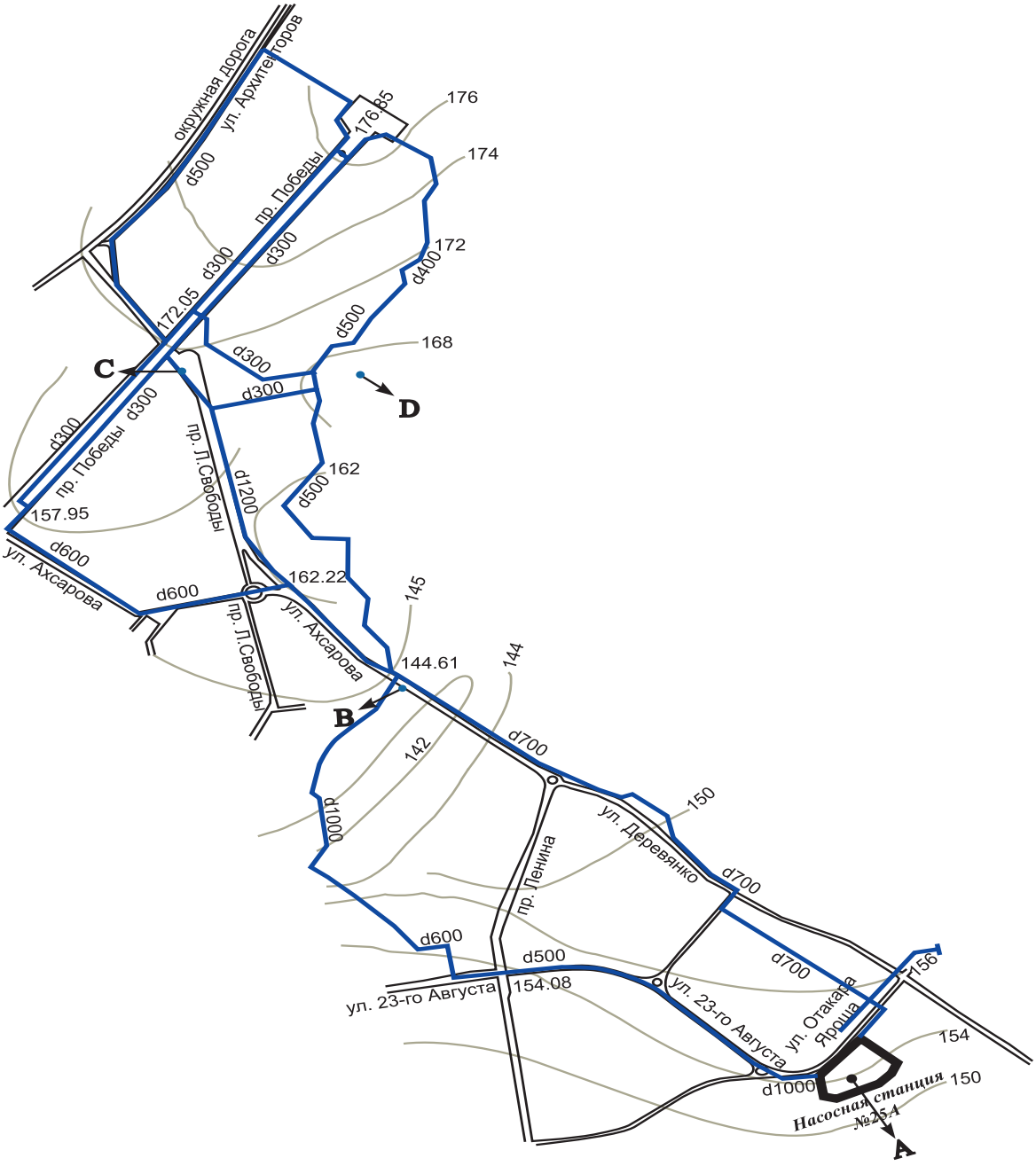
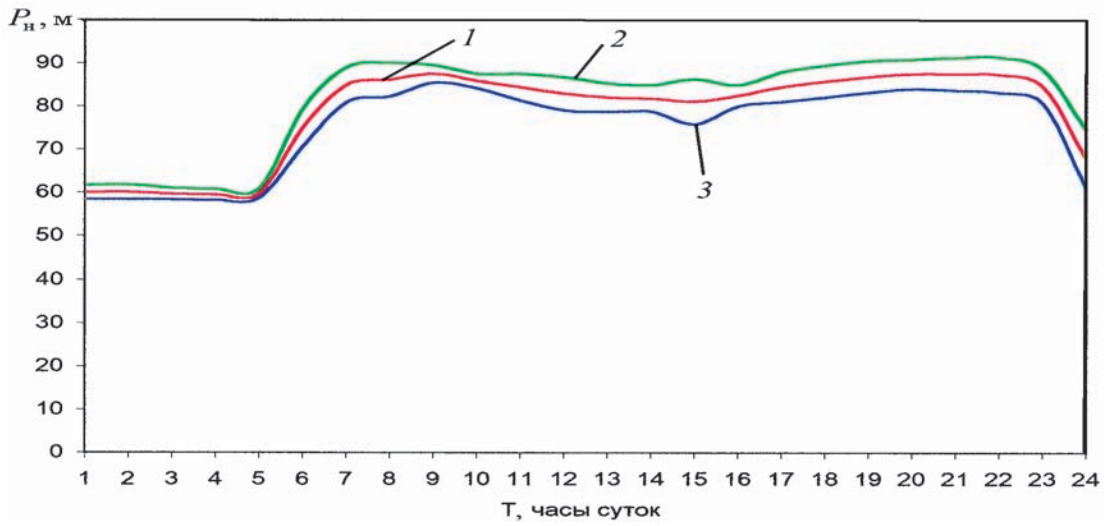
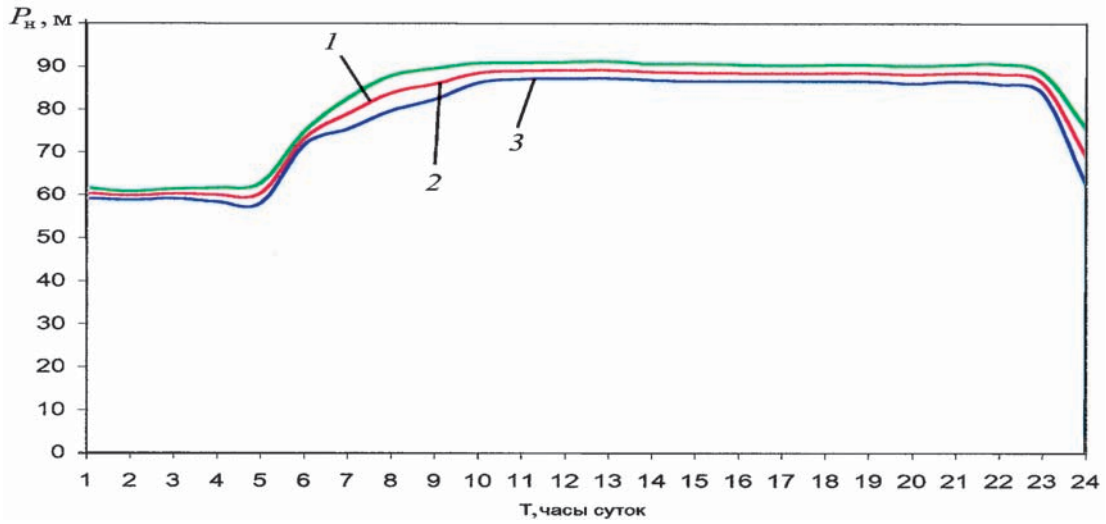


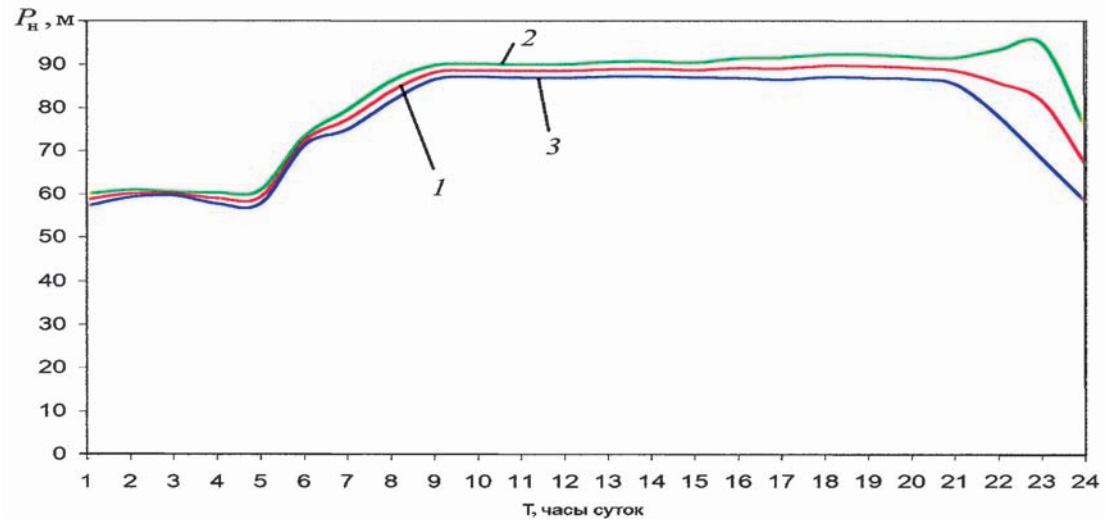

Рис. 5.18. Схема водораспределительной сети от насосной станции № 25А




*а*

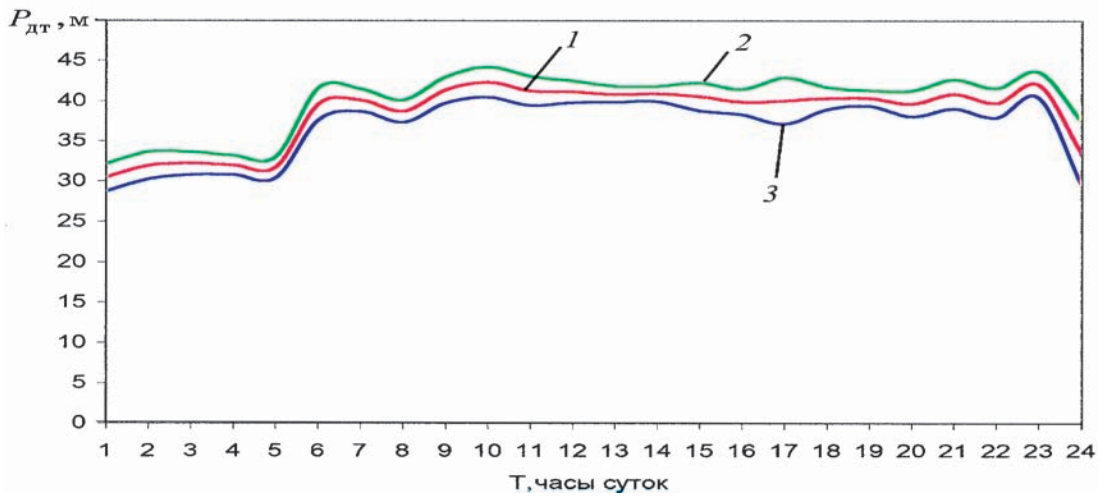



*б*

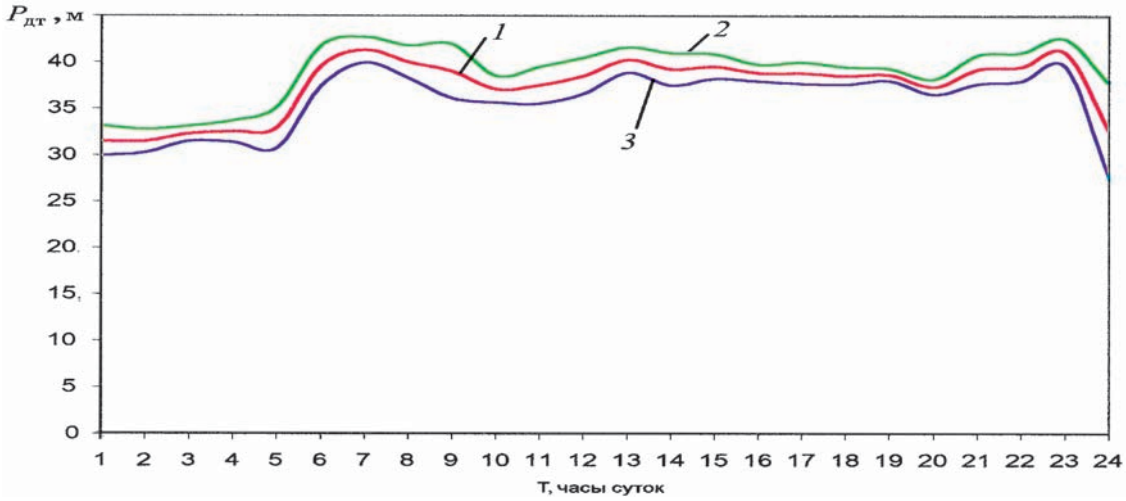



*в*

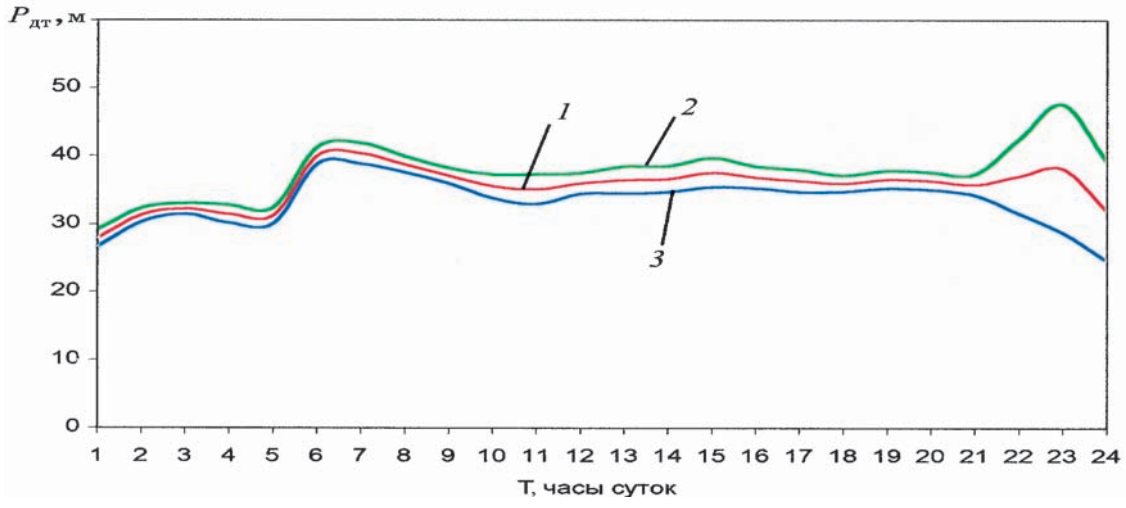
Рис. 5.19. Изменение давления на выходе насосной станции № 25А, $P_н = f(T)$:
*а* — будние дни; *б* — суббота; *в* – воскресенье;
*1* — $P_{н.ср}$; *2* — $P_{н.ср} + \sigma$; *3* — $P_{н.ср} - \sigma$




*а*

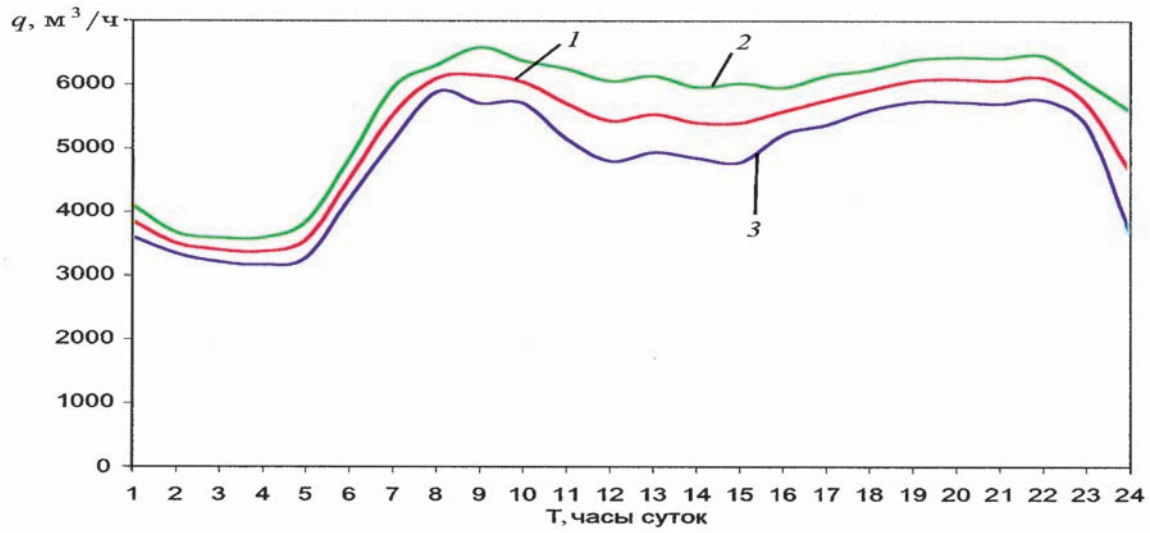



*б*

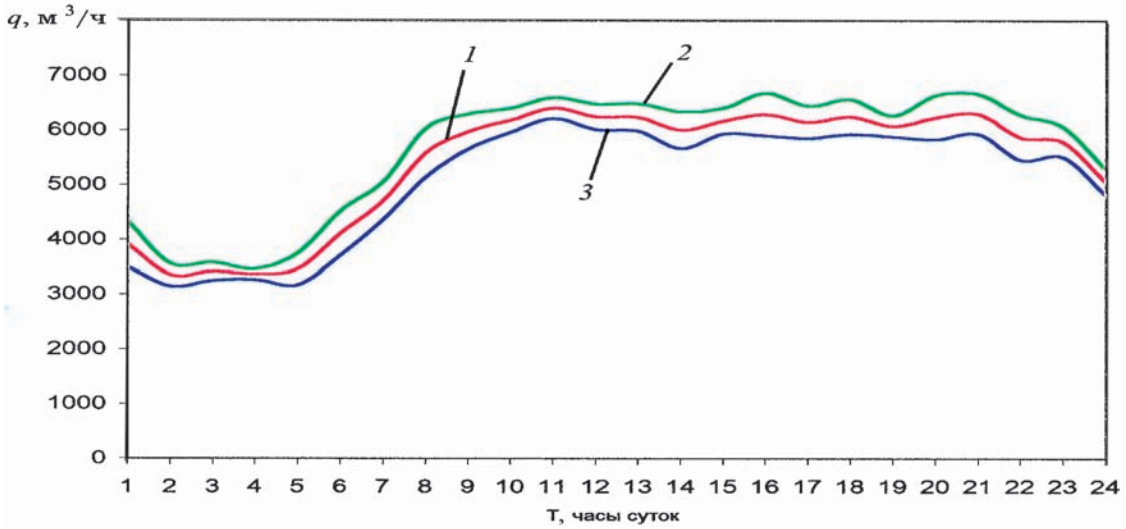



*в*

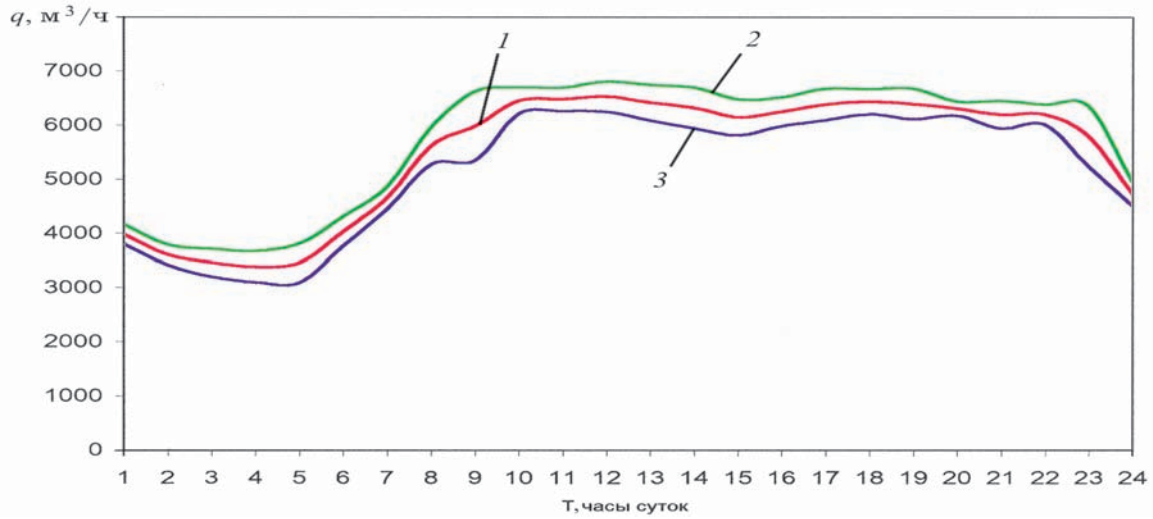
Рис. 5.20. Изменение давления в диктующей точке, $P_{дт} = f(T)$:
*а* — будние дни; *б* — суббота; *в* – воскресенье;
*1* — $P_{дт.ср}$; *2* — $P_{дт.ср} + \sigma$; *3* — $P_{дт.ср} - \sigma$




*а*

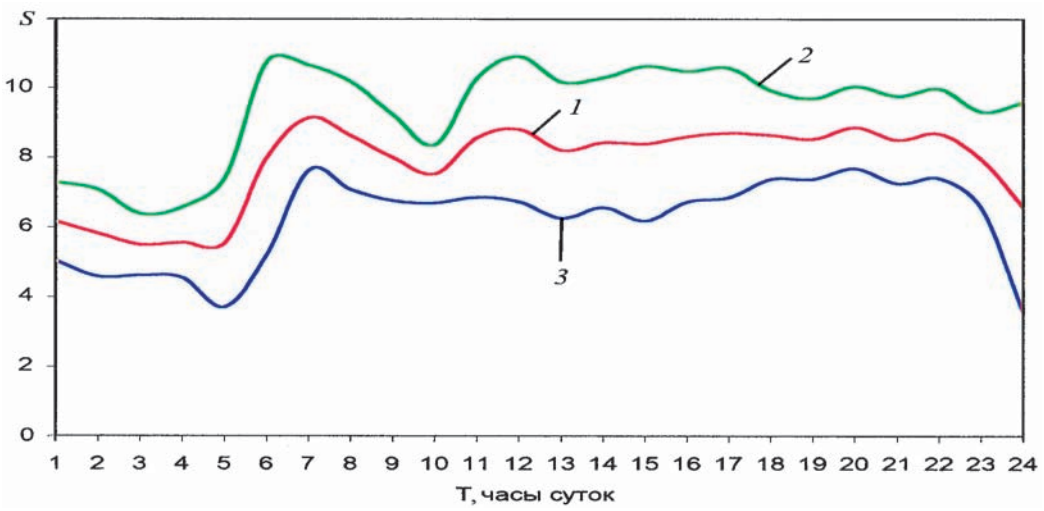



*б*

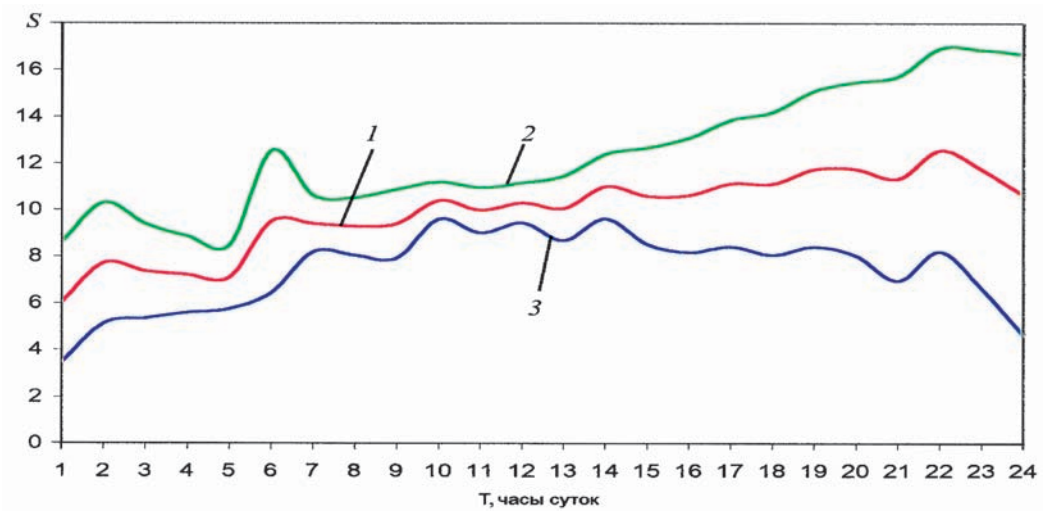



*в*

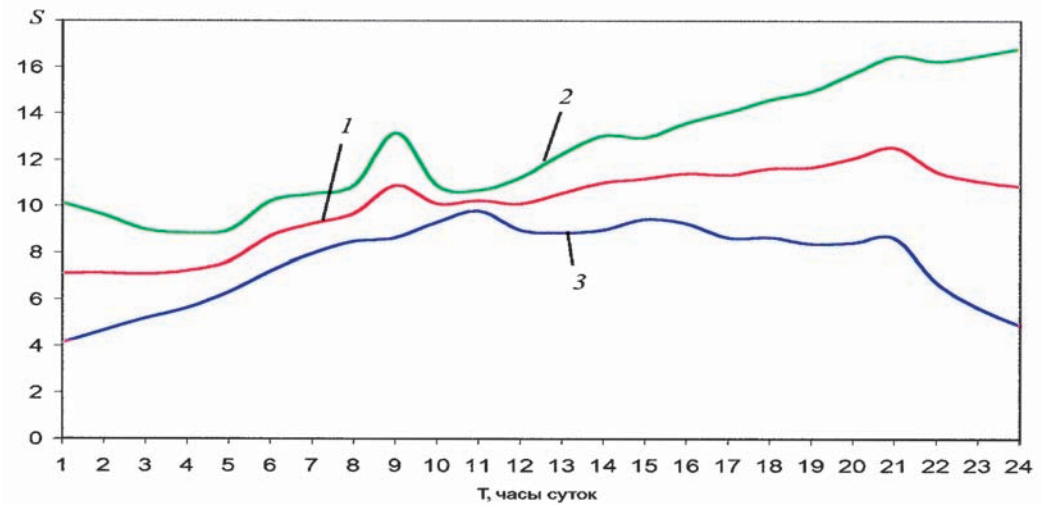
Рис. 5.21. Изменение водопотребления Алексеевского жилого массива от насосной станции № 25А, $q = f(T)$:
*а* – будние дни; *б* – суббота; *в* – воскресенье; *1* – $q_{ср}$; *2* – $q_{ср} + \sigma$; *3* – $q_{ср} - \sigma$




*а*




*б*




*в*

Рис. 5.22. Изменение гидравлического сопротивления системы ПРВ Алексеевского жилого массива от насосной станции № 25А, $S = f(T)$, для $q_{ср}$: *а* — будние дни; *б* — суббота; *в* – воскресенье; *1* — $S_{ср}$; *2* — $S_{ср} + \sigma$; *3* — $S_{ср} - \sigma$

Как видно, интегральные оценки часовых расходов, давлений и эквивалентного гидравлического сопротивления в течение месяца достаточно стабильны и графики этих оценок с учетом текущих суток могут быть использованы для решения задачи стабилизации напора в диктующей точке сети в качестве прогноза на следующие сутки.

## 5.6. МЕТОД ДВУХКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНОЙ СТАНЦИЕЙ

Разработанный метод двухконтурного управления позволяет не только осуществлять контроль за системой ПРВ, но и обнаруживать утечки воды и определять их вероятные зоны.

Для расчета выделяется фрагмент сети, содержащий трубы большого диаметра и вершины, их соединяющие. Такой фрагмент проще реальной сети.

В вершинах графа этого фрагмента измеряют давление, расход воды и давление на выходах насосных агрегатов (на входах фрагмента сети). При этом предполагается, что вода подается на входы насосного агрегата из некоторой емкости, которую можно отождествить с нулевой вершиной. Будем считать, что из каждого узла рассматриваемого фрагмента в эту же емкость поступает вода такого объема, чтобы алгебраическая сумма ее расходов по любому узлу фрагмента равнялась нулю.

Таким образом, граф фрагмента будет содержать участки трех типов: входы, выходы и магистральные участки. Обозначим их соответственно $L$, $N$ и $M$, как это делалось ранее.

Поскольку каждые два узла фрагмента соединяются трубопроводом заданной длины и диаметра, то, используя обобщенные формулы $\lambda = f(Re, \bar{\Delta})$, полученные в главе 3 настоящей работы, можно вычислить расход воды в этом трубопроводе по формулам

$$q_j = \sqrt{\frac{1{,}232 g d_j^5}{\lambda_j l_j} h_j} \quad (j \in M), \tag{5.12}$$

где $\lambda_j = \left[ 0{,}055 + \left( \frac{46500\nu}{V_j d_j} \right)^{1{,}5} \right] e^{-1{,}035 + 71{,}99\bar{\Delta}} \quad (j \in M)$; (5.13)

$$\bar{\Delta} = \frac{0{,}016147 T}{T + 42{,}51}. \tag{5.14}$$

Здесь $\lambda_j$ — коэффициент трения; $V_j$ — скорость движения воды в $j$-м трубопроводе; $\nu$ — коэффициент кинетической вязкости воды; $\bar{\Delta}$ – относительная шероховатость труб; $T$ — время эксплуатации труб, мес.

Заметим, что, используя достаточно простые результаты измерений потерь напора и расхода воды, а также формулы (5.13) и (5.14), можно получить усредненное значение макрошероховатости трубопровода. Это дает возможность периодически, не вскрывая трубопроводы, давать заключение о состоянии внутренней поверхности трубопровода и принимать экспертное решение о своевременности проведения санации (рис. 5.23).

В действующих сетях по любому узлу алгебраическая сумма расходов не будет равна нулю, поскольку в расчетной схеме мы отбросили большую часть сети. Поэтому расходы, дополняющие алгебраическую сумму расходов по узлам фрагмента до нуля, отнесем к соответствующим выходам этого фрагмента.

На рис. 5.24 приведена схема водопроводной сети Алексеевского микрорайона с выбранным фрагментом для расчета сети. Эквивалентная расчетная схема этого фрагмента (рис. 5.25) содержит два входа, 11 выходов и 16 магистральных участков.



Рис. 5.23. Зарастание ввода ($d$ =150 мм) к жилому дому на Алексеевском жилом массиве за 18 лет эксплуатации

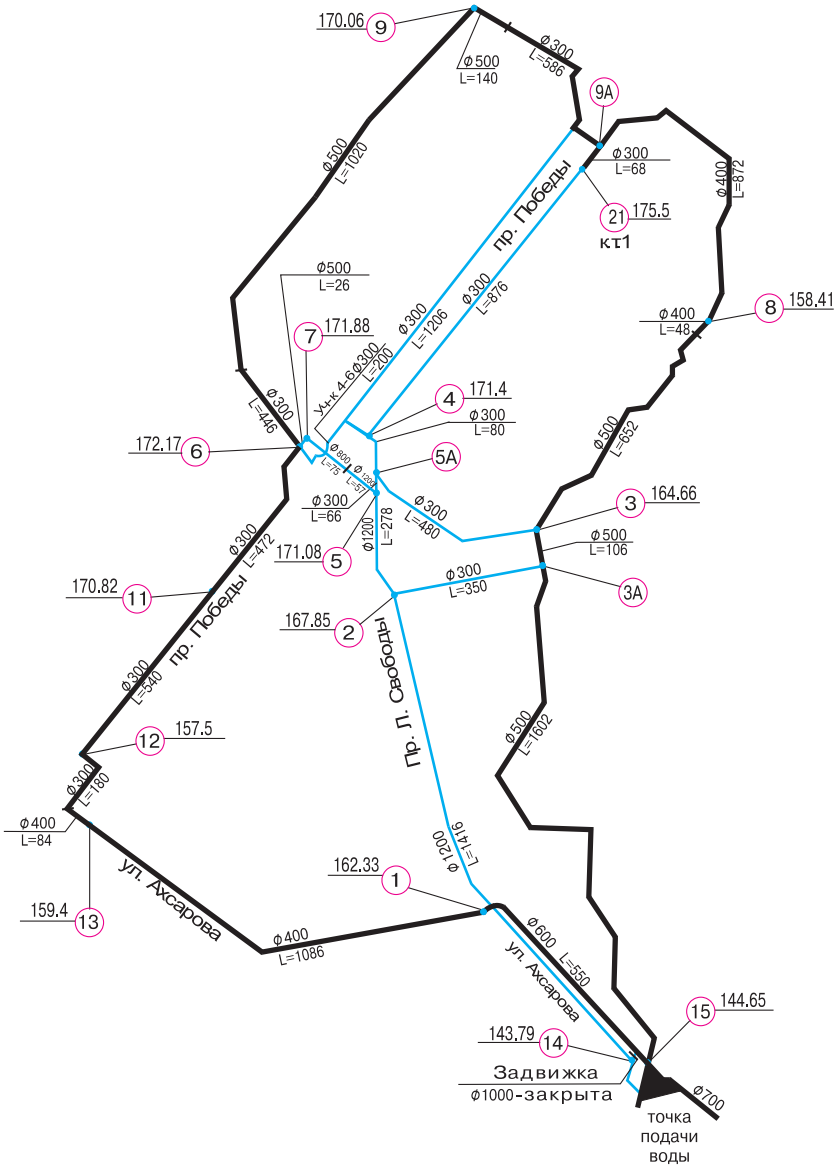



Рис. 5.24. Расчетная схема внешнего водопроводного кольца для управления напором в диктующей контрольной точке 1 (вершина (узел) 21) Алексеевского жилого массива

Выберем дерево графа фрагмента таким образом, чтобы его ветвями были только выходы. Тогда расход воды на выходах в общем виде вычисляется как

$$q_i = \sum_{r \in M \cup L_1} b_{1ri} q_r \quad (i \in N). \tag{5.15}$$

Как видно, выбор такого дерева автоматически отнес к хордам все выходы и магистральные участки. Здесь $b_{1ri}$ – элемент цикломатической матрицы для ветвей дерева $B_1$.

Матрица $B_1$ для расчетной схемы рис. 5.25 имеет вид

$$B_1 = \begin{array}{c} \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \\ 11 \\ 12 \\ 13 \\ 14 \\ 15 \\ 16 \\ 17 \\ 18 \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{ccccccccccc} 19 & 20 & 21 & 22 & 23 & 24 & 25 & 26 & 27 & 28 & 29 \end{array} \\ \left[\begin{array}{ccccccccccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array}\right] \end{array}$$

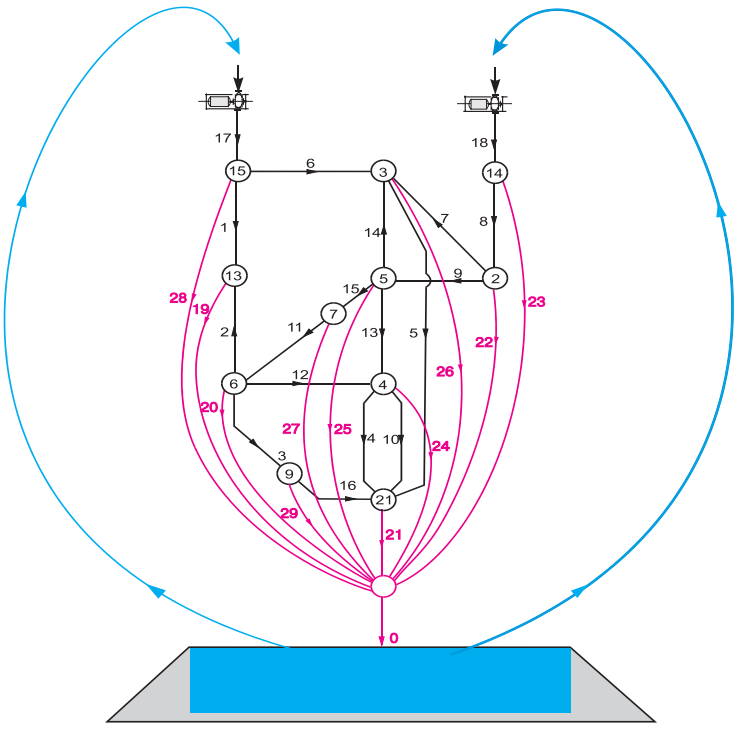



Рис. 5.25. Эквивалентная расчетная схема водопроводной сети, показанной на рис. 5.24

Сформулируем задачу оперативного расчета водосети.

Исходные данные:

1) фрагмент сети в виде линейного графа с $M$ магистральными участками, $L$ входами и $N$ выходами, причем каждый узел фрагмента имеет свой выход;

2) известны геодезические отметки в узлах сети $P_j^{(\Gamma)} \quad (j \in N)$;

3) задан расход воды на входах $q_j = q_j^+ \quad (j \in L)$ и напор на выходах $P_j = P_j^+ \quad (j \in N)$.

Требуется найти расходы в магистральных участках $q_j \quad (j \in M)$, напоры $P_j \quad (j \in L)$ и расходы на выходах $q_j \quad (j \in N)$. Последние косвенно будут характеризовать потребление воды в отброшенной части сети в районе соответствующих узлов.

Тогда математическая постановка задачи (рис. 5.26) с учетом выбранного дерева фрагмента примет вид

$$q_i = \sum_{j \in M \cup L} b_{1ji} q_j \quad (i \in N); \tag{5.17}$$

$$h_j^{(n)}(q_j) = h_j - h_j^{(\Gamma)} \quad (j \in M); \tag{5.18}$$

$$h_j = -\sum_{i \in N} b_{1ji} P_i \quad (j \in M); \tag{5.19}$$

$$h_j^{(\Gamma)} = \sum_{i \in N} b_{1ji} P_i \quad (j \in M), \tag{5.20}$$

где $h_j^{(n)}$ – потеря напора на $j$-м участке водосети.

В блок-схеме расчета действующей системы ПРВ (рис. 5.26):

1 – ввод исходных данных;

2 – вычисление матрицы $B_1$ по исходной информации в виде ориентированных узловых пар;

3 – вычисление $h_j$ и $h_j^{(\Gamma)} \quad (j \in M)$ по формулам (5.19), (5.20);

4 – вычисление $h_j^{(n)} \quad (j \in M)$ по формуле (5.18);

5 – вычисление $q_j \quad (j \in M)$ по формулам (5.12) – (5.14) с использованием специальной подпрограммы;

6 – вычисление $q_j \quad (j \in N)$ по формуле (5.17);

7 – вычисление скоростей $V_j \quad (j \in M)$ по формуле

$$V_j = \frac{q_j}{\omega_j} \quad (j \in M), \tag{5.21}$$

где $\omega_j$ – площадь сечения $j$-го трубопровода;

8 – формирование и печать таблицы исходных и расчетных данных.

Остановимся более подробно на решении задачи определения по формулам (5.12) – (5.14) расхода воды для $j$-го магистрального участка по известному значению $h_j^{(n)}(q_j) \quad (j \in M)$. В выражение (5.12) входит величина $\lambda_j$, которая зависит от скорости, а следовательно, и от расхода $q_j$. Это легко преодолевается применением метода последовательных приближений, для чего использован метод дихотомии.

Представим выражение (5.12) в виде

$$\varphi_j = h_j^{(n)} - \frac{\lambda_j l_j q_j^2}{1{,}232 g d_j^5} = 0 \quad (j \in M) \tag{5.22}$$

и будем искать такое $q_j$, которое является корнем этого уравнения.

В качестве начального приближения выберем значение $q_j$ в соответствии с аппроксимацией формулы Андрияшева для $V_j < 3$ м/с со значением коэффициента нелинейности $n_j = 2$ вместо $n_j = 1{,}9$:

$$h_j^{(n)} = 0{,}001736 \frac{l_j}{d_j^{5{,}3}} q_j^2 \quad (j \in M). \tag{5.23}$$

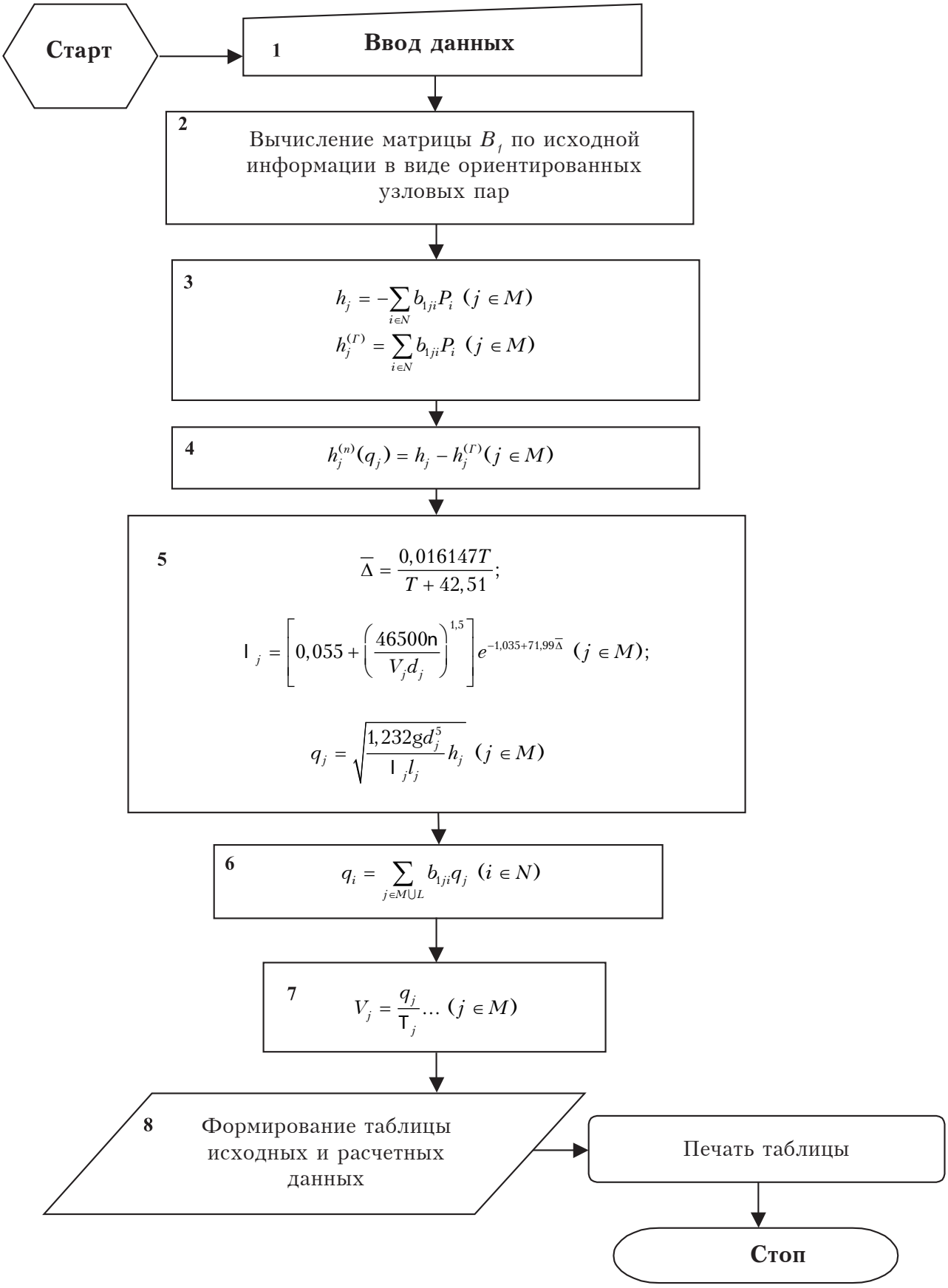



Рис. 5.26. Блок-схема расчета действующей системы ПРВ

Тогда начальное приближение

$$q_j^{(0)} = \sqrt{\frac{h_j^{(n)} d_j^{5,3}}{0,001736 l_j}} \quad (j \in M). \tag{5.24}$$

Подставим это значение $q_j^{(0)}$ в выражение (5.22) и получим значение $\mathsf{j}_j^{(o)}$, которое будет отлично от нуля.

Если оно положительно, то вычислим значение функции в точке $q_j^{(1)} = q_j^{(0)} + \Delta q_j$ (например, $\Delta q_j = q_j^{(0)}$), в которой при достаточно большом $\Delta q_j$ $\mathsf{j}_j\left(q_j^{(0)} + \Delta q_j\right) = \mathsf{j}_j^{(1)}$ будет меньше нуля. Теперь, применяя метод дихотомии, т.е. деления отрезка пополам с заданной точностью $\mathsf{e}$, будем искать $q_j^{(k)}$, для которого

$$\left|\mathsf{j}_j\left(q_j^{(k)}\right)\right| \le \mathsf{e}. \tag{5.25}$$

Если в точке $q_j^{(0)}$ $\mathsf{j}_j^{(0)} < 0$, то $q_j^{(1)} = \left(q_j^{(0)} - \Delta q_j\right)$, где $\Delta q_j^{(1)} < q_j^{(0)}$ и выбирается таким образом, чтобы $\mathsf{j}^{(1)}$ было больше нуля. Далее применяется аналогичный подход поиска точки $q_j^{(k)}$, для которой справедливо соотношение (5.25) на отрезке $\left[q_j^{(1)}, q_j^{(0)}\right]$.

В приведенном расчете водораспределения для 7 часов утра (табл. 5.3) расходы на входах и давления в узлах фрагмента — это соответственно значения расходов и напоров, измеряемые на них в 7 часов утра 16.02.2001 г. Расход воды в магистральных участках вычисляется по формулам (5.12) — (5.14) с применением зависимостей $\mathsf{l} = f(Re, \overline{\Delta})$.

Таблица 5.3

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива по натурным замерам напоров в узлах водосети (16.02.2001 г., 7:00 ч)**

| Номер замера | Номер узла – начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м³/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 0 | 167,85 | 11,15 | 53 |
| 2 | 3 | 0 | 164,66 | 556,46 | 50 |
| 3 | 4 | 0 | 171,40 | 0,55 | 48 |
| 4 | 5 | 0 | 171,08 | 107,92 | 49,5 |
| 5 | 6 | 0 | 172,17 | 74,62 | 48 |
| 6 | 7 | 0 | 171,88 | 209,10 | 48,5 |
| 7 | 9 | 0 | 170,06 | 92,29 | 45 |
| 8 | 13 | 0 | 159,40 | 665,57 | 55 |
| 9 | 14 | 0 | 143,79 | –1,99 | 78 |
| 10 | 15 | 0 | 144,65 | 1,42 | 78 |
| 11 | 21 | 0 | 175,50 | 281,02 | 38 |
| Суммарное водопотребление | | | | 1998,1 | |

Водопроводная сеть

| Номер замера | Начало участка | Конец участка | Длина участка $L$, м | Эквивалентный диаметр $d$, мм | Геодезическая разность между участками $\Delta h$, м | Расход $q$, м$^3$/ч | Скорость $V$, м/с | Потери напора $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 2 | 3 | 456 | 357 | −3,19 | 157,03 | 0,4358 | 6,19 |
| 13 | 2 | 5 | 278 | 1200 | 3,23 | 870,11 | 0,2137 | 0,27 |
| 14 | 3 | 21 | 1640 | 439 | 10,84 | 67,2 | 0,1233 | 1,16 |
| 15 | 4 | 21 | 1206 | 300 | 4,1 | 68,23 | 0,2681 | 5,9 |
| 16 | 4 | 21 | 876 | 300 | 4,1 | 80,06 | 0,3146 | 5,9 |
| 17 | 5 | 3 | 544 | 300 | −6,42 | 101,76 | 0,3999 | 5,92 |
| 18 | 5 | 4 | 144 | 300 | 0,32 | 88,3 | 0,347 | 1,18 |
| 19 | 5 | 7 | 132 | 993 | 0,8 | 572,13 | 0,2052 | 0,2 |
| 20 | 6 | 4 | 200 | 300 | −0,77 | 60,53 | 0,2379 | 0,77 |
| 21 | 6 | 9 | 1466 | 449 | −2,11 | 157,82 | 0,2769 | 5,11 |
| 22 | 6 | 13 | 1276 | 308 | −12,77 | 70,06 | 0,2612 | 5,77 |
| 23 | 7 | 6 | 26 | 500 | 0,29 | 363,03 | 0,5136 | 0,21 |
| 24 | 9 | 21 | 726 | 348 | 5,44 | 65,53 | 0,1914 | 1,56 |
| 25 | 14 | 2 | 1416 | 1200 | 24,06 | 1038,29 | 0,255 | 0,94 |
| 26 | 15 | 3 | 1708 | 500 | 20,01 | 364,87 | 0,5162 | 7,99 |
| 27 | 15 | 13 | 1636 | 477 | 14,75 | 595,51 | 0,9257 | 8,25 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 28 | 0 | 14 | 143,79 | 1036,3 | 78 |
| 29 | 0 | 15 | 144,65 | 961,8 | 78 |
| Суммарная подача воды в водопроводную сеть | | | | 1998,1 | |

Таблица 5.4

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива для общего наружного кольца водосети (рис. 5.24) по натурным замерам напоров в узлах водосети (16.02.2001 г., 7:00 ч)**

| Номер замера | Номер узла — начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м$^3$/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 | 0 | 164,66 | 297,66 | 50 |
| 2 | 6 | 0 | 172,17 | −227,88 | 48 |
| 3 | 9 | 0 | 170,06 | 92,29 | 45 |
| 4 | 13 | 0 | 159,4 | 665,57 | 55 |
| 5 | 15 | 0 | 144,65 | 1,42 | 78 |
| 6 | 21 | 0 | 175,5 | 132,73 | 38 |
| Суммарное водопотребление | | | | 961,8 | |

Водопроводная сеть

| Номер замера | Начало участка | Конец участка | Длина участка, $L$, м | Эквивалентный диаметр, $d$, мм | Геодезическая разность между участками, $\Delta h$, м | Расход, $q$, м³/ч | Скорость, $V$, м/с | Потери напора, $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 3 | 21 | 1640 | 439 | 10,84 | 67,2 | 0,1233 | 1,16 |
| 8 | 6 | 9 | 1466 | 449 | −2,11 | 157,82 | 0,2769 | 5,11 |
| 9 | 6 | 13 | 1276 | 308 | −12,77 | 70,06 | 0,2612 | 5,77 |
| 10 | 9 | 21 | 726 | 348 | 5,44 | 65,53 | 0,1914 | 1,56 |
| 11 | 15 | 3 | 1708 | 500 | 20,01 | 364,87 | 0,5162 | 7,99 |
| 12 | 15 | 13 | 1636 | 477 | 14,75 | 595,51 | 0,9257 | 8,25 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м³/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 0 | 15 | 144,65 | 961,8 | 78 |
| Суммарная подача воды в водопроводную сеть | | | | 961,8 | |

Такие таблицы, как табл. 5.3 и 5.4, формируются в действующей системе ежесуточно и непрерывно (с дискретностью 5 мин), затем происходит сравнение среднестатистических расходов на выходе с вычисляемыми текущими значениями.

Определяется также дисперсия расходов воды на входах за этот же период $s_q^2$.

Если $\left|q_{jt} - \hat{q}_{jt}\right| > 3s_{q_{jt}}$ $(j \in L)$ хотя бы для одного $j$, то идет сигнал тревоги с сопровождением сирены. При этом на экране дисплея указывается выход с наибольшим отклонением вычисляемого расхода на выходе от среднестатистического для текущего часа

$$y_K : \max_{j \in N} \left|q_{jt} - \hat{q}_{jt}\right| = \left|q_{\kappa t} - \hat{q}_{\kappa t}\right|. \tag{5.26}$$

Район, прилегающий к $\kappa$-му узлу фрагмента, и будет искомым.

Приведем расчет среднеквадратического отклонения σ во время проведения эксперимента «Авария».

Вычислим среднее значение расхода $q_{\text{ср}}$

$$q_{\text{ср}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} q_i}{n}, \tag{5.27}$$

где $q_i$ — мгновенные значения расходов через 5 с;

$n$ — число измерений за промежуток времени $T$.

Сравним среднестатистические расходы $q_{\text{ср}}$ с определяемыми текущими значениями $q_i$, вычислив дисперсию

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{n} (q_i - q_{\text{ср}})^2}{n} \tag{5.28}$$

и среднеквадратическое отклонение σ

$$s = \sqrt{D}. \tag{5.29}$$

Сравним текущее значение $\sigma_a$ со среднеквадратическим отклонением $\sigma_y$ при установившемся режиме работы $\frac{\sigma_a}{\sigma_y}$. Поскольку $\sigma_a > 3\sigma_y$, то звучит сигнал тревоги.

В табл. 5.5 и на рис. 5.27 приведены расчетные данные за период с 15:00:00 до 16:00:00 16.02.2001 г. при установившемся режиме и при возникновении аварии в сети ПРВ Алексеевского жилого массива.

Таблица 5.5

**Расчет среднеквадратического отклонения σ при установившемся режиме и при возникновении аварии в сети ПРВ Алексеевского жилмассива**

| Режим работы | Период измерений, *T* | Число измерений за указанное время, *n* | Среднее значение подачи воды, $q_{ср}$ м³/с | Дисперсия, *D* | Среднеквадратическое отклонение, σ |
|---|---|---|---|---|---|
| Подача воды при установившемся режиме | 15:02:40 — 15:19:50 | 207 | 1770,7 | 4521,4 | $\sigma_y = 67{,}2$ |
| Подача воды при аварии | 15:19:55 — 15:29:20 | 114 | 2436,8 | 55130,9 | $\sigma_a = 234{,}8$ |
| Условие обнаружения аварии ($\sigma_a > 3\sigma_y$) | – | – | – | – | $\frac{\sigma_a}{\sigma_y} = 3{,}5$ |

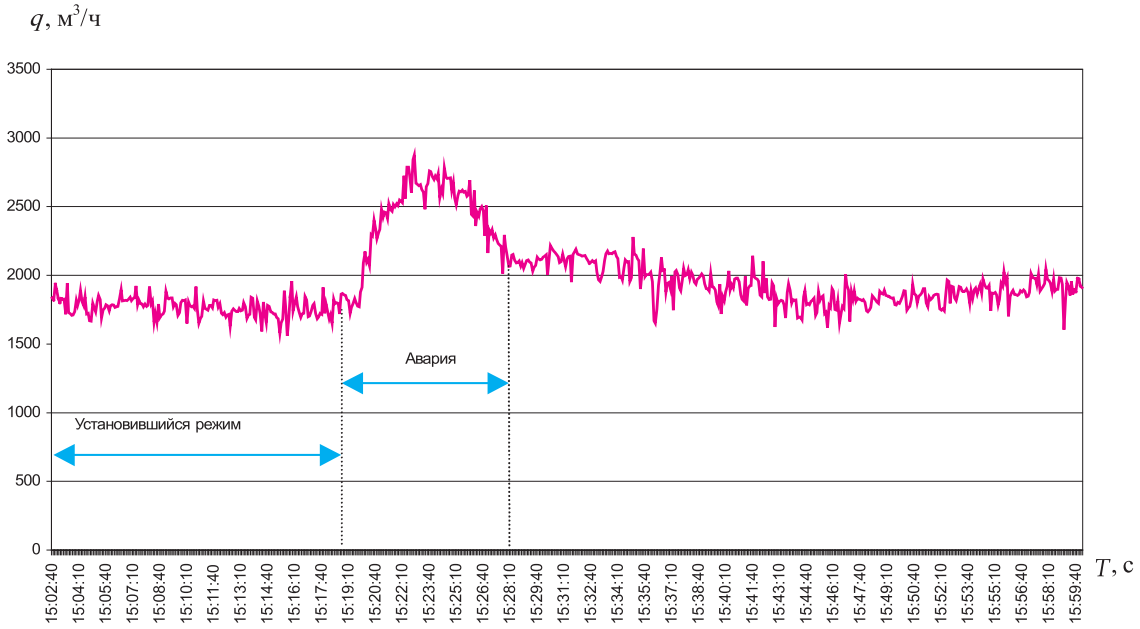



Рис. 5.27. Изменение водопотребления Алексеевского жилого массива от насосной станции № 25А с 15:00:00 до 16:00:00 ч 16.02.2001 г.

Расчеты, содержащиеся в разработанном методе двухконтурного управления насосными станциями, дают возможность не только анализировать работу действующих систем ПРВ и решать задачи их совершенствования, но и принимать важные решения при разрегулировке систем ПРВ и обнаружении аварий на водосети.

## 5.7. ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МЕТОДА ДВУХКОНТУРНОГО УПРАВЛЕНИЯ НАСОСНЫМИ СТАНЦИЯМИ

Метод двухконтурного управления работой насосных станций позволяет построить многоконтурную схему управления системой ПРВ, где в качестве управляющего воздействия используется изменение частоты вращения рабочего колеса насосного агрегата.

Центральный компьютер и микроконтроллер на местном диспетчерском пункте (МДП), а также микроконтроллеры в контролируемых пунктах (КП) работают в режиме реального времени в соответствии с разработанным алгоритмом.

Требуемое давление воды в диктующей точке задается диспетчером МДП. Дальнейшие операции производятся первым контуром управления автоматически через центральный компьютер и микроконтроллер КОМКОН.

Управление объектом осуществляется в соответствии с показаниями датчика давления в диктующей точке при непрерывном контроле всех основных параметров насосной станции и состояния водораспределения в сети вторым контуром управления. Расходы воды от насосной станции, потери напора (пьезометрии), сопротивление системы ПРВ составляют второй контур управления, и отклонение от заданных параметров $\left|q_{jt} - \hat{q}_{jt}\right| > 3s_{qjt} \quad (j \in L)$, о чем сказано выше, является основным критерием для лица, принимающего решение о вмешательстве в технологический режим управления системой ПРВ.

Входными аналоговыми сигналами контроллера КОМКОН в схеме управления работой насосного агрегата (рис. 5.28) являются:

давление в диктующей точке;
давление на выходах насосной станции;
расход воды на выходах насосной станции;
число оборотов насосного агрегата 4;
давление на выходах насосных агрегатов;
токи насосных агрегатов;
мощность активная на вводах;
мощность реактивная на вводах;
напряжение на вводах;
уровень воды в резервуарах;
температура воздуха;
температура подшипников двигателя;
давление в узловых точках сети;
расход воды в узловых точках сети.

Аварийную ситуацию определяет именно второй контур системы управления, который на основании полученных данных о давлении, расходе воды в узловых точках сети и на выходе насосной станции вычисляет сопротивление сети по направлениям и скорость его изменения. Здесь контроллер КП передает информацию по радиоканалу на контроллер МДП и далее на центральный компьютер для анализа и принятия решений о локализации или ликвидации повреждения, изменения режимов водоснабжения и т. д.

Для оперативного участия обслуживающего персонала в процессе регулирования вся информация о состоянии объекта управления отображается на экране видеомонитора IBM-совместимого компьютера, который подключается к контроллеру КОМКОН через один из последовательных коммуникационных портов. Через этот порт от компьютера к контроллеру передаются команды оперативного вмешательства дежурного по станции, которые задаются посредством клавиатуры компьютера.

Контроллеры КП с частотой один опрос в секунду или с другой заданной частотой опрашивают датчики давления и расхода, нормализуют полученные значения, вычисляют сопротивление сети и скорость его изменения на своем участке, расход воды на насосной станции и в диктующей точке, упаковывают их в специальные буфера и по запросу центрального контроллера (а в случае возникновения аварийной ситуации — по собственной инициативе) передают их ему через центральный контроллер куста для дальнейшей обработки.

Контроллер МДП, получив требуемые ему данные, включает их в свой алгоритм вычисления управляющего воздействия и, основываясь на полученных данных, вырабатывает новое управляющее воздействие либо оповещает о возможной аварии и, используя содержащиеся в нем статистические данные об эквивалентных параметрах водопроводных сетей по направлениям, изменении рассчитанных скоростей, изменении величин расходов воды и сопротивления сети по направлениям, вычисляет предполагаемый район аварии.

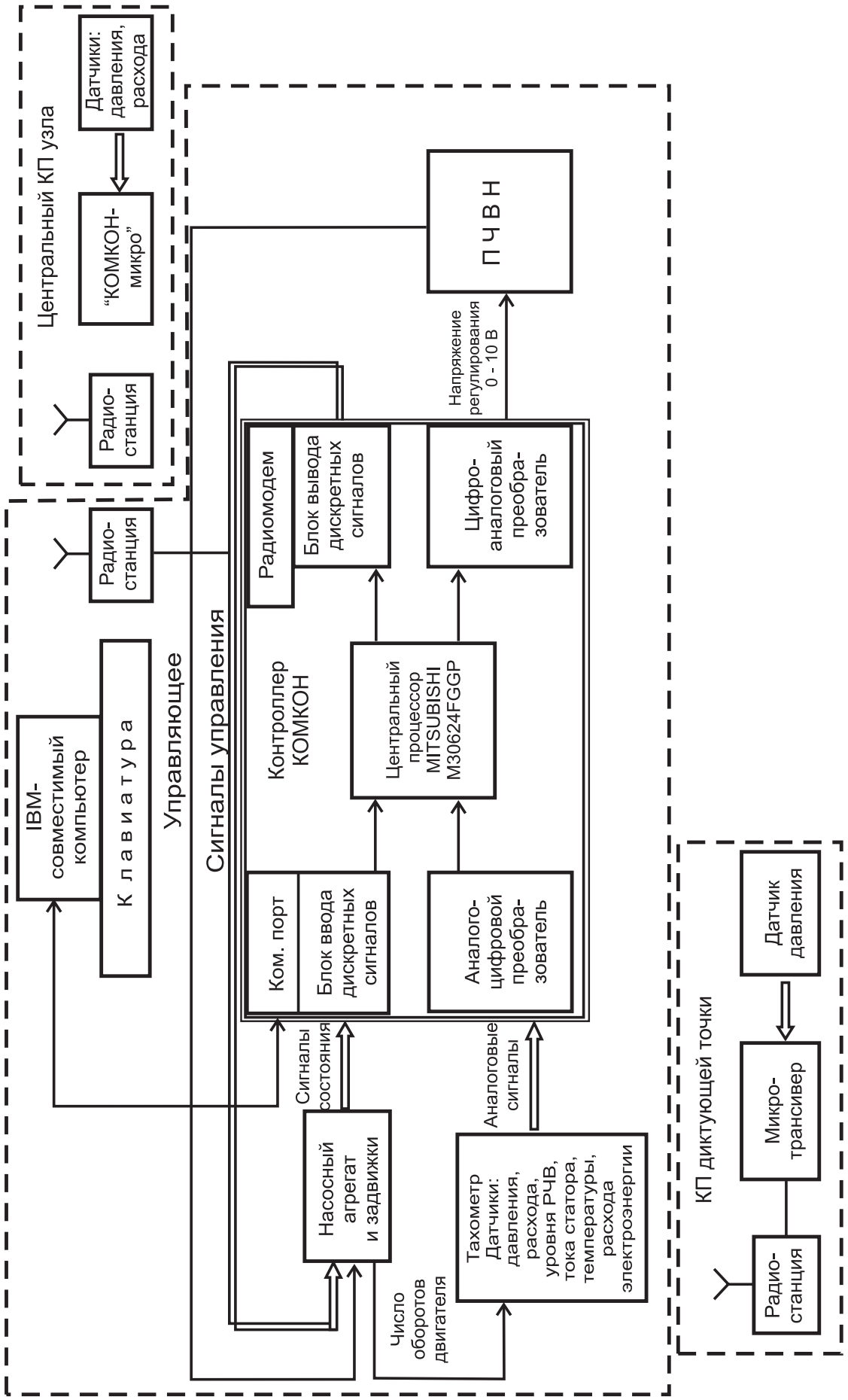



Рис. 5.28. Структурная схема работы насосного агрегата, управляемого контроллером КОМКОН

Применение разработанного метода в расчетах действующей системы ПРВ не только имеет теоретическую и практическую значимость для совершенствования гидродинамической работы систем ПРВ, но и создает основу для решения задач ресурсосбережения.

## ВЫВОДЫ

1. Разработан метод двухконтурного управления насосными станциями в системах ПРВ, приведены результаты внедрения данного метода в системе ПРВ для Алексеевского жилого массива Харькова. Проведен эксперимент с имитацией аварии, в котором использование разработанного метода позволило не только определить факт аварии, но и достаточно точно найти место аварии.

2. Показано, что наиболее эффективным по энергозатратам способом управления режимом функционирования насосной станции является активный способ управления на базе изменения частоты вращения вала рабочего колеса насоса.

3. Предложен новый принцип реализации второго контура управления, основанный на замерах напора в узлах фрагмента системы ПРВ с последующей специальной обработкой полученных результатов измерений.

4. Разработан и реализован на практике алгоритм обработки этих измерений, позволяющий зафиксировать не только факт аварии, но и ориентировочное место этой аварии.

5. Описан и реализован метод стабилизации напора в диктующей точке сети с контролем и указанием зоны аварии, определяемой вторым контуром управления.

6. Экспериментом инициирована авария, во время которой была испытана работа второго контура управления. Разработанная и реализованная система отработала (по сирене) эту аварию и с точностью до 1 км$^2$ определила зону аварии.

7. Сформулированы два основных этапа совершенствования управления действующими системами ПРВ: планирование водораспределения; оперативное управление.

8. Математически сформулированы критерии качества и эффективности функционирования СПРВ, позволяющие оперативно реагировать на возникновение нештатных ситуаций.

9. Сформулированы и решены следующие задачи, характерные для двух последних этапов:

оптимизация работы насосных станций при их совместной работе на сеть;

оптимизация режима работы насосной станции;

идентификация состояния водораспределения.

10. Рассмотрены различные способы повышения надежности и эффективности функционирования системы ПРВ путем выбора их рациональной структуры.

11. Обоснована структура региональной системы ПРВ (гравитационно-напорный городской водовод с линейным подключением насосных станций), при которой задача оперативного управления сводится к стабилизации напора в диктующей точке. При этом доказано, что задача идентификации состояния водораспределения в этом случае сводится к нахождению средних значений ее параметров. Приведено решение этой задачи для Алексеевского жилого массива.

12. Предложенный и реализованный на практике (в жилом массиве Алексеевка) метод оперативного управления водоснабжением отличается простотой и реализует задачу управления режимом работы насосных станций по критерию минимальных суммарных избыточных напоров, сведя их к стабилизации напора в диктующей точке.

# ГЛАВА 6

# РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЙ, ПОВЫШАЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ПРВ

## 6.1. ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ПРВ

Сбережение природных ресурсов является свидетельством уровня культуры народа, его бережного отношения к окружающей среде, показателем экономического развития страны, научно-технического прогресса [187]. Украина — страна с ограниченными водными и другими ресурсами, которые так необходимы для ее экономического развития [167]. Для снижения потерь воды и уровня загрязнения окружающей среды, вызванных работой систем ПРВ городов, требуются определенные знания, умение предупреждать кризисные ситуации, необходимо совершенствовать методы планирования работы этих систем.

Города, строившиеся на протяжении веков, имеют разный уровень инфраструктуры, в том числе и разную продолжительность эксплуатации инженерных сетей. В устаревших системах ПРВ происходят значительные потери воды на пути от источника водоснабжения до водопотребителя [38], которые составляют от 20 до 40 % всего объема воды, поданной насосными станциями водопотребителю [193]. Показатель потерь воды в городах имеет различный характер, зависящий от цикличности изменения давления в системах ПРВ. Это требует особого подхода к исследованию потокораспределения, пересмотра действующих стандартов в СНиПе [249], с тем чтобы объективно отразить проблемы, возникающие при эксплуатации действующих систем ПРВ. Известно [11], что в результате утечек растет дефицит воды в городах, повышаются финансовые затраты водопроводных хозяйств городов.

Одним из приоритетных направлений в сбережении водных ресурсов является совершенствование региональных систем водоснабжения, в первую очередь там, где имеются значительные потери и утечки воды. Производство питьевой воды для населенных пунктов связано с потреблением огромного количества различных ресурсов. Все это в значительной степени влияет на материализацию труда многих отраслей промышленности. Традиционные методы управления недостаточны для надежной и экономичной эксплуатации предприятий водоснабжения. Разработка эффективных методов управления водоснабжением в условиях постоянно стареющей инженерной инфраструктуры может способствовать замедлению разрушения водосетей, повысить устойчивость их работы. Решить эти проблемы можно путем создания корпоративных автоматизированных систем управления водоснабжением.

«Узким» местом систем кондиционирования, подачи и распределения воды в городах Украины в настоящее время является «ручное» управление водоснабжением, отсутствие достоверной информации о функционировании систем ПРВ [204].

В то же время эксплуатация систем ПРВ на основе тщательно подобранных моделей прогнозирования водопотребления, анализа банка данных о состоянии сложного сетевого хозяйства, работы насосных станций и резервуаров, оценка рационального использования воды потребителями, выработка стратегии устранения гидравлических и технологических дефектов в системах ПРВ могут способствовать оптимизации их рабо-

ты и оказать существенное влияние не только на конструкцию гидравлической системы, но и на экономику водопроводного хозяйства в целом.

При этом необходимо иметь в виду, что водосетевые хозяйства системы ПРВ в крупных городах имеют ряд особенностей:

1. Трубопроводы транспортируют воду в условиях, при которых основные параметры — расходы $q_{н.ст.}$ и давления $P_{н.ст.}$ на насосной станции, средние скорости $V_{с.д.}$ в диктующей точке и давления $P_{с.д.}$ в ней изменяются во времени. Причины возникновения колебаний давления и неустановившихся режимов видны из рис. 6.1.

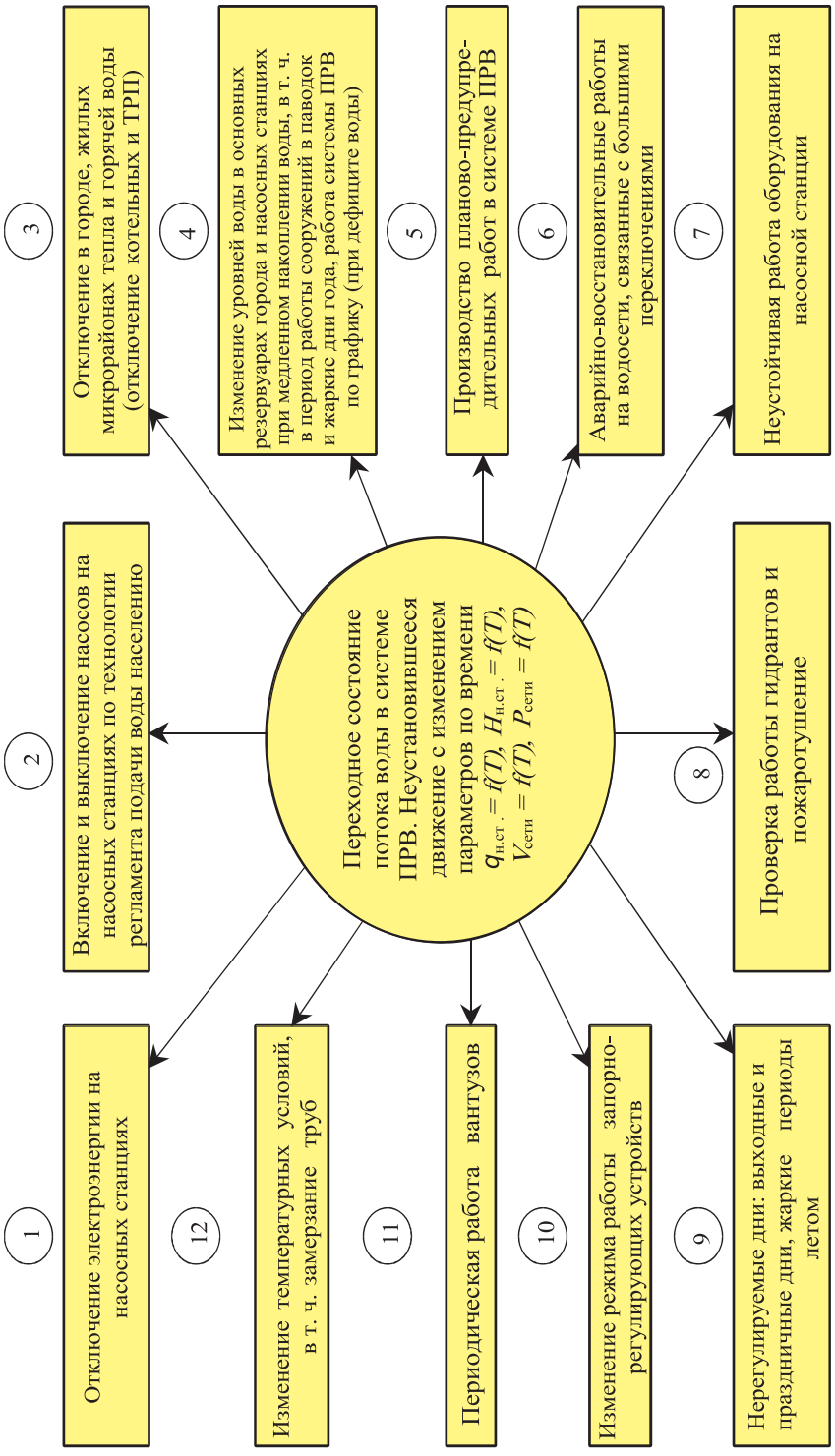



Рис. 6.1. Причины возникновения неустановившегося потока воды в системе ПРВ, приводящие к изменению параметров $q_{н.ст.} = f(T)$; $P_{н.ст.} = f(T)$; $V_{сети} = f(T)$; $P_{сети} = f(T)$

2. В городах Украины системы ПРВ, в отличие от городов стран Европы, Америки, Азии, изначально не проектировались и не проектируются с водонапорными башнями как с кольцевой, так и с тупиковой сетями различных диаметров. Это снижает возможность стабилизации сетевых напоров и гашения возможных гидроударов в системах ПРВ.

3. Системы трубопроводов (стальных, чугунных) подвержены электро- и биохимической коррозии, работают под давлением, испытывая изменяющиеся в широком диапазоне гидравлические нагрузки. На них действуют также механические силы, такие, как транспорт города, осадка грунта под трубопроводами и другие концентрированные нагрузки, обусловленные климатическими условиями.

4. В процессе эксплуатации водосети происходят изменения механических и физических свойств металла труб.

5. Значительные потери воды в водопроводных и внутридомовых сетях оказывают существенное влияние на рост дополнительных капиталовложений для восполнения непроизводительных потерь. Из-за потерь воды в системе ПРВ необходимо дополнительно нагружать насосные станции, повышать напор воды в сети, чтобы обеспечить население водой, что, в свою очередь, приводит к авариям в сети, в том числе из-за колебания давления от падающих шиберов в задвижках.

Указанные особенности оказывают существенное влияние на возникновение аварий в системах ПРВ. Тем не менее до настоящего времени исследования нестационарных гидродинамических и механических процессов, возникающих в реальных водопроводных системах, не проводились. Отсутствуют рекомендации, выполнение которых позволило бы сократить или исключить аварии, обусловленные нестационарными процессами (в том числе гидроударами), например, при отключениях электроэнергии или при мгновенном перекрытии шиберов [17]. Натурные исследования, идентификация объектов управления, внедрение в практику водоснабжения АСУ технологическими процессами, описанные в предыдущих главах, позволяют получить информацию, анализ которой будет способствовать решению вышеизложенных проблем.

Сущность экономии воды и сокращения утечек в системе ПРВ заключается в уменьшении расхода питьевой воды в процессе подачи и распределения. Здесь на первый план выдвигается оценка режима работы насосных станций в городе. Так, с помощью оценки расходов воды, идущей от насосной станции к потребителю в ночные часы, и отношения этой суммы расходов воды с 0.00 до 4.00 ч утра к сумме расходов воды в дневные часы суток оценивается коэффициент эффективности работы насосных станций $K_{эф,}$ который рассчитывается по формуле

$$K_{эф} = \frac{\sum q(0-4\ ч)}{\sum q(12-16\ ч)} 100\ \%.$$

Эта величина должна быть около 50 %, что достигается в условиях АСУ ТП насосной станции. Если этот показатель выше, то в системе ПРВ существуют заметные нарушения режима работы насосов и утечки в водосети, не обеспечена комбинированная работа насосов на насосной станции, способствующая достижению близких к максимальным КПД, наименьшие затраты воды и электроэнергии. Приведем конкретный пример. На рис. 6.2 показаны графики изменения за сутки расхода воды и давления на выходе насосной станции № 27А Харькова, работающей в системе АСУ. Указаны также часы работы насосных агрегатов, определена суммарная подача насосной станции за сутки $S_{общ}$= 109068 и автоматически вычисляемый коэффициент эффективности работы насосной станции за сутки $K_{эф}$= 48,55 %.

Под научным руководством автора данной книги была впервые в бывшем СССР создана АСУ водоснабжением города Харькова, предусматривающая управление технологическими процессами и решение задач организационно-экономического управления производством [217].

В настоящее время комплексы технических средств локальных информационно-управляющих систем заменены компьютеризованными датчиками, микропроцессорами и соответствующими пакетами прикладных программ [195]. Методы сбора и анализа информации

в системе водоснабжения постоянно совершенствуются. Успешно функционирует система управления базами данных для определения характеристик объектов и процессов водоснабжения. Выполняется прогнозирование водопотребления города, количества повреждений в системе ПРВ, разрабатываются рекомендации по санации или замене участков водосети [198].

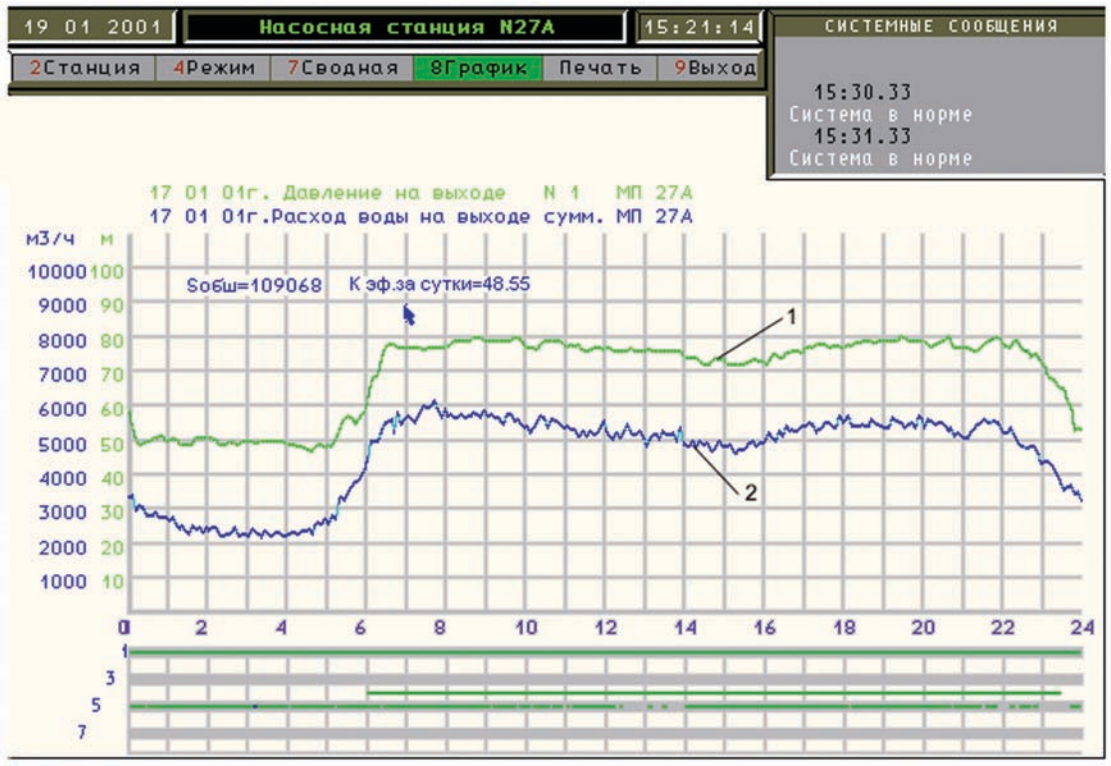



Рис. 6.2. Видеокадр графиков изменения расхода воды (*2*) и давления (*1*) на выходе насосной станции № 27А (АСУ ТП водоснабжения Харькова)

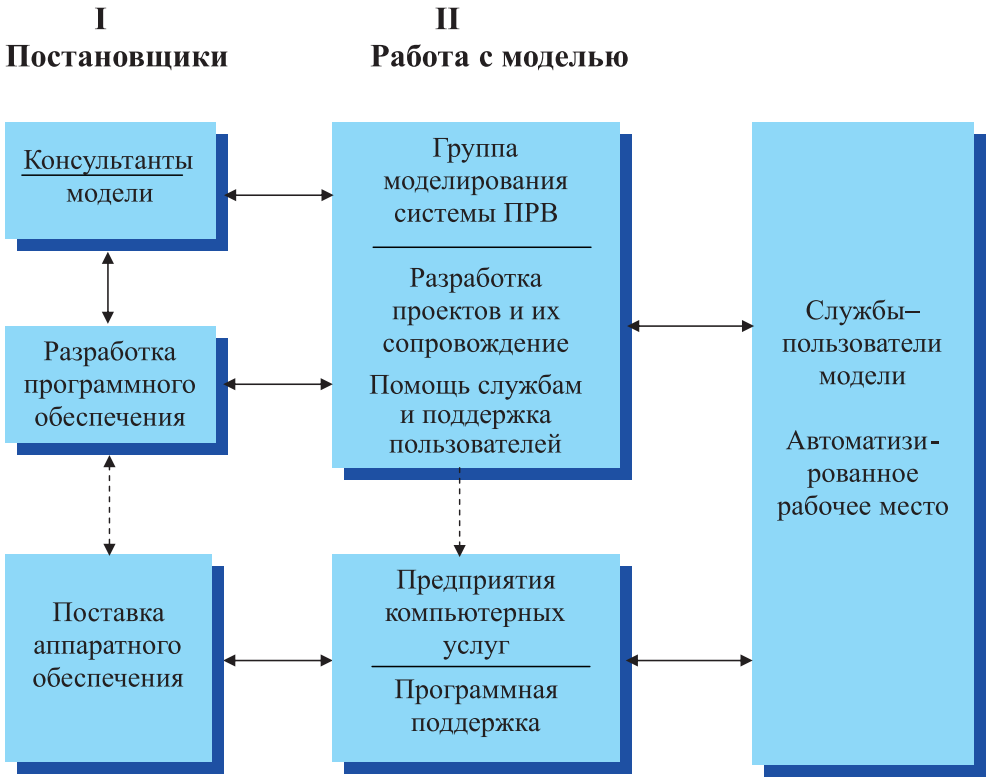



Рис. 6.3. Структура сетевого моделирования в системе водоснабжения Харькова

Поскольку данные о функционировании системы ПРВ являются пространственно распределенными, применение вычислительной техники для анализа работы системы, обеспечения аварийного реагирования и управления системой основано на использовании технологии геоинформационных систем (ГИС-технологий). Данные технологии являются мощным инструментом сбора, хранения, обработки, анализа и визуализации пространственно-распределительной информации. Особенно эффективным применение ГИС-технологий оказалось для сетевого моделирования, позволяющего выявлять и оценивать аварийные и предаварийные ситуации, дефицит и избыток воды в резервуарах и т. д.

Вычислительная техника для анализа работы и управления системой ПРВ, а также сетевого моделирования была применена на базе АСУ ТП водоснабжения Харькова (первой АСУ ТП водоснабжения в бывшем СССР).

В качестве критерия управления в АСУ ТП водоснабжения принимаются минимум себестоимости подаваемой воды необходимого качества и удовлетворение всех абонентов [318], а также критерии, изложенные в предыдущей главе.

Прежние методы управления техническим обслуживанием в системах водоснабжения городов в XXI веке будут постепенно уступать место более прогрессивным благодаря созданию эффективных систем, разработке и внедрению стратегического плана интенсификации водообеспечения.

Сбор данных о работе систем ПРВ городов на базе АСУ ТП и их критический анализ с целью интенсификации систем водоснабжения должны быть более обширными. Основное внимание в ближайшие годы следует уделять выявлению резервов в системе подачи и распределения воды, поискам путей экономии водных и других ресурсов, при условии обеспечения качества питьевой воды для города в соответствии с ГОСТом «Вода питьевая» и ДержСанПіН «Вода питна». Этому способствуют:

- < расчет водопотребления города (см. главу 4);
- = расчет пропускной способности магистральных водоводов в течение срока их эксплуатации (см. главу 3);
- > оценка частоты отказов элементов трубопроводной системы распределения воды (изложена в этой главе);
- ? оценка потерь и неучтенных расходов воды в системе транспортировки и распределения воды (изложена в этой главе);
- @ количественная оценка минимального непроизводительного расхода воды в системе ПРВ в ночное время (приведена в данной главе);
- A количественная оценка частоты отказов элементов сантехоборудования в жилом фонде города и их влияние на непроизводительные потери воды (приведена в данной главе);
- B анализ контроля пьезометрии районов города с помощью АСУ ТП системы ПРВ (дан в этой главе);
- C применение геоинформационных технологий в системе водообеспечения (см. главу 5);
- D программа непрерывной подготовки и обучения ИТР и операторов систем ПРВ.

Изложенное убедительно свидетельствует о том, что следует разрабатывать и внедрять в городах стратегический план интенсификации водообеспечения, способствующий сокращению скорости изъятия воды у природы. Это одна из важнейших проблем, стоящих перед народным хозяйством Украины в условиях начала глобального изменения климата на Земле, ограниченных запасов пресных водных ресурсов в стране, негативного изменения гидробиологического и солевого состава вод. Большое значение во внедрении стратегического плана интенсификации водоснабжения городов (рис. 6.4) необходимо придавать задаче удовлетворения потребностей в воде, при условии сокращения государственных капиталовложений, материально-технических и других ресурсов, развитию новых мощностей водоснабжения, не нарушающих состояния природной среды, сокращению в городах сброса сточных вод в водные объекты. Разработка плана интенсификации водоснабжения города может стать мощным импульсом в совершенствовании социально-рыночных отношений в Украине в отрасли водоснабжения.

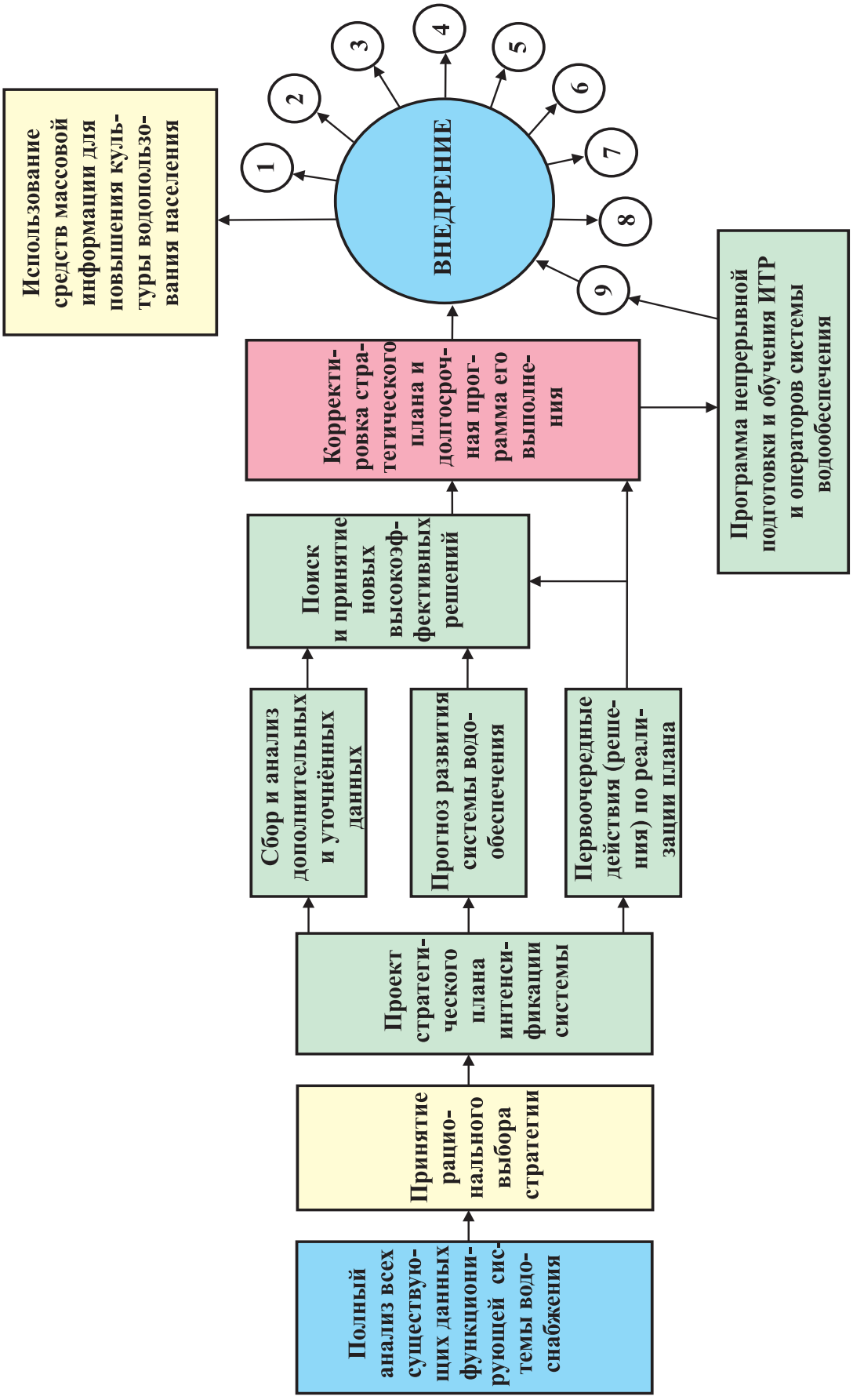



Рис. 6.4. Схема разработки и внедрения стратегического плана интенсификации систем водообеспечения

## 6.2. АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АСУ ТП ВОДОСНАБЖЕНИЯ ХАРЬКОВА

Водопотребление — самостоятельная область водоснабжения. Режимы и объемы водопотребления являются основой для проектирования и эксплуатации объектов водоснабжения, планирования и управления их работой. Сама теория водопотребления рассматривается как непрерывный и неравномерный цикл подачи и распределения воды (от кондиционирования воды до ее транспортирования). Величина и режим водопотребления в целом оказывают большое влияние на работу систем ПРВ, а следовательно, на качество и бесперебойность водообеспечения.

Работа систем ПРВ подчинена задаче обеспечения нормального водоснабжения потребителей с требуемым расходом воды в каждый момент времени. Потребитель воды самостоятельно реализует ее забор из системы ПРВ в любой произвольный период времени. Это является определяющим в режимах воздействия на систему ПРВ. Часто, особенно в праздничные дни, суммарный затребованный потребителями расход воды превосходит проектные производительности системы ПРВ, и как следствие возникает временный дефицит в воде для потребителей, расположенных вблизи диктующих точек. Особый смысл в таком случае приобретают процессы моделирования систем ПРВ и оценка возможности управляющего воздействия на систему.

Компьютерные модели для анализа работы систем ПРВ позволяют оценивать не только расход воды и давление в точках водосети, но и потокораспределение в системе ПРВ, а также находить «узкие места», нарушения в изменении гидравлического режима системы ПРВ и др. Выбор конкретной модели водопотребления зависит от пользователя (например, варианты информационного входа, графики, интерфейсы дополнительных модулей).

Как правило, необходимо определить основные элементы и варианты, а затем выбрать модель водопотребления, удовлетворяющую действующим в данный момент условиям гидравлического режима системы ПРВ. С вводом АСУ ТП появилась возможность оценить и применить модель, действующую как в статическом, так и в динамическом режимах. На рис. 6.5 представлена статическая модель пьезометрии от объекта узла № 15 по внешнему контуру водосети Алексеевского жилого массива по часам суток с учетом максимального и минимального водопотребления. Мультипликационная компьютерная имитация работы водосети во времени дала возможность увидеть динамику водопотребления, определить направления потоков и состояния системы, изображенной на рис. 6.6.

Натурные измерения позволяют создавать статическую базовую модель суточной пьезометрии водопотребления по микрорайонам жилого массива на протяжении суток (рис. 6.11).

В действующих системах ПРВ, где средняя скорость потока воды постоянно изменяется во времени, неравномерное движение воды по водосети принимает различный характер вследствие забора воды потребителями, отключений от системы, наличия в системе труб разного диаметра, меняющихся гидравлических уклонов, из-за различного состояния запорно-регулирующих устройств, необходимости обеспечивать зональность водораспределения.

В системе ПРВ Алексеевского жилого массива в процессе исследования было выделено внешнее водопроводное кольцо 15–14/15, трассировка которого окружает кольцом все жилые микрорайоны (рис. 6.6). Общая протяженность кольца составляет 8452 м. Геодезическая высота диктующей точки по отношению к узлу № 15, подающему воду в микрорайоны, составляет 30,85 м.

В соответствии с проектом детальной планировки жилой массив Алексеевки застроен многоэтажными (девятиэтажными) зданиями и зданиями повышенной этажности (12–16 этажей). Кроме жилых зданий, на территории Алексеевского жилого массива размещено несколько учебных и научно-исследовательских институтов, техникумов, училищ и предприятий культурно-бытового обслуживания. Абсолютные отметки поверхности колеблются от 125 до 180 м. Основная застройка жилых микрорайонов завершена в 1982 году. Проектом застройки учтено максимальное использование насосной станции № 25А, обеспечивающей жилые районы Павлова Поля и Померок. При проектировании водоснабжения Алексеевского жилого массива в перспективе предусматривалось расширение водосети.

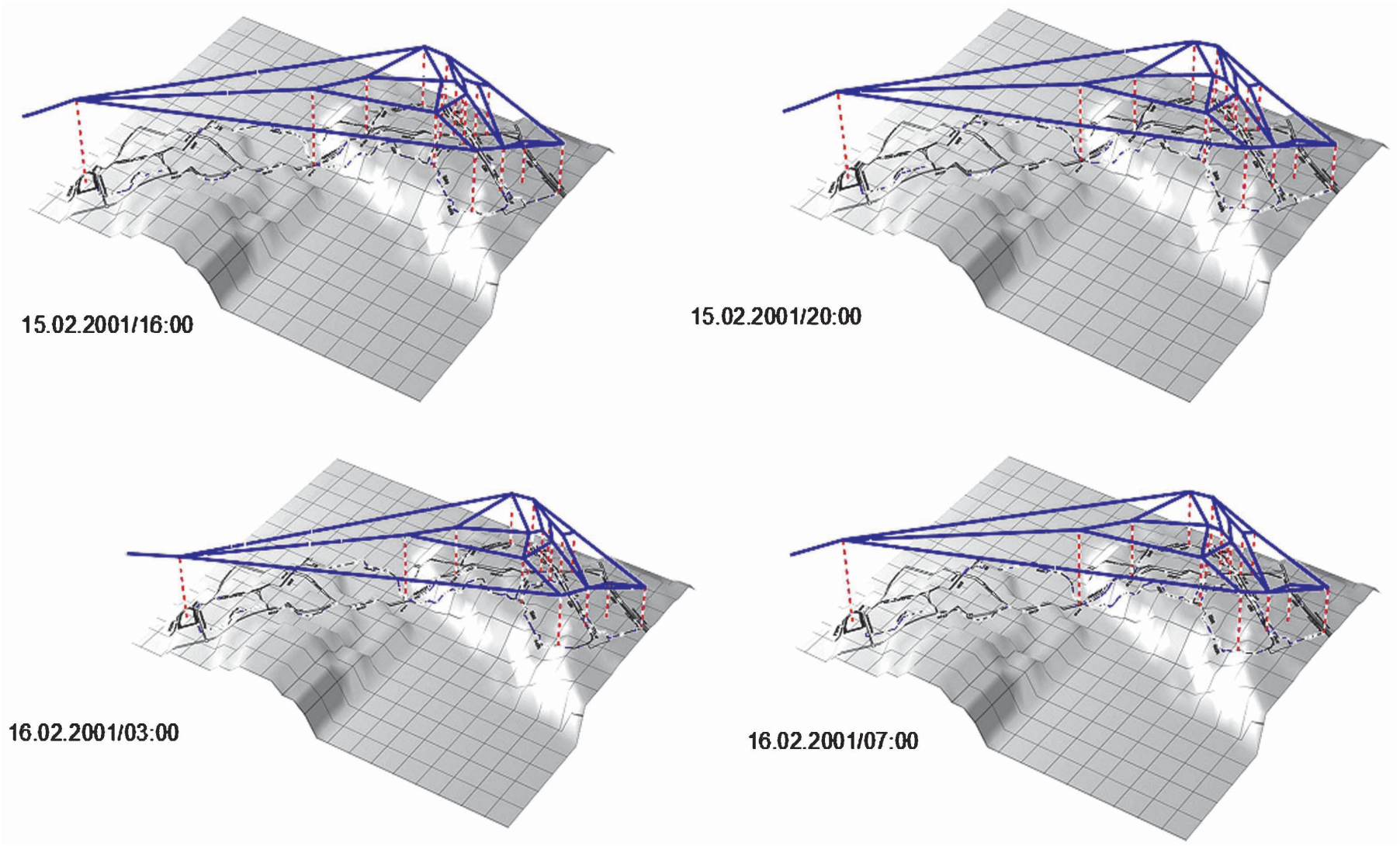



Рис. 6.5. Пьезометрия от насосной станции № 25А на районы Павлова Поля и Алексеевского жилого массива по часам суток (масштаб пьезометра «зебра» — 5 м вод. ст.).
Насосная станция мощностью 120 000 м$^3$/сут работала в автоматическом режиме (15.02.2001 — 16.02.2001 г.)

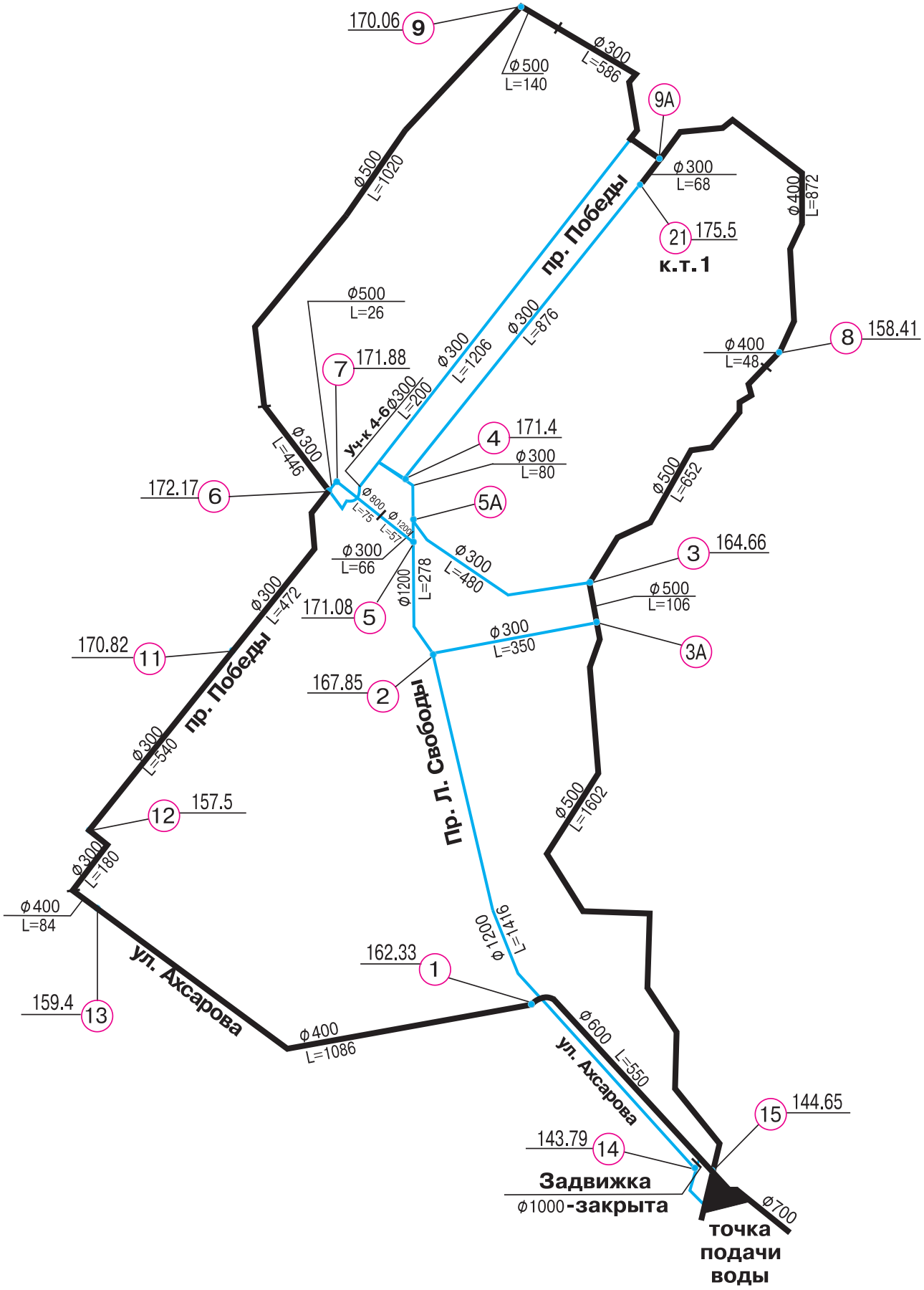



Рис. 6.6. Система ПРВ Алексеевского жилого массива

Проектом не предусматривалась поэтапная замена действующих водосетей, которые в течение времени эксплуатации могут полностью прийти в негодность и заметно снизить свою пропускную способность. Проектом не устанавливалась диктующая точка на водосети, а необходимый свободный напор определялся в зависимости от этажности жилой застройки. Свободный напор в водосети принят равным 40 м с целью обеспечения подачи воды с учетом девятиэтажной застройки. Для зданий, имеющих более девяти этажей, предусматривались местные повысительные установки.

Гидравлический расчет водосети, проведенный на базе изложенного в предыдущих главах, позволил в условиях АСУ оптимизировать напоры воды для жилых микрорайонов Алексеевки с учетом срока эксплуатации водосети. В результате появилась возможность уменьшить подачу воды с 44099,14 до 39984,5 м$^3$/сут или сократить ее на 1501861,851 м$^3$ в год, что составляет заметную экономию воды (табл. 6.1).

Таблица 6.1

**Часовые изменения расхода воды Алексеевского жилого массива**

| Время суток, *T*, ч | До внедрения АСУ ТП ПРВ | | После внедрения АСУ ТП ПРВ | |
|---|---|---|---|---|
| | процент от расхода воды за сутки | расход воды, м$^3$/ч | процент от расхода воды за сутки | расход воды, м$^3$/ч |
| 00:00–01:00 | 3,35 | 1477,82 | 2,84 | 1078,80 |
| 01:00–02:00 | 3,37 | 1433,22 | 2,38 | 904,00 |
| 02:00–03:00 | 3,30 | 1455,27 | 2,27 | 863,50 |
| 03:00–04:00 | 3,20 | 1411,17 | 2,26 | 858,40 |
| 04:00–05:00 | 3,25 | 1433,22 | 2,60 | 987,00 |
| 05:00–06:00 | 3,40 | 1499,37 | 3,45 | 1309,00 |
| 06:00–07:00 | 3,85 | 1697,82 | 4,88 | 1853,00 |
| 07:00–08:00 | 4,45 | 1962,41 | 5,26 | 1998,10 |
| 08:00–09:00 | 5,20 | 2293,16 | 5,00 | 1901,70 |
| 09:00–10:00 | 5,05 | 2227,01 | 4,79 | 1817,90 |
| 10:00–11:00 | 4,85 | 2138,81 | 4,76 | 1806,80 |
| 11:00–12:00 | 4,60 | 2028,56 | 4,61 | 1752,50 |
| 12:00–13:00 | 4,60 | 2028,56 | 4,52 | 1718,50 |
| 13:00–14:00 | 4,55 | 2006,51 | 4,54 | 1724,60 |
| 14:00–15:00 | 4,75 | 2094,72 | 4,17 | 1584,20 |
| 15:00–16:00 | 4,70 | 2072,66 | 4,59 | 1742,00 |
| 16:00–17:00 | 4,65 | 2050,62 | 4,19 | 1594,70 |
| 17:00–18:00 | 4,35 | 1918,32 | 4,30 | 1642,10 |
| 18:00–19:00 | 4,40 | 1940,86 | 4,47 | 1697,10 |
| 19:00–20:00 | 4,30 | 1896,27 | 4,68 | 1777,60 |
| 20:00–21:00 | 4,30 | 1896,27 | 4,77 | 1812,90 |
| 21:00–22:00 | 4,20 | 1852,17 | 4,99 | 1897,00 |
| 22:00–23:00 | 3,75 | 1653,72 | 4,98 | 1892,40 |
| 23:00–24:00 | 3,70 | 1631,67 | 4,66 | 1771,10 |
| Всего за сутки | | 44099,19 | | 37984,90 |

Расход воды и напор на насосной станции № 25А позволили в круглосуточно управляемом режиме обеспечивать водой жителей Алексеевского жилого массива на всех этажах.

Из табл. 6.1 видно, что в течение суток после внедрения автоматической системы управления по диктующей точке наблюдается резкое отличие часового расхода водопотребления от часового расхода при обычном режиме «ручного» управления системой и дает значительную экономию воды и электроэнергии.

График фактического водопотребления в пределах суток до и после внедрения АСУ ТП характеризует ритм жизни Алексеевского жилого массива, одного из «спальных» районов

Харькова (рис. 6.7). Коэффициент часовой неравномерности в течение суток от максимума к минимуму составляет 2,33.

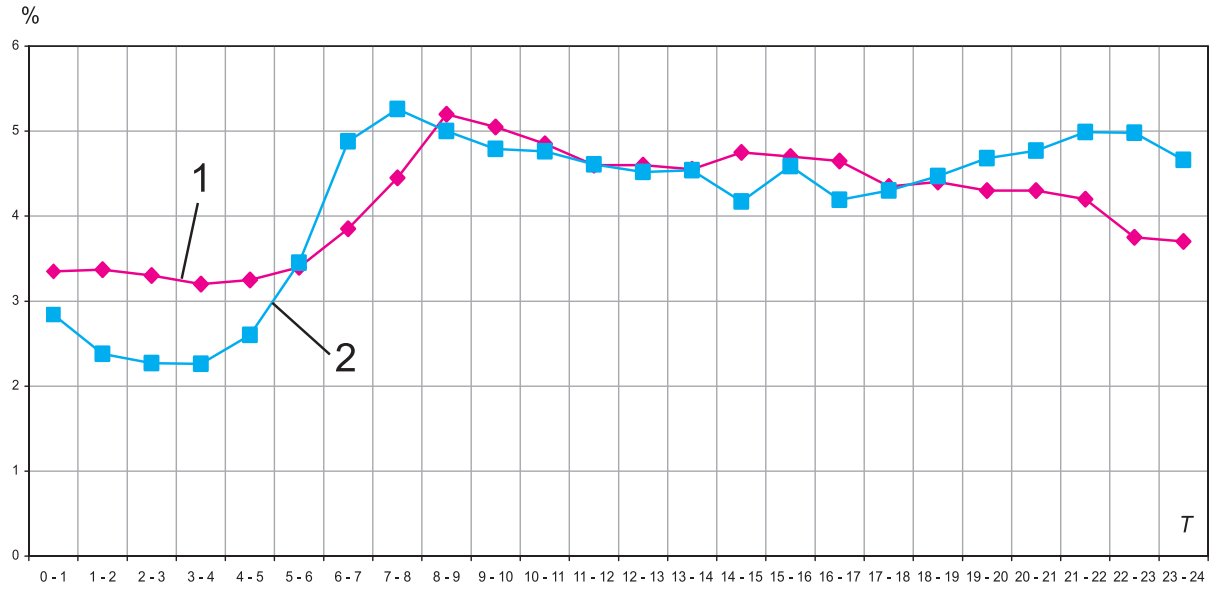



Рис. 6.7. Часовые изменения водопотребления Алексеевского жилого массива до и после внедрения АСУ ТП на насосной станции № 25А, процент суточного водопотребления: *1* — до внедрения АСУ ТП; *2* — после внедрения

Практика показывает, что после пуска в эксплуатацию запроектированной водосети, как правило, отдельные ее участки не работают с расчетными параметрами, несмотря на то что в системе ПРВ в целом постоянно поддерживается состояние динамического равновесия. Большое значение приобретает изучение закономерностей водопотребления, определяемое в узловых точках водосети, колебание и изменение показаний пьезометров, присоединение и отсоединение потока воды в узле и т. д.

Изучение этих процессов и их моделирование позволяют полнее раскрыть сущность процесса водопотребления, изучить особенности и выявить закономерности и режим работы системы ПРВ. Решение этой задачи сопряжено со многими трудностями из-за множества факторов, связанных с водопотреблением. В этом случае осуществляется поиск формальных решений, удовлетворяющих требованиям процесса водопотребления. Построение модели водопотребления, отражающей реальную обстановку, осуществляется путем экспериментального исследования системы ПРВ.

В литературе еще не приводились описания натурных исследований водопотребления в случаях присоединенного и отсоединенного потока воды в узле водосети. Исследования по изменению режимов движения воды в узле выполнены впервые и их результаты представлены в табл. 6.2 и на рис. 6.8–6.10.

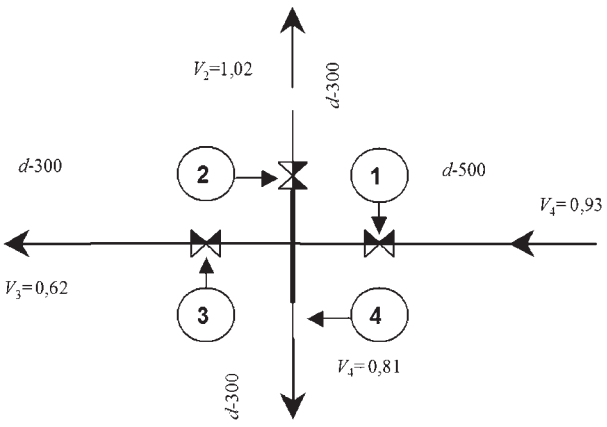



Рис. 6.8. Узел водосети

Таблица 6.2

**Результаты натурного исследования узловых расходов и скорости потока воды на участках сети Алексеевского жилого массива**

| Время суток, $T$, ч | Диаметр крестовины узлового соединения, мм | | | | Сумма $q_2+q_3+q_4$ | Процент отклонения $q_1-(q_2+q_3+q_4)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 500 | 300 | 300 | 300 | | |
| | $q_1$ | $q_2$ | $q_3$ | $q_4$ | | |
| 13:10 | 654,60 | 258,50 | 156,20 | 198,50 | 613,20 | 6,32 |
| 13:15 | 651,00 | 248,40 | 153,70 | 207,10 | 609,20 | 6,42 |
| 13:20 | 620,60 | 253,70 | 156,80 | 211,50 | 622,00 | −0,23 |
| 13:25 | 579,60 | 261,30 | 161,10 | 212,70 | 635,10 | −9,58 |
| 13:30 | 662,30 | 254,00 | 156,50 | 197,70 | 608,20 | 8,17 |
| 13:35 | 663,70 | 272,50 | 162,90 | 181,70 | 617,10 | 7,02 |
| 13:40 | 663,80 | 251,40 | 154,50 | 211,70 | 617,60 | 6,96 |
| 13:45 | 672,20 | 261,30 | 160,60 | 203,10 | 625,00 | 7,02 |
| 13:50 | 648,20 | 256,80 | 169,70 | 186,50 | 613,00 | 5,43 |
| 13:55 | 651,70 | 270,80 | 159,00 | 241,00 | 670,80 | −2,93 |
| 14:00 | 663,70 | 261,80 | 158,80 | 212,20 | 632,80 | 4,66 |
| 14:05 | 604,40 | 262,90 | 157,50 | 205,90 | 626,30 | −3,62 |
| 14:10 | 644,70 | 252,20 | 157,30 | 228,50 | 638,00 | 1,04 |
| 14:15 | 583,20 | 252,90 | 154,70 | 196,30 | 603,90 | −3,55 |
| 14:20 | 664,40 | 265,70 | 155,70 | 201,80 | 623,20 | 6,20 |
| 14:25 | 631,20 | 268,00 | 164,90 | 211,50 | 644,40 | −2,09 |
| $q_{ср}$ | 641,21 | 259,51 | 158,74 | 206,73 | 624,99 | 2,53 |
| $V_{ср}$ | 0,93 | 1,02 | 0,62 | 0,81 | | |

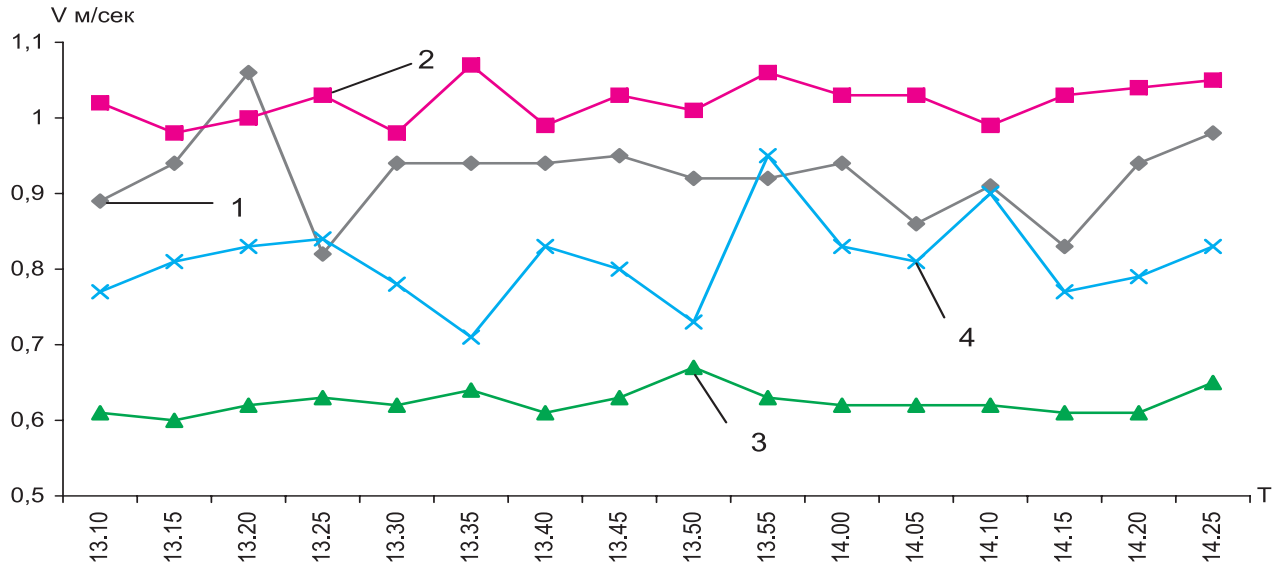



Рис. 6.9. Результаты натурных исследований скорости потока воды в узле кольцевой сети (замеры на Алексеевском жилом массиве, 1.02.2001): *1* — в точке 1; *2* — в точке 2; *3* — в точке 3; *4* — в точке 4

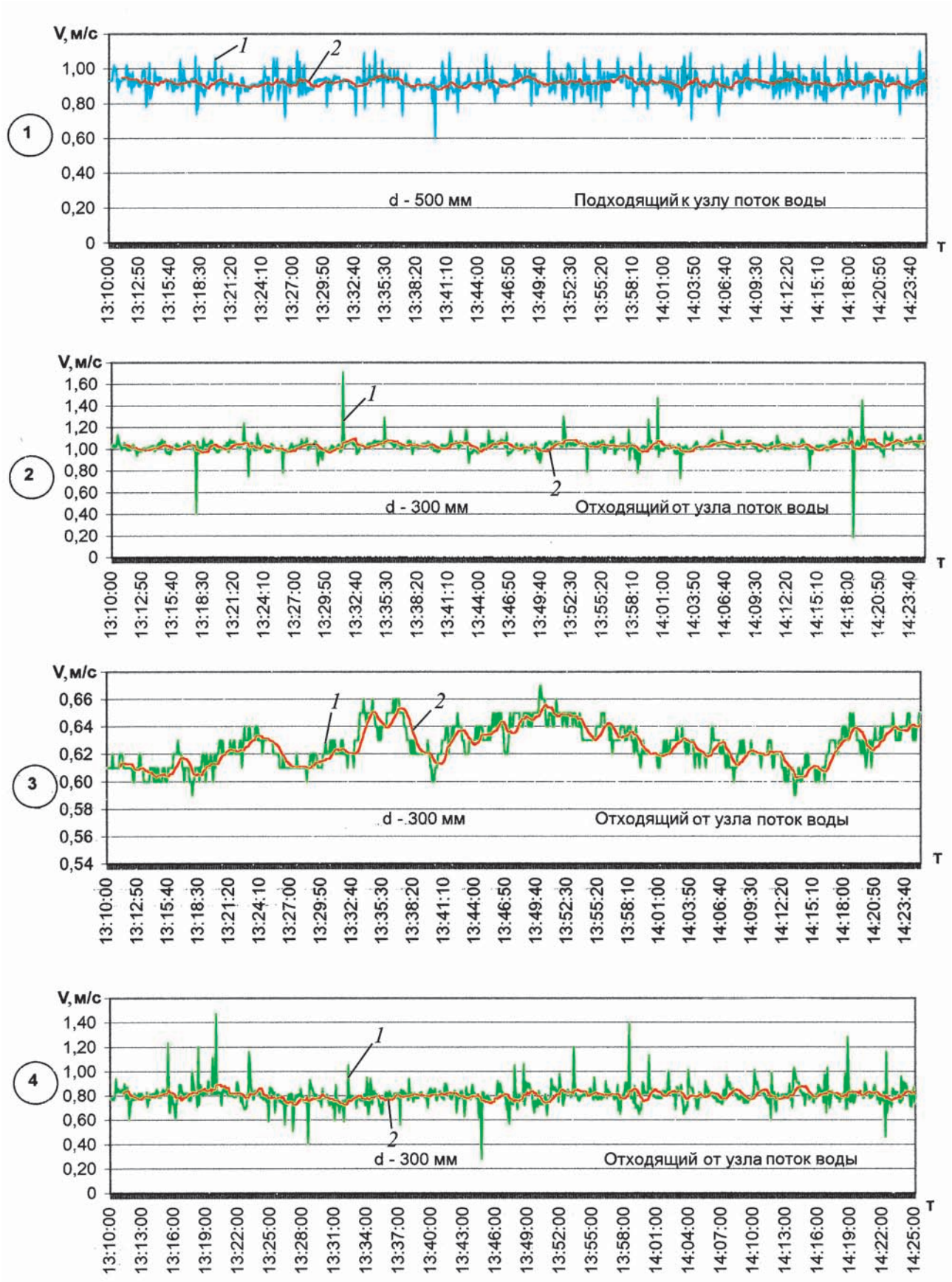



Рис. 6.10. Результаты натурных исследований распределения скоростей потока воды в узле водосети с помощью накладного ультразвукового расходомера UFM 610 p: *1* — скорость пульсации; *2* — средняя скорость

Как видно из рис. 6.10, в узле водосети (рис. 6.8) происходит изменение расхода основного потока, отделяемого от точки 1 и в кольцевой сети — от точек 2, 3, 4. Скорость потока воды в трубопроводах различна и зависит от режима водопотребления на этих участках водосети. Поэтому, не говоря о некорректности проектных расчетов водосети, при экспериментальном изучении поведения пьезометрии системы ПРВ по узлам водосети можно судить об изменениях водопотребления на участках, периодичных изменениях направления потока воды и т. д.

В реально действующей сети принципиально важное значение приобретает оценка по часам суток действующей пьезометрии и выявление с помощью геоинформационной системы «узких» мест водосети, включая зональное перераспределение потоков воды в системе ПРВ. В нормативном документе [249] не указывается порядок выбора диктующей точки на действующих водосетях. В других источниках [60] указывается, что диктующая точка выбирается как наиболее неблагоприятная по располагаемому напору, наиболее удаленная и имеющая самые высокие геодезические отметки [318]. Исследованиями подтверждаются данные Н. Абрамова [3] о диктующей точке. Однако опыты показали, что диктующая точка на водосети может оказаться неблагоприятной по располагаемому напору и находиться на небольшом расстоянии от участка подачи воды жилому массиву. Выбор точки в управлении системой ПРВ и определение ее как диктующей должны осуществляться после анализа площадных графиков (рис. 6.11), оценки поведения пьезометрических линий по отношению к выбираемой диктующей точке по часам суток, оценки направлений пьезолиний по присоединению и отсоединению потока в узлах водосети.

Проведенный анализ состояния водообеспечения населения при автоматическом управлении гидравлической системой ПРВ по диктующей точке показал, что, опираясь на информационную базу данных АСУ ТП о гидравлической работе системы ПРВ, можно снизить риск возникновения внештатных ситуаций и внедрить специальные разработки, направленные на оптимизацию этой системы.

Благодаря ГИС-технологии было выполнено моделирование пьезометрии системы ПРВ в реальном масштабе времени по узлам окружного кольца (рис. 6.11, *а–в*) и сделан гидравлический расчет действующей системы, включая время «аварии», по потерям напора по участкам, указанным в табл. 6.2.

Как следует из рассмотрения рис. 6.11 *а-в*, пьезометрические напоры в узлах окружного кольца водосети имеют различные значения. Максимальная геодезическая отметка на водосети кольца составляет 175,5 м. Свободный напор в ней должен обеспечивать водой девятиэтажные дома в течение суток и находиться в пределах 38–42 м вод. ст., т.е. пьезометры должны быть не менее 213,5 м и не более 216,5 м в самой высшей точке. Такую точку на площадных графиках (рис. 6.11) можно наблюдать в узле № 21. Показания пьезометра в этой точке на протяжении суток изменялись: от минимального 213,5 м (7:00, 8:00, 9:00, 10:00 ч) до максимального 216,5 м (15:00, 16:00 ч). В среднем на протяжении суток показания пьезометра в узле № 21 составляли 215 м, т.е. свободный напор в выбранном наивысшем положении геодезической точки равен 39,5 м вод. ст. Как видно из рис. 6.11, в узле № 21 свободный напор при автоматическом управлении был стабилен и на протяжении суток приток воды по пьезометрической линии во внутриквартальные сети шел от этой точки (узла № 21), за исключением времени 7:00, 15:00, 16:00, 18:00, 20:00, 22:00 и 23:00 ч. Следует отметить, что узел № 21 расположен от точки подачи воды на расстоянии 3280 м (по линии от узла № 15-3-21) и в то же время по другой линии к узлу № 21 (по участкам 15/14-13-6-9-21) это расстояние составляет 5172 м, или в 1,58 раза больше длины другого участка кольца водосети.

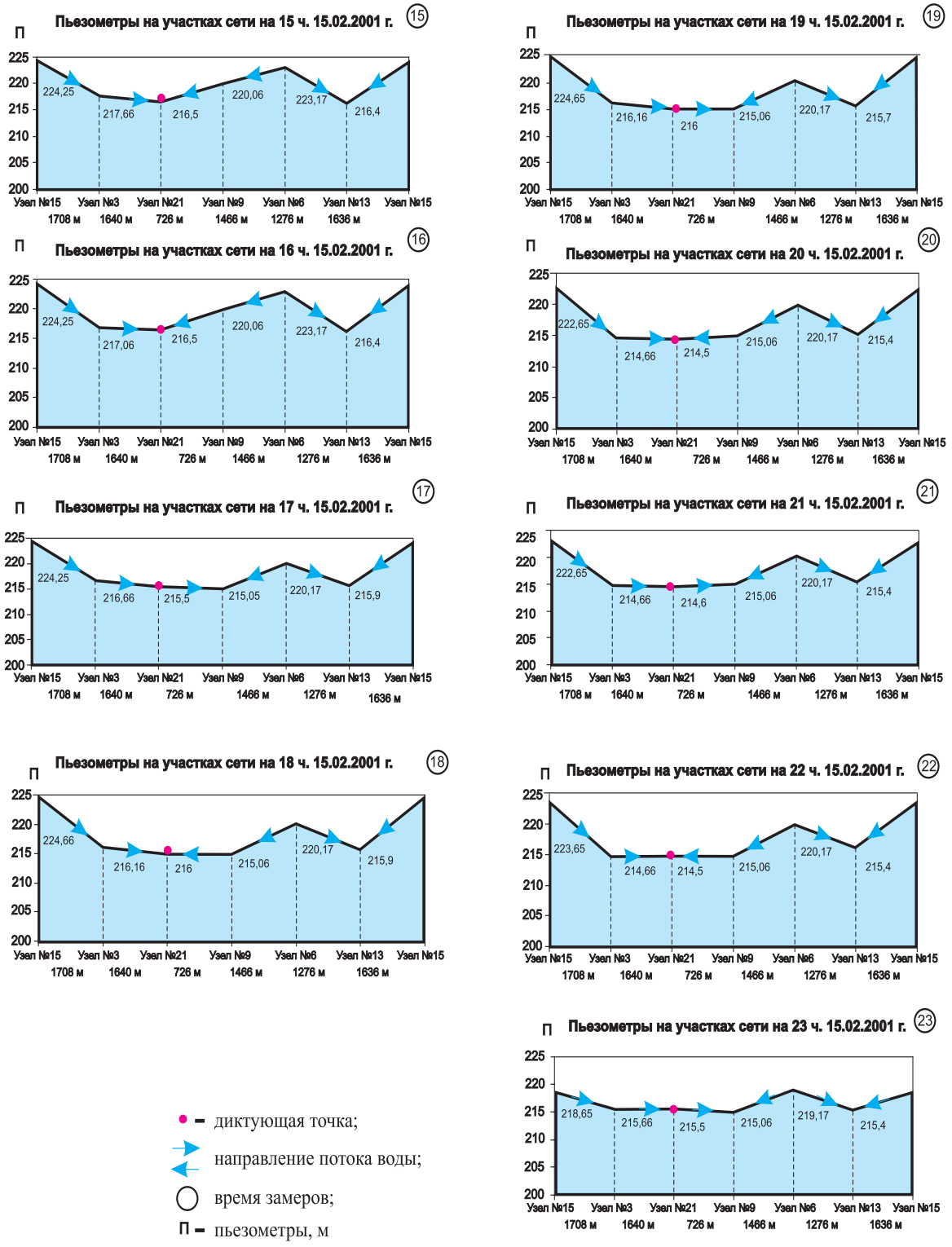
В соответствии с рис. 6.6 объединенная кольцевая водосеть, принимающая воду от узла № 15 и транспортирующая ее в узел № 21 Алексеевского жилого массива (пр. Победы, 76), имеет равные потери напора

$$П_{15} - П_{21} = П_{14/15} - П_{21}, \qquad (6.1)$$

(15-3-21) (14/15-13-6-9-21)

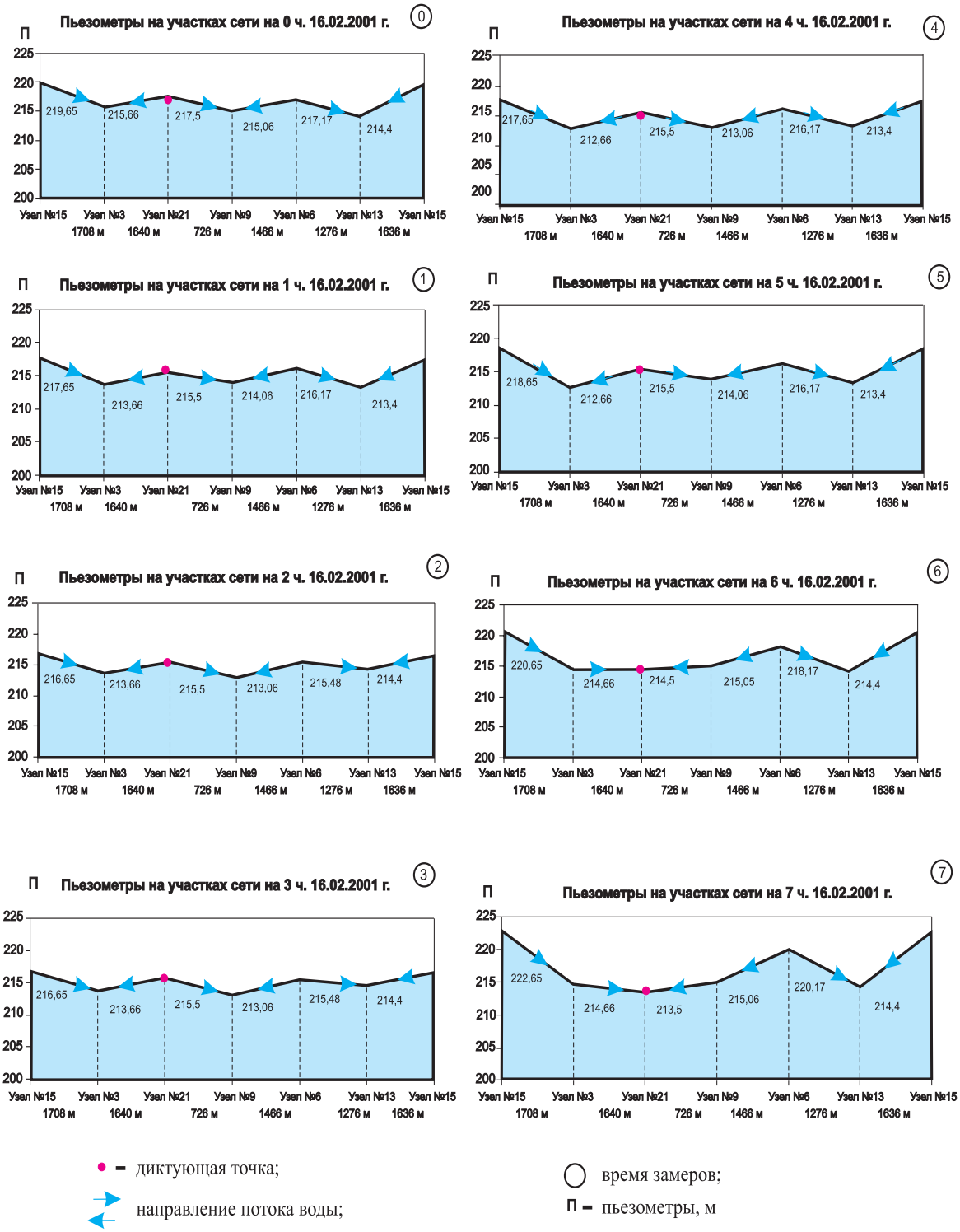
где $П$ — пьезометр, м.

Это иллюстрируется также оценкой потерь напора (табл. 6.3).



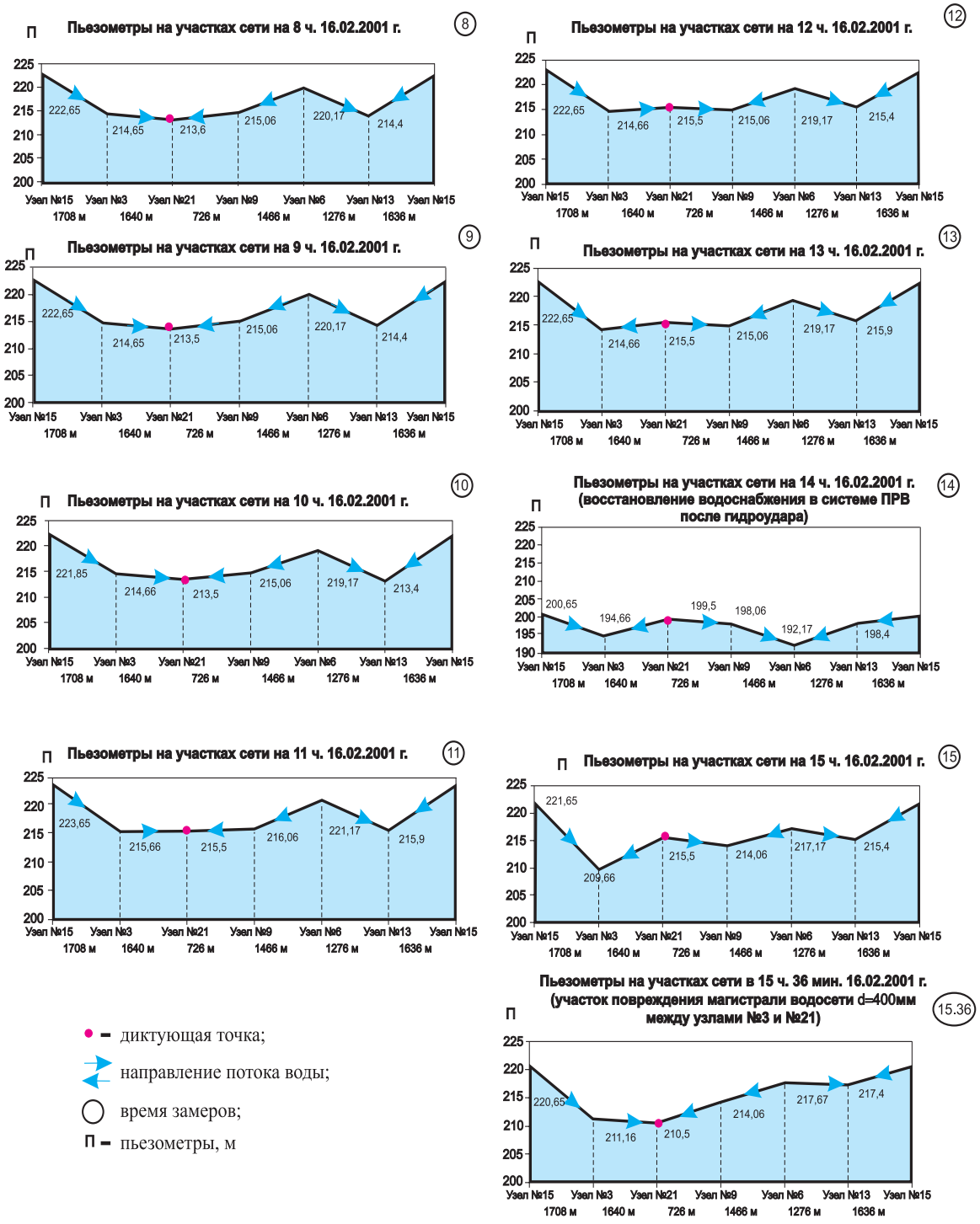

*а*

Рис. 6.11. Пьезометрические исследования действующего внешнего кольца водосети Алексеевского жилого массива.
Время исследования: 15.02.2001 г., 15:00 — 23:00 ч




*б*

Рис. 6.11. Пьезометрические исследования действующего внешнего кольца водосети Алексеевского жилого массива.
Время исследования: 16.02.2001 г., 00:00 — 7:00 ч




*в*

Рис. 6.11. Пьезометрические исследования действующего внешнего кольца водосети Алексеевского жилого массива.
Время исследования: 16.02.2001 г., 8:00 — 15:36 ч

Таблица 6.3

**Пьезометрические напоры и потери напора по времени суток на участке КТ № 21 (диктующая точка) — КТ № 15 (ул. Ахсарова)**

| Время суток, $T$, ч | $О_{дт}$, м | $О_{15Т}$, м | $Р_{дт}$, м | $Р_{15Т}$, м | $П_{дт}$, м | $П_{15Т}$, м | $П_{дт} - П_{15Т}$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15:00 | 175,5 | 144,65 | 44 | 80 | 219,5 | 224,65 | −5,15 |
| 16:00 | 175,5 | 144,65 | 44 | 80 | 219,5 | 224,65 | −5,15 |
| 17:00 | 175,5 | 144,65 | 44 | 80 | 219,5 | 224,65 | −5,15 |
| 18:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 77 | 215,5 | 221,65 | −6,15 |
| 19:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |
| 20:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |
| 21:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |
| 22:00 | 175,5 | 144,65 | 42 | 79 | 217,5 | 223,65 | −6,15 |
| 23:00 | 175,5 | 144,65 | 42 | 76 | 217,5 | 220,65 | −3,15 |
| 0:00 | 175,5 | 144,65 | 42 | 75 | 217,5 | 219,65 | −2,15 |
| 1:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 73 | 215,5 | 217,65 | −2,15 |
| 2:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 73 | 215,5 | 217,65 | −2,15 |
| 3:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 73 | 215,5 | 217,65 | −2,15 |
| 4:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 73 | 215,5 | 217,65 | −2,15 |
| 5:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 73 | 215,5 | 217,65 | −2,15 |
| 6:00 | 175,5 | 144,65 | 39 | 76 | 214,5 | 220,65 | −6,15 |
| 7:00 | 175,5 | 144,65 | 38 | 78 | 213,5 | 222,65 | −9,15 |
| 8:00 | 175,5 | 144,65 | 38 | 78 | 213,5 | 222,65 | −9,15 |
| 9:00 | 175,5 | 144,65 | 38 | 78 | 213,5 | 222,65 | −9,15 |
| 10:00 | 175,5 | 144,65 | 38 | 77 | 213,5 | 221,65 | −8,15 |
| 11:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 79 | 215,5 | 223,65 | −8,15 |
| 12:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |
| 13:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |
| 14:00 | 175,5 | 144,65 | 40 | 78 | 215,5 | 222,65 | −7,15 |

Это значит, что потери напора от узла № 15 до узла № 21, рассчитываемые по формуле Дарси–Вейсбаха

$$H = \lambda \frac{l}{d}\frac{V^2}{2g}, \tag{6.2}$$

по каждому направлению движения по кольцу они должны быть

$$H_{15-21} = H_{14/15-21}; \tag{6.3}$$

$$\lambda \frac{l_{15-21}}{d_{15-21}}\frac{V^2_{15-21}}{2g} = \lambda \frac{l_{14/15-21}}{d_{14/15-21}}\frac{V^2_{14/15-21}}{2g}. \tag{6.4}$$

Однако такой метод расчета действующей сети не корректен, так как в течение суток направление потока в различных вершинах узла по внешнему кольцу изменяется (рис. 6.11). Поэтому расчет должен производиться от узла к узлу по действительным потерям энергии потока воды с учетом реальных условий потокораспределения.

Используя результаты, изложенные в главах 3 и 5, а также измерения разностей пьезометрических напоров на внешнем кольце водосети, можно реально оценить расходы на участках сети (табл. 6.3).

Такой подход был принят в гидравлическом расчете окружной кольцевой водосети при автоматическом управлении системой ПРВ от точки узла № 15.

В табл. 6.4–6.7 приведены исходные данные и расчеты водосети Алексеевского жилмассива (насосная станция (узел № 15) — диктующая точка (узел № 21)) для нескольких наиболее характерных часов в реальном масштабе времени, с реальными номерами в узлах кольцевой сети по методу, изложенному в главе 5.

Таблица 6.4

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива по натурным замерам напоров в узлах водосети № 15 и № 21 (15.02.2001 г., 16:00 ч)**

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м$^3$/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 0 | 144,65 | 1485,03 | 79,6 |
| 2 | 21 | 0 | 175,5 | 157,07 | 41 |
| Суммарное водопотребление | | | | 1642,1 | |

Водопроводная сеть

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Длина участка, $L$, м | Эквивалентный диаметр, $d$, мм | Геодезическая разность между участками $\Delta h$, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Скорость, $V$, м/с | Потери напора, $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 15 | 21 | 5104 | 431 | 30,85 | 33,58 | 0,0639 | 7,75 |
| 4 | 15 | 21 | 3348 | 471 | 30,85 | 123,49 | 0,1969 | 7,75 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0 | 15 | 144,65 | 1642,1 | 79,6 |
| Суммарная подача воды в водопроводную сеть | | | | 1642,1 | |

Таблица 6.5

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива по натурным замерам напоров в узлах водосети № 15–21 (16.02.2001 г., 3:00 ч)**

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м$^3$/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 0 | 144,65 | 850,32 | 72 |
| 2 | 21 | 0 | 175,5 | 4,08 | 40 |
| Суммарное водопотребление | | | | 854,4 | |

Водопроводная сеть

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Длина участка, $L$, м | Эквивалентный диаметр, $d$, мм | Геодезическая разность между участками $\Delta h$, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Скорость, $V$, м/с | Потери напора, $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 15 | 21 | 5104 | 431 | 30,85 | 0,75 | 0,0014 | 1,15 |
| 4 | 15 | 21 | 3348 | 471 | 30,85 | 3,33 | 0,0053 | 1,15 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0 | 15 | 144,65 | 854,4 | 72 |

Суммарная подача воды в водопроводную сеть 854,4

Таблица 6.6

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива по натурным замерам напоров в узлах водосети № 15–21 (16.02.2001 г., 7:00 ч)**

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м$^3$/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 0 | 144,65 | 1793,61 | 78 |
| 2 | 21 | 0 | 175,5 | 204,49 | 38 |

Суммарное водопотребление 1998,1

Водопроводная сеть

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Длина участка, $L$, м | Эквивалентный диаметр, $d$, мм | Геодезическая разность между участками $\Delta h$, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Скорость, $V$, м/с | Потери напора, $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 15 | 21 | 5104 | 431 | 30,85 | 46,03 | 0,0876 | 9,15 |
| 4 | 15 | 21 | 3348 | 471 | 30,85 | 158,46 | 0,2526 | 9,15 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0 | 15 | 144,65 | 1998,1 | 78 |

Суммарная подача воды в водопроводную сеть 1998,1

Таблица 6.7

**Расчет водораспределения в системе ПРВ Алексеевского жилого массива по натурным замерам напоров в узлах водосети № 15–21 (16.02.2001 г., 15:36 ч)**

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Геодезическая отметка верха трубы, м | Узловой расход, $Q$, м$^3$/ч | Фактический напор в узле, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15 | 0 | 144,65 | 2364,64 | 77,5 |
| 2 | 21 | 0 | 175,5 | 290,54 | 35 |
| Суммарное водопотребление | | | | 2655,18 | |

Водопроводная сеть

| Номер расчета | Номер узла — начало участка | Конец участка | Длина участка, $L$, м | Эквивалентный диаметр, $d$, мм | Геодезическая разность между участками $\Delta h$, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Скорость, $V$, м/с | Потери напора, $h$, м |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 3 | 15 | 21 | 3348 | 471 | 30,85 | 219,4 | 0,3498 | 11,65 |
| 4 | 15 | 21 | 5104 | 431 | 30,85 | 71,13 | 0,1354 | 11,65 |

| Источник | | | Геодезическая отметка верха трубы, м | Расход, $q$, м$^3$/ч | Фактический напор, $H$, м |
|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0 | 15 | 144,65 | 2655,18 | 77,5 |
| Суммарная подача воды в водопроводную сеть | | | | 2655,18 | |

Описанные здесь результаты измерений дают основание для формулирования подхода к выбору расположения диктующей точки. Прежде всего строят площадные диаграммы пьезометрии водосети, подобные изображенным на рис. 6.11. Следует иметь в виду, что такие диаграммы необходимо строить для каждого часа в течение суток. На данных диаграммах изображен разворот внешнего кольца водосети с ее узлами в местах подключения внутренних сетей микрорайонов. Кроме того, показаны пьезометрические напоры в каждом узле. Точки пьезометрических напоров соединяют между собой пьезометрическими линиями, которые дают представление о направлении потока воды от узла к узлу. По пьезометрическим линиям выявляют точку с минимальным пьезометрическим напором.

Выбор диктующей точки в действующей системе ПРВ определяется следующими факторами:

1) наиболее неблагоприятной геодезической высотой относительно насосной станции;

2) возможностью обеспечения стабильного минимального напора в любое время суток для бесперебойного снабжения потребителей водой;

3) величиной потерь напора от насосной станции к данной точке по сравнению с другими узлами водосети.

Чтобы сделать ясным выбор диктующей точки, воспользуемся конкретными натурными измерениями, представленными на рис. 6.11. Как видим, в узле № 21 наблюдается как приток, так и отток воды к соседним узлам. Последним двум факторам на приведенных площадных диаграммах соответствуют две точки: узел № 13 и узел № 21. Обе точки характеризуются стабильно высокими потерями напора от насосной станции (узел № 15) в различные часы суток и стабильно низкими пьезометрическими напорами. В узле № 13 в некоторые часы наблюдается незначительное по сравнению с узлом № 21 снижение показаний пьезометра и небольшое превышение потери напора. И все же в качестве диктующей точки в данном случае был выбран узел № 21, поскольку этот узел имеет максимальную геодезическую высоту (175,5 м) по сравнению с другими узлами. Геодезическая высота узла № 13 составляет 159,4 м, что на 16,1 м ниже геодезической отметки узла № 21. Кроме того,

узел № 13 расположен на расстоянии 1636 м от насосной станции, а узел № 21 — на расстоянии 3280 м, т.е. примерно в два раза дальше от водораспределительного узла № 15 (насосной станции). Следовательно, по первым двум критериям узел № 21 более подходит для выбора диктующей точки, чем узел № 13. Заметим, что в узле № 13 происходит постоянный приток воды, а в узле № 21 в течение суток наблюдается приток и отток воды при стабилизации напора. Свободный напор в узле № 13 выше в любое время суток, чем в узле № 21, и достаточен для водоснабжения (даже избыточен) при требуемом напоре для девятиэтажных домов — 40 м.

Таким образом, диктующая точка — это точка на водосети со стабильным минимально допустимым напором, гарантирующая бесперебойное водообеспечение потребителя в любое время суток и отвечающая таким требованиям, как удаленность от насосной станции, максимальная геодезическая высота и стабильно высокие потери напора от насосной станции.

В диктующей точке системы ПРВ должен обеспечиваться стабильный свободный напор (рис. 6.12). В ГИС должна накапливаться статистика режимов работы водосети и системы ПРВ в целом.

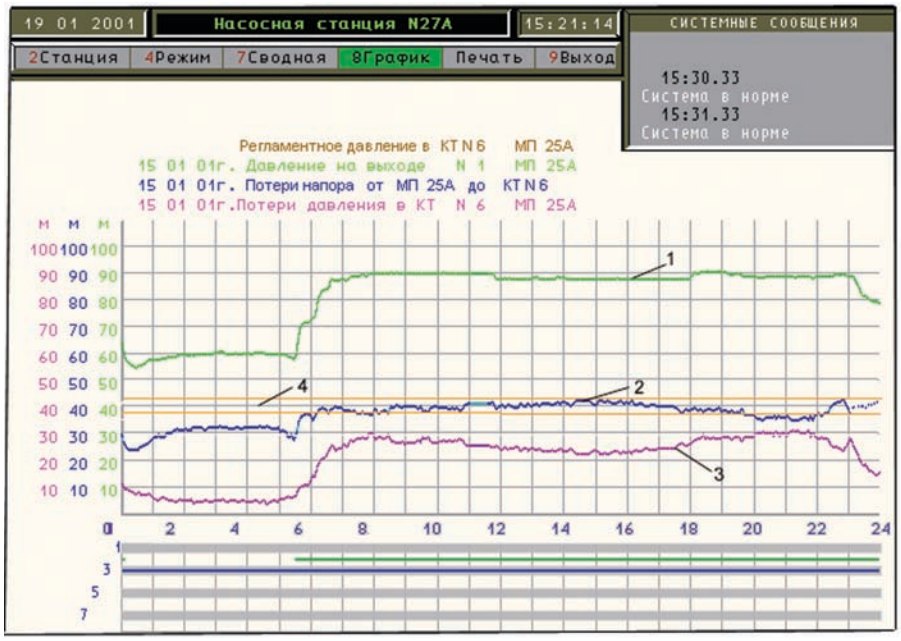



Рис. 6.12. Видеокадр изменения напоров на выходе насосной станции № 25А Харькова и в контрольной точке сети при регулировании по диктующей точке:
*1* — давление на выходе насосной станции; *2* — потери напора от насосной станции до контрольной точки № 6; *3* — потери давления в этой точке за сутки; *4* — регламентное давление в контрольной точке № 6

На рис. 6.12 показано изменение напоров на выходе насосной станции № 25А Харькова и в контролируемой точке сети, работающей в зоне насосной станции, а также изменение потерь напора в этой точке за сутки. Внизу показана почасовая работа насосных агрегатов (№ 2 с 05.30 до 24.00 и № 3 с 00.00 до 24.00). Номера агрегатов указаны на шкале слева. Верхняя шкала — часы суток.

Создание систем управления ПРВ по диктующим точкам способствует переходу водоснабжения в городах на режимы с экономным расходованием ресурсов, которые обеспечиваются АСУ.

Приобретенный опыт разработки и эксплуатации АСУ ТП водоснабжения позволяет рекомендовать создание АСУ ТП водоснабжения в автоматизированном режиме (с участием человека), а по отдельным направлениям — в автоматическом режиме (без участия человека), но с обязательной разработкой элементов двухконтурного контроля управления. В АСУ водоснабжением городов целесообразно принимать диалоговый режим, при котором оперативный персонал участвует в выработке рекомендаций по его эффективному управлению. Структура АСУ водоснабжением Харькова (рис. 6.13) представляет собой

# ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ЛОКАЛЬНЫХ СЕТЕЙ АСУ ВОДОСНАБЖЕНИЯ Г. ХАРЬКОВА

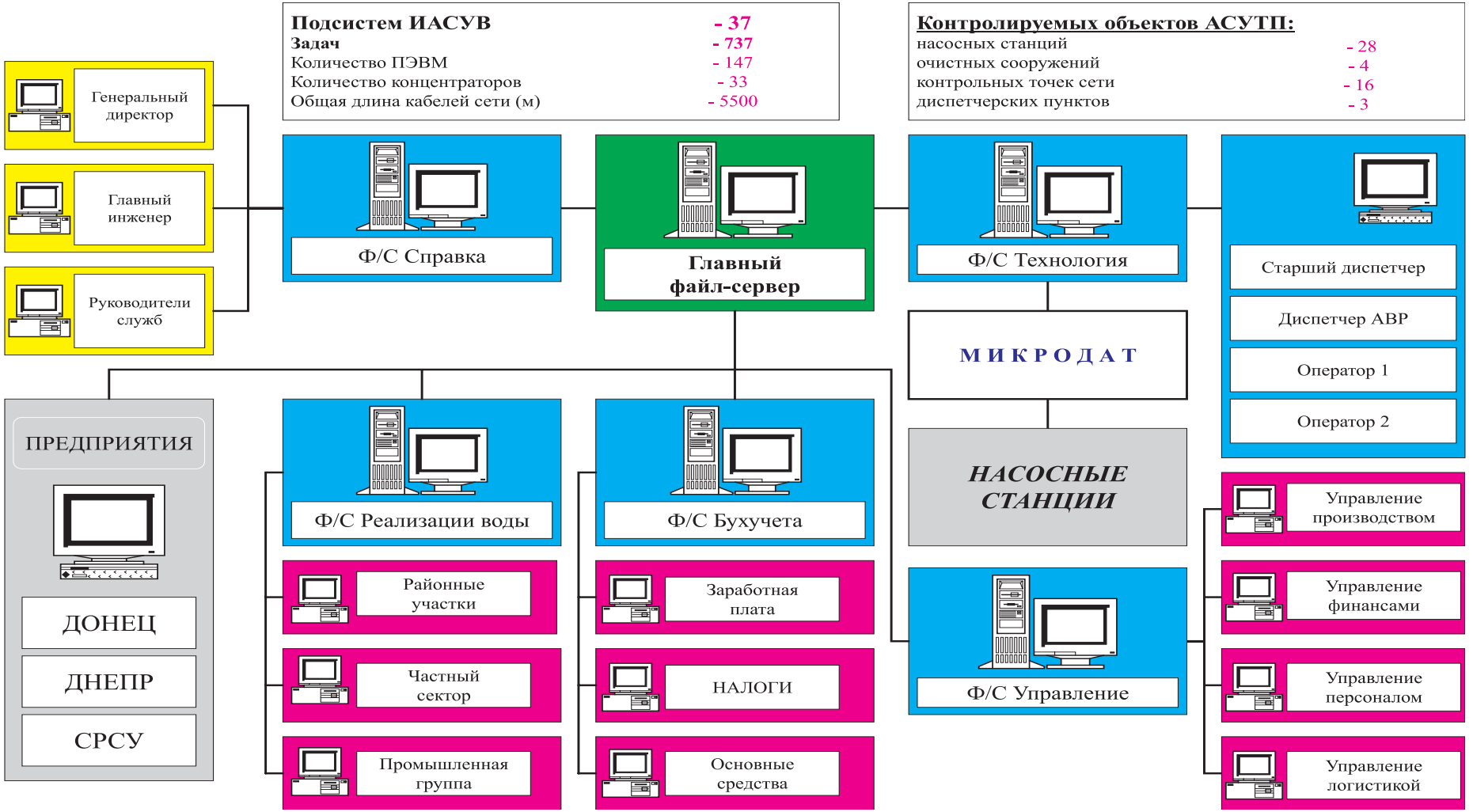



Рис. 6.13. Структура АСУ ТП водоснабжения Харькова

организационно-технологическую систему, которая содержит подсистемы организационно-экономического управления и отдельные АСУ ТП (АСУ ТП подачи и распределения воды в городе, АСУ ТП «Донец» и АСУ ТП «Днепр» — системы автоматизации процессов подъема, очистки и транспортирования воды).

Данная структура является результатом более чем 20-летнего опыта развития первой автоматизированной системы управления водоснабжением крупного мегаполиса и представляет собой интегрированную систему, способную осуществлять эффективный контроль и управление технологическими и организационно-экономическими процессами в КП «ПТП «Вода».

Процесс создания АСУ водоснабжением, как правило, начинается с обследования предприятия и изучения технологии, выбора первоочередных объектов и задач автоматизации, с оценки стоимости всех работ. Учитывая финансовые ограничения, необходим поэтапный принцип создания АСУ, основанный на выборе приоритетных функций системы.

Результаты исследований и опыт создания АСУ ТП водоснабжения Харькова позволяют сделать вывод о том, что подобная АСУ должна выглядеть следующим образом. На объектах устанавливаются микроконтроллеры, с помощью которых в центральный диспетчерский пункт (ЦДП) передается информация о состоянии оборудования и технологических процессов. На ЦДП Харьковского водопровода (рис. 6.14) с помощью ПЭВМ типа IBM PC/AT ведется сбор поступающей со всех объектов информации, отображаемой на экране дисплея, благодаря чему можно увидеть состояние как всей системы, так и ее отдельных объектов.

Основным принципом конструирования управления является принцип диалога «ЭВМ — человек», поэтому за диспетчером оставлено право с помощью ЭВМ включать–выключать насосные агрегаты, изменять число оборотов двигателей для регулирования напоров, открывать–закрывать задвижки и управлять другим технологическим оборудованием. С помощью ПЭВМ осуществляются автоматическое регулирование параметров технологических процессов, распознавание аварийных ситуаций, формирование отчетных документов, передача информации на автоматизированные рабочие места (АРМ) руководителей, технических служб и бухгалтерии предприятия. Отдельные АРМы объединены в локальные вычислительные сети для обмена информацией. Если необходимо подключить к сети удаленные компьютеры, используют телефонные или радиомодемы.

При эксплуатации систем управления обеспечиваются постоянная модернизация телемеханических средств, электрооборудования, замена устаревших контрольно-измерительных приборов (КИП) и датчиков. Все это совершенствует АСУ, но не изменяет сам принцип управления во времени.

В системах АСУ ТП водоснабжения нецелесообразно, чтобы управление каждым объектом осуществлялось диспетчером, так как это задерживает пуск и управление насосными станциями городской системы ПРВ.

Создание модульности систем позволяет децентрализировать управление, регулирование и интегрированный контроль параметров. Применение локальных программируемых комплексов дает возможность обеспечить автономную работу насосных станций и очистных сооружений при сбоях связи с центральным диспетчерским пунктом. Опыт использования радиоканала показывает, что он не уступает линиям городской телефонной сети [207].

Радиоканал может быть организован на диспетчерской частоте предприятия водопровода в диапазоне УКВ или на специально выделенной частоте для передачи данных с использованием радиостанций «Лен», «Муссон», а в будущем более совершенных их аналогов.

Подсистемы организационно-экономического управления реализуются на базе локальных вычислительных сетей ПЭВМ, в которую включены компьютеры АСУ ТП через файл-сервер «Технология». Блок-схема общего алгоритма функционирования АСУ ТП водоснабжения представлена на рис. 6.15.

Централизованный контроль технологических параметров и состояния оборудования позволяет измерять, обрабатывать и накапливать значения параметров (давления, уровня воды в резервуарах, расхода воды на выходе насосных станций, электрических параметров и др.) и сигналы состояния оборудования («включено — отключено», «авария», «открыто — закрыто» по насосным станциям, резервуарам и водопроводным сетям — рис. 6.16, 6.17).



Рис. 6.14. Центральный диспетчерский пункт КП «ПТП «Вода» — главное звено АСУ ТП водоснабжения Харькова




Рис. 6.15. Блок-схема общего алгоритма функционирования АСУ ТП водоснабжения

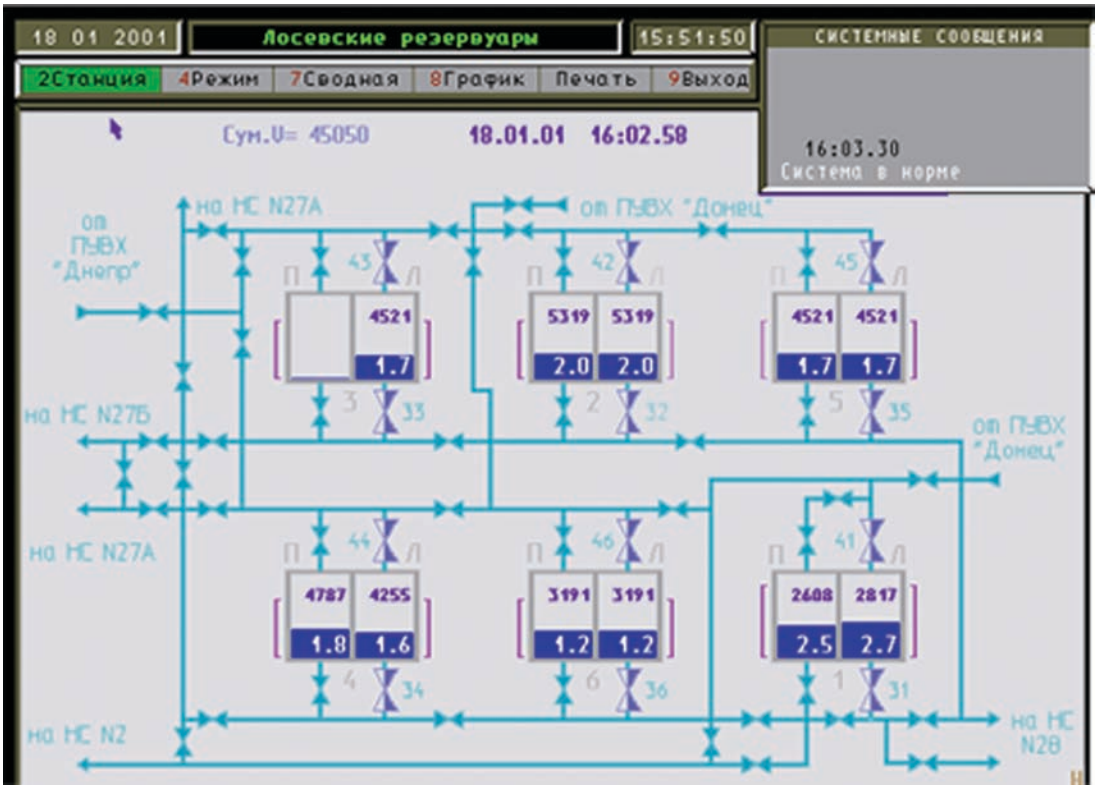



Рис. 6.16. Видеокадр о состоянии городских резервуаров чистой воды «Лосево»

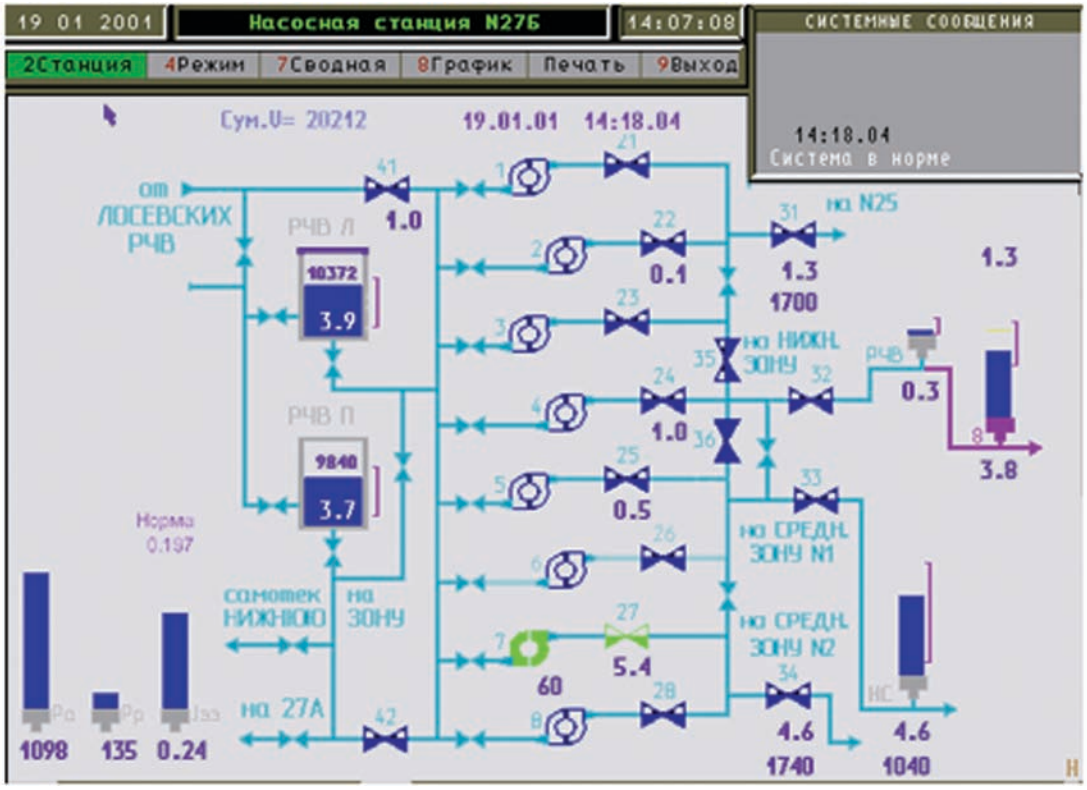



Рис. 6.17. Видеокадр о состоянии насосной станции 27Б Харькова

Как видно из рис. 6.16, на площадке резервуаров чистой воды «Лосево» (Харьков) отображены уровень воды в метрах и объем воды в кубических метрах на текущий момент времени, технологическая обвязка резервуаров.

Для определения запаса (объема) воды в резервуарах потребовалось провести специальную тарировку всех резервуаров, т.е. получить зависимость «уровень–объем» с учетом геометрических размеров, выступов, колонн и т.п. Квадратными скобками обозначены

уставки нижнего и верхнего пределов заполнения резервуаров. Вычислен суммарный запас воды на текущее время, в данном случае — 45 050 м$^3$. Выходные (управляемые) задвижки обозначены двухзначными номерами. Буквенные обозначения П и Л соответствуют правой и левой половинам резервуаров.

На видеокадре (рис. 6.17) показан уровень воды в резервуарах станции в метрах и запас воды в кубических метрах, работающий агрегат (№ 7), ток его статора — 60 А, давление на напорном патрубке 5,4 кгс/см$^2$, выходные давления и давления в контролируемых точках, расход воды на выходе станции. Показаны также значения потребления электрической мощности и удельный расход электроэнергии по сравнению с нормативом (слева). Давление в контролируемых точках (справа) сравнивается с установками регламентных давлений, отмеченных квадратными скобками.

Оперативный учет заключается в накоплении и регистрации с заданной периодичностью параметров технологических процессов и состояния оборудования.

Расчет технико-экономических показателей предусматривает вычисление показателей, характеризующих работу систем водоснабжения и сводные показатели за смену, сутки (рис. 6.18).

Диаграмма удельных (суточных) расходов электроэнергии и суммарных суточных подач воды (рис. 6.18) позволяет анализировать работу насосной станции за продолжительный период, выявлять режимы с повышенным удельным расходом электроэнергии для последующего принятия мер по оптимизации энергопотребления [191].

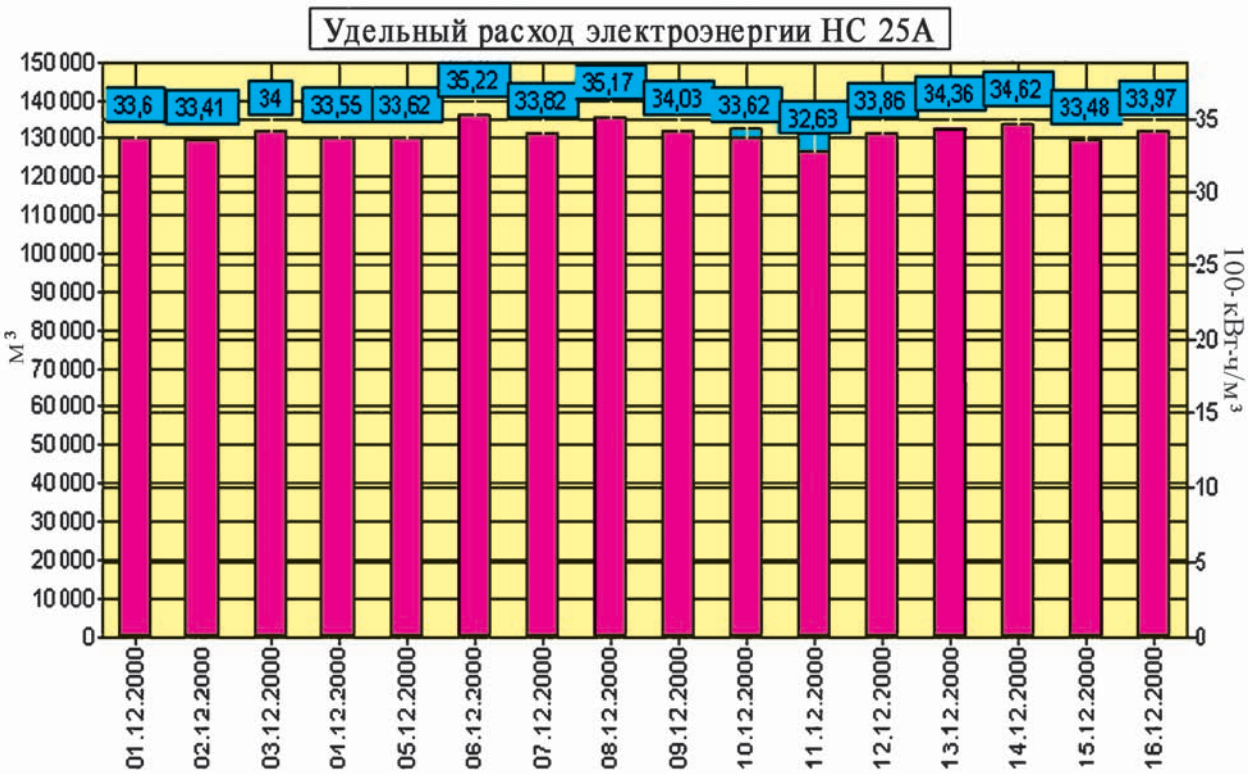



Рис. 6.18. Видеокадр диаграммы удельных расходов электроэнергии по насосной станции за 16 суток декабря 2000 г.

Оперативное планирование хода технологического процесса обеспечивает расчеты рациональных режимов работы насосных станций на предстоящий период.

Диагностика протекания технологических процессов предусматривает выполнение расчетов, связанных с анализом отклонений технологических параметров (давления, расхода и уровня воды, электрических параметров, нагрузки агрегатов) от требуемых значений с тем, чтобы определить необходимость корректировки технологического режима.

Определение рационального режима ведения технологического процесса позволяет скорректировать оперативный плановый режим работы в соответствии с выявившимися отклонениями.

Оперативное управление реализуется на основании информации, полученной в результате осуществления диспетчером описанных функций посредством средств телемеханики. При этом выполняются необходимые операции управления — включение (отключение) насосных агрегатов, регулирование их производительности и т. д. [318].

В управлении системой ПРВ представляет интерес оптимизация режимов работы, которая достигается путем последовательного решения задач оперативного планирования оптимальных режимов работы сооружений, постоянного контроля за ходом технологического процесса, анализа контролируемых показателей, с тем чтобы обнаружить отклонения от требуемых условий эксплуатации и скорректировать режим в случае возникновения отклонений. При этом в информационно-советующих АСУ ТП оперативное управление оборудованием для поддержания оптимального режима производится диспетчером (оператором), а в информационно-управляющих АСУ ТП осуществляется автоматически. Таким образом, оперативное планирование становится необходимой частью системы управления, обеспечивающей информационно-советующие АСУ ТП графиками работы оборудования, а информационно-управляющие АСУ ТП — установками для автоматического регулирования параметров работы насосных станций резервуаров.

Рациональным режимом работы системы ПРВ является режим, при котором снабжение водой потребителей достигается с наименьшими затратами электроэнергии на насосных станциях и потерями воды в водопроводных сетях, а величина КПД насосных станций агрегатов достигает 60–70 %.

Расчеты режимов работы необходимо производить как для нормальных условий эксплуатации систем подачи и распределения воды, так и для аварийных ситуаций, т.е. при отключении поврежденных участков трубопроводов, пожаротушении, аварийной остановке отдельной насосной станции.

## 6.3. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРИЧИН ПОВРЕЖДЕНИЙ В СИСТЕМЕ ПРВ

Важнейшим критерием оптимизации управления системой ПРВ является снижение избыточных напоров в сети. Многочисленные исследования режимов работы систем ПРВ показали, что избыточные напоры в сети вызывают значительные потери воды. Вместе с тем разницу между поданной и реализованной водой в течение месяца или года службы водоснабжения фиксируют как неучтенную воду и как потери при ее распределении.

Потери воды во внешних водопроводных сетях подразделяются на следующие категории:

утечки воды во внутридомовой сети при отсутствии водомеров на вводе в жилые дома;

утечки во всей водопроводной сети;

расход воды на пожаротушение;

опорожнение ремонтных участков сети, наполнение их и промывка;

санитарная обработка после ремонта;

промывка тупиковой сети;

работа приборов учета воды с погрешностями, особенно при минимальных расходах воды;

промывка канализационных сетей;

испытание пожарных гидрантов;

промывка и санитарная обработка водоразборных колонок;

расход воды в сетях для предотвращения замерзания труб при низком уровне водопотребления и недостаточной глубине заложения труб;

опорожнение, санитарная обработка, наполнение для испытания, хлорирование воды, промывка и заполнение резервуаров чистой воды;

уборка тротуаров и улиц;

хищение воды и др.

Изложенное приводит к выводу о необходимости автоматизации процесса распределения воды, основанной на контроле минимума ограничений свободных напоров в диктующих точках. Это приводит к «сглаживанию» динамики режимов и к снижению резких переходов в ПРВ за счет вариации временных шагов [178]. Оптимизация режимов ПРВ сводится к согласованию нескольких критериев оптимизации, таких, как минимум потребления энергетических, водных и других ресурсов, что касается не только экономики, но и экологии.

Рациональное использование воды — основная цель систем водоснабжения. Изначальная оценка состояния системы распределения воды, неучтенных расходов и потерь воды осуществляется по ночному расходу воды в жилых микрорайонах, который фиксируется показаниями расходомеров на насосных станциях (табл. 6.8).

В международной практике принято считать, что если ночной расход воды, транспортируемой по трубам в жилые микрорайоны города, составляет менее 35 % дневного, то водопроводная сеть находится в отличном состоянии, при 35–50 % — в хорошем состоянии [183]. В Харькове этот показатель за период 1998–2000 гг. составляет примерно 48,8 % [184]. Потребление воды на хозяйственно-питьевые нужды населения, как правило, неравномерно и отражает ритм жизнедеятельности города. С другой стороны, условия эксплуатации и требования экономии диктуют, чтобы системы ПРВ и кондиционирования имели равномерный режим работы. Для этого необходимо строительство в городах запасных емкостей и водонапорных башен. Регулирующие емкости должны иметь такой объем, который соответствовал бы как минимум 20 %-ному суточному водопотреблению.

Водозабор промышленных предприятий из системы ПРВ ведет к частичному сглаживанию процесса стохастического водопотребления, что также способствует сокращению потерь и неучтенных расходов воды, уменьшению повреждений в сетевом хозяйстве, продлению работоспособности водораспределительных систем.

Создание водораспределительных систем в городах требует крупных капиталовложений. Для Харькова они составляют более 50 % стоимости основных фондов всей системы водоснабжения. Основной доход водопроводных хозяйств в значительной степени зависит от уровня работы системы водораспределения и снижения потерь и неучтенных расходов воды. Оценка состояния и работы водораспределительной системы включает в себя оценку как гидравлических параметров, так и способности системы уменьшить непроизводительные потери [180].

Надежная статистическая информация об интенсивности отказов в водораспределительной сети, анализ ее параметров, методы и способы интенсификации функционирования водораспределительной сети позволяют выработать новые подходы к сокращению и предотвращению утечек, указывают на потенциальные возможности служб в снижении водопотерь и повышении эксплуатационной надежности водосети (рис. 6.19).

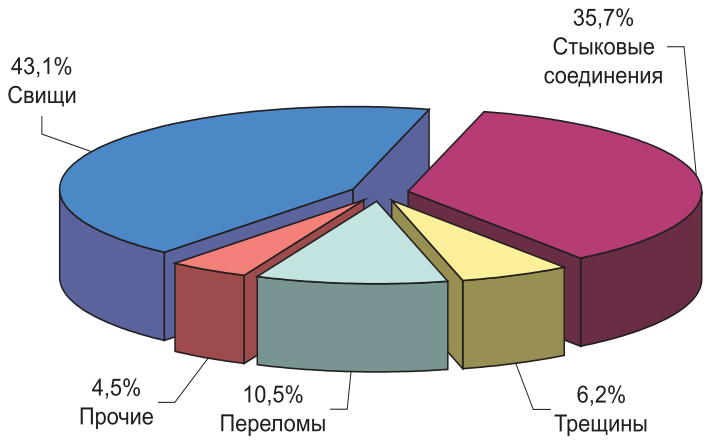



Рис. 6.19. Повреждения на магистралях и вводах в 1984–2000 гг. (всего повреждений 51315)

Таблица 6.8

**Нагрузка городской водосети от насосной станции № 27А на Салтовский жилой массив Харькова, $q_{\text{ноч.ср.}}$ (1– 4 ч) / $q_{\text{дн.ср.}}$ (13 –16 ч)**

| Год | Время суток | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Всего | % |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1998 | Ночь (1–4 ч)<br>День (13–16 ч) | 13 255<br>24 571 | 12 114<br>23 628 | 9 957<br>23 587 | 9 869<br>22 160 | 12 019<br>21 096 | 12 703<br>21 480 | 12 239<br>21 947 | 11 717<br>20 757 | 11 627<br>20 101 | 10 891<br>23 708 | 10 940<br>24 263 | 11 982<br>24 947 | 139 313<br>272 245 | 51,2 |
| 1999 | Ночь (1–4 ч)<br>День (13–16 ч) | 12 798<br>24 153 | 9 781<br>20 085 | 9 779<br>18 973 | 10 268<br>20 732 | 10 137<br>21 154 | 10 048<br>20 917 | 9 827<br>21 621 | 10 450<br>20 115 | 9 417<br>21 480 | 10 898<br>22 561 | 11 128<br>24 699 | 10 917<br>25 891 | 125 448<br>262 381 | 47,8 |
| 2000 | Ночь (1–4 ч)<br>День (13–16 ч) | 11 771<br>25 774 | 9 553<br>24 379 | 8 349<br>20 416 | 9 959<br>23 850 | 9 778<br>23 748 | 9 872<br>19 878 | 8 948<br>15 967 | 9 065<br>19 142 | 10 112<br>20 190 | 10 979<br>18 429 | 11 002<br>20 355 | 10 902<br>21 709 | 120 290<br>253 837 | 47,4 |
| Среднее | | | | | | | | | | | | | | | 48,8 |

На водораспределительные системы в городах оказывают влияние механические нагрузки и циклические изменения температуры воздуха и воды в различные сезоны года.

Этот процесс протекает одновременно с медленным разрушением материала труб под действием химической среды внутри и снаружи труб. Все это приводит к авариям различного характера (рис. 6.20).



Рис. 6.20. Аварии на водопроводной сети

В отличие от магистральных водоводов, где транспортирование воды осуществляется практически в условиях установившегося движения, в системе ПРВ такие условия отсутствуют. Система ПРВ на протяжении суток постоянно работает в переменном режиме как по расходу воды, так и по давлению на сеть (рис. 6.21–6.23).

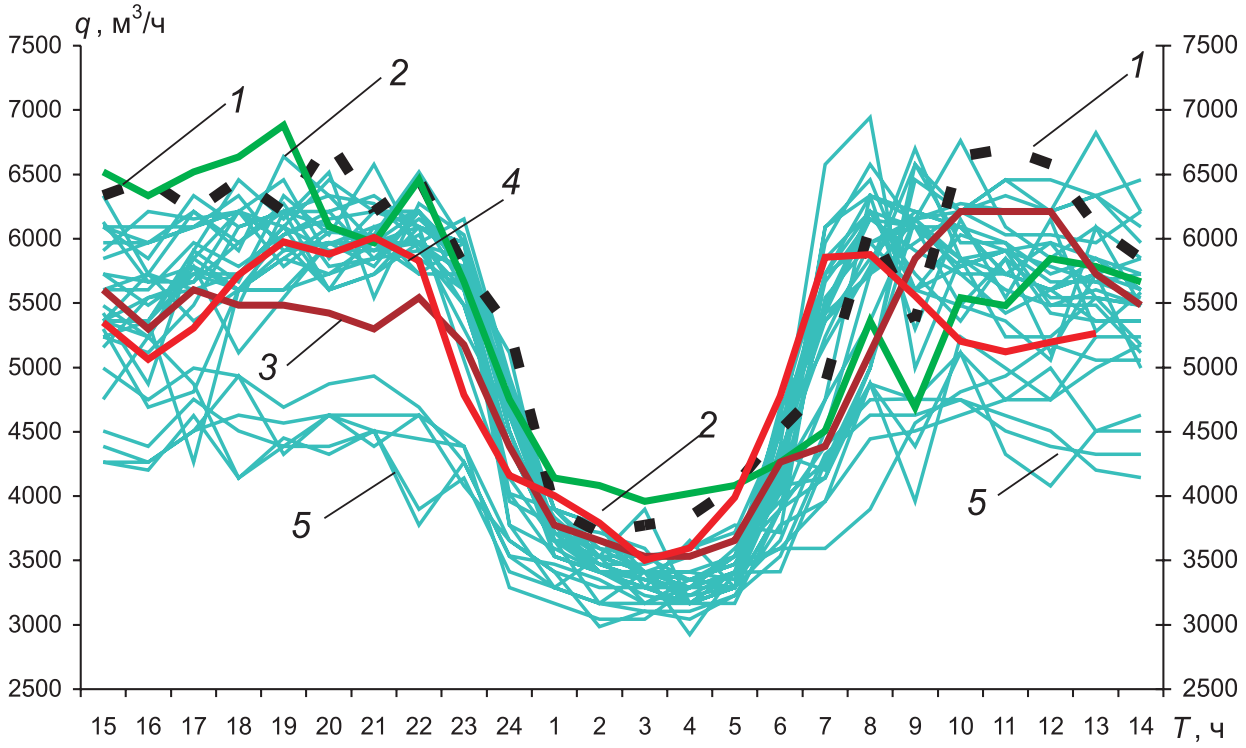



Рис. 6.21. Изменение расхода воды на насосной станции № 25А по часам суток: *1* — 30.12.2000 г.; *2* — 31.12.2000 г.; *3* — 01.01.2001 г.; *4* — опыты (натурные испытания автоматического управления насосной станции по диктующей точке); *5* — ежедневный расход в период 15.01–14.02.2001 г.

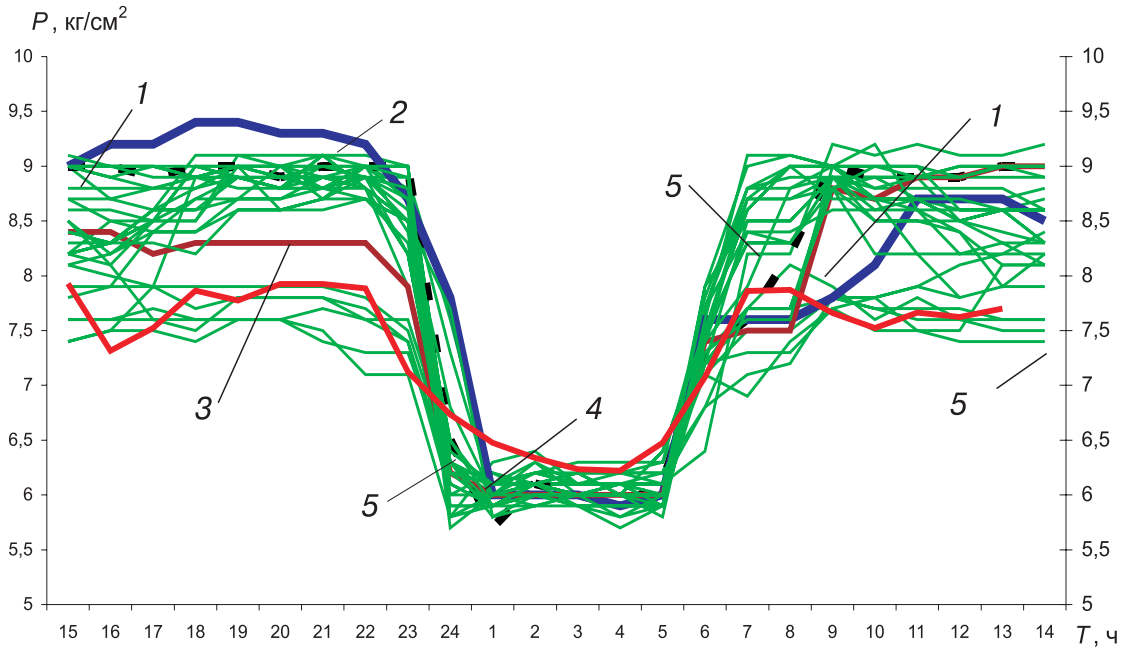



Рис. 6.22. Изменение давления воды на насосной станции № 25А по часам суток: *1* — 30.12.2000 г.; *2* — 31.12.2000 г.; *3* — 01.01.2001 г.; *4* — опыты (натурные испытания автоматического управления насосной станции по диктующей точке); *5* — ежедневное давление в период 15.01–14.02.2001 г.



Рис. 6.23. Насосная станция № 25А, обеспечивающая водой районы Павлова Поля и Алексеевского жилого массива

Водораспределительные сети имеют различный срок эксплуатации, подвергаются внутренней и внешней коррозии, значительная их часть постоянно испытывает физические нагрузки от транспортных средств и т.д. (рис. 6.24).

На трубу в системе ПРВ воздействуют: масса давящей сверху земли, вызывающая напряжение сжатия в трубе; внутреннее рабочее давление воды в трубе; давление, вызванное

пульсацией скорости потока воды при стохастическом водопотреблении; транспортные средства (в зависимости от типа дорожного покрытия и вида транспорта); изменение режима давления на трубу вследствие замерзания воды в порах грунта; подстилающий слой трубы и условия уровня грунтовых вод, смещение грунта; износ трубы (коррозия), внешняя и внутренняя коррозия, электрохимическая реакция трубы с ее окружением («земля — грунтовые воды — труба», «электропотенциал — земля — труба») и биохимическая коррозия; графитизация (выщелачивание железа).

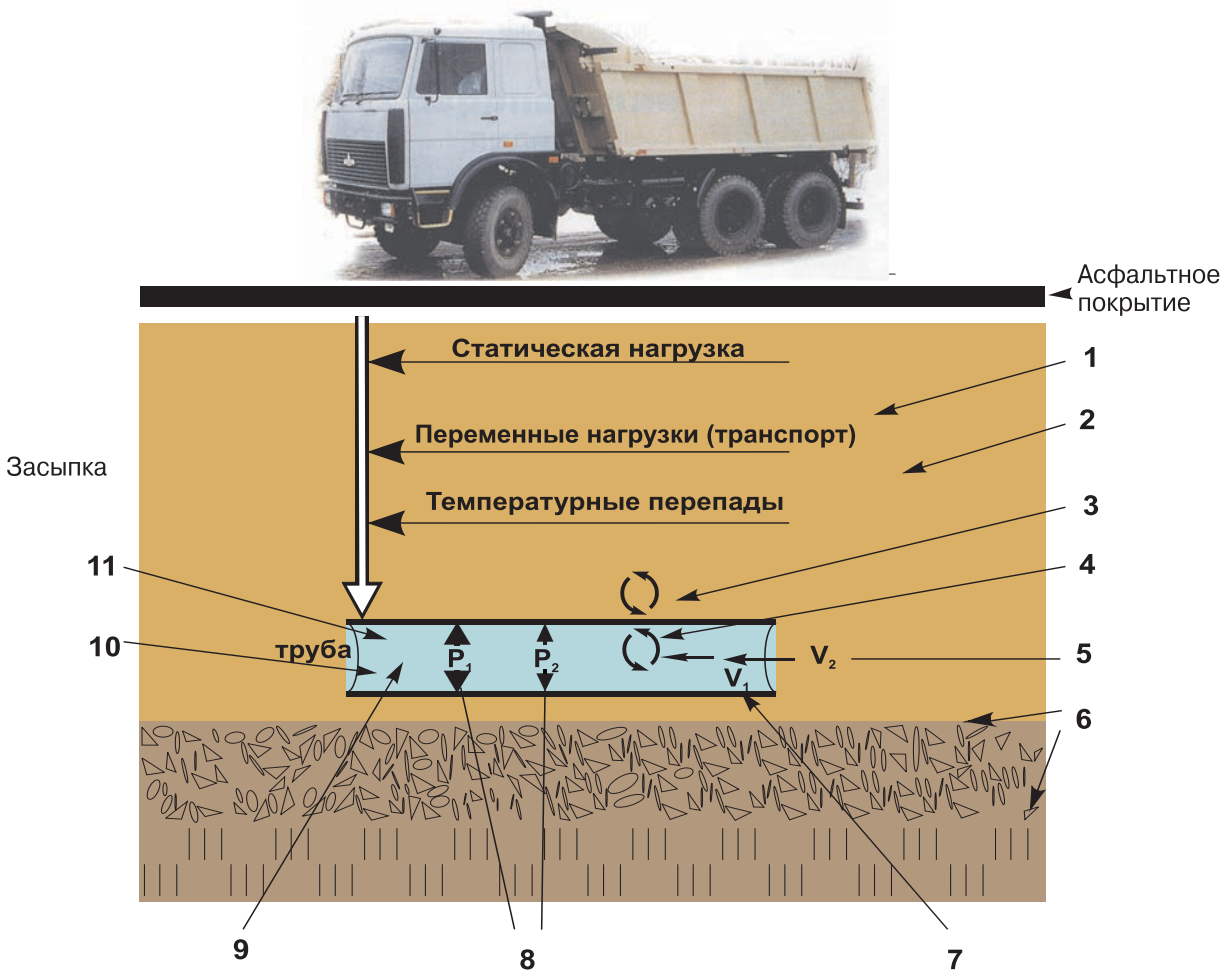



Рис. 6.24. Схема многофакторного влияния на водораспределительную сеть во время ее эксплуатации:
*1* — влажность грунта; *2* — электрические поля (потенциал); *3* — наружная коррозия; *4* — внутренняя биохимическая коррозия; *5* — изменение скорости потока воды; *6* — характеристика грунта; *7* — материал трубы; *8* — изменение внутреннего давления; *9* — температура воды;
*10* – наличие кислорода в воде; *11* — pH воды

В отличие от магистральных водоводов, в трубах водораспределительных сетей городов диаметром 100–300 мм появляются инкрустации, происходит зарастание, несмотря на то что наблюдается процесс выноса в краны водопотребителей незначительной части образовавшейся гелеобразной окиси железа, доля которой, как правило, не превышает требования ГОСТа «Вода питьевая».

Стальные трубы водораспределительной сети с течением времени теряют свой вес вследствие недостаточной устойчивости к коррозии, эрозии и абразивному износу. Практика показывает [187], что если стальные трубы находятся в нормальных условиях, то срок их службы может составить около 40 лет, что гораздо меньше соответствующего показателя для чугунных труб [190].

Это связано как с внутренней коррозией труб, так и с влиянием внешнего окружения. Стальная труба теряет свои механические свойства. В процессе коррозии происходит перенос электронов (от участков, представляющих анодную составляющую, к участку, принимающему электроны, — катоду) и растворение металла (окислители — кислород и ионы водорода).

В кавернах внутренней поверхности стенок стальной трубы развиваются коррозионные процессы и постоянно уменьшается начальная толщина трубы вследствие неустановившегося потока воды, завихрений внутри трубы и ее истончения. Расширяясь, каверна внутри трубы превращается в усеченный конус, у его верхнего основания на плоскости сечения образуется мембрана, которая в результате износа в определенный момент времени не способна выдержать колебания давления в системе ПРВ. Разрыв мембраны приводит к образованию свища на этом участке.

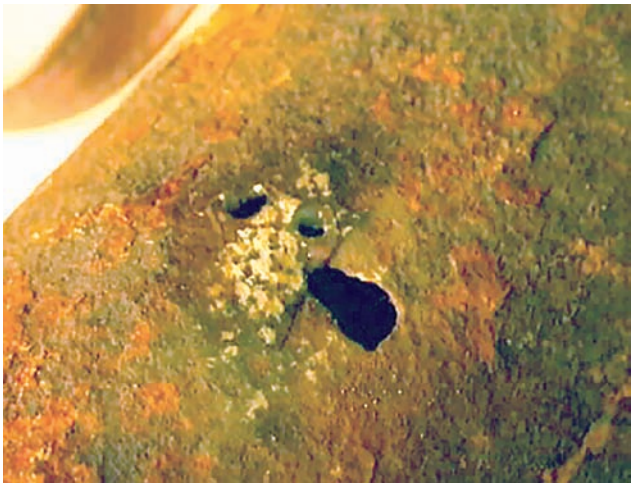


Рис. 6.25. Язвенная коррозия в стальной трубе. Время эксплуатации трубы — 42 года

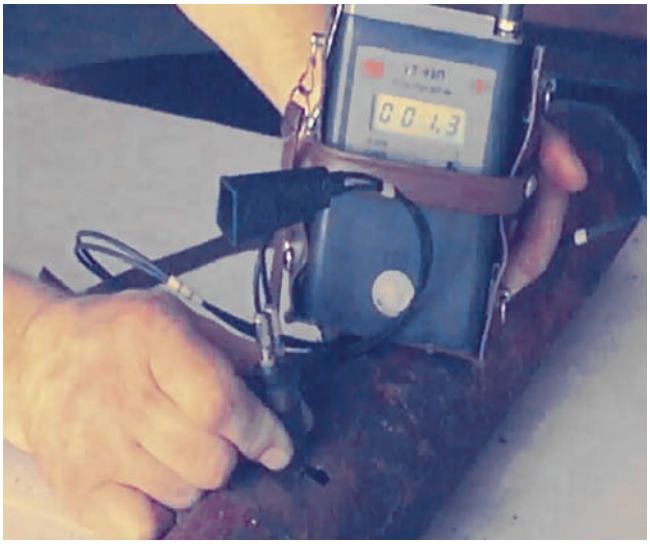


Рис. 6.26. Замеры толщиномером УТ-93П участка трубы, поврежденного язвенной коррозией

Таким образом, в процессе эксплуатации труб, особенно стальных, происходит уменьшение толщины стенок и проявляется так называемая язвенная коррозия (рис. 6.25, 6.26), что вызывается главным образом металлургическими дефектами, неоднородностью состава металла с включением шлака, из-за чего происходит деформация кристаллической решетки. В таких условиях коррозия стальных труб носит неравномерный характер и приводит к язвенной коррозии, повреждению сети в виде свища, а перед его образованием из-за коррозионных процессов толщина трубы уменьшается до мембраны (перепонки) (рис. 6.27).

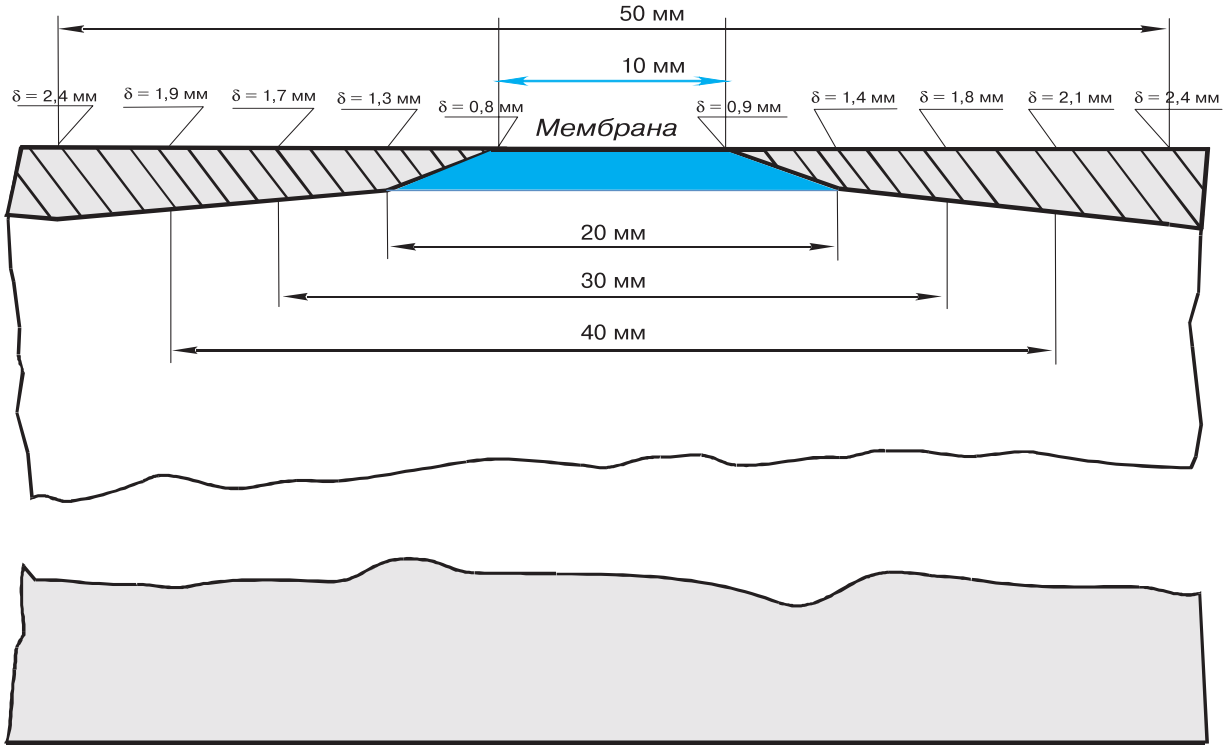



Рис. 6.27. Изменение толщины стальной трубы в процессе эксплуатации и образование мембраны (разрез трубы $d$ = 8,11 см)

Как известно, давление, которое можно допустить внутри трубы, определяется формулой

$$P_н = \frac{\sigma \delta}{\gamma_f r_{вн}}, \qquad (6.5)$$

где σ — допускаемое напряжение, кг/см$^2$;

δ — толщина стенки цилиндра;

$\gamma_f$ — коэффициент надежности;

$r_{вн}$ — внутренний диаметр цилиндра.

Предел упругости $R_y$ для стали Ст-3 (успокоенной) [248] составляет 2 200 кг/см$^2$. С учетом сравнительно невысоких стационарных дополнительных нагрузок и довольно больших нестационарных нагрузок, перечисленных выше, коэффициент надежности $\gamma_f$ примем равным 3 [28, 250]. Учитывая также пульсации давлений, влияющих на мембрану, образованную язвенной коррозией, примем коэффициент условий работы $\gamma_c$ равным 0,7. Тогда допускаемое напряжение будет

$$\sigma = R_y \gamma_c = 2200 \cdot 0,7 = 1540 \text{ кг/см}^2. \qquad (6.6)$$

Рассмотрим далее фрагмент трубы, показанный на рис. 6.25–6.27. Ее внутренний диаметр $d_{вн}$ = 8,11 см, толщина так называемой мембраны составляет 0,08 см. Найдем по формуле (6.5) допускаемые внутренние давления, без учета коррозионных явлений

$$P_н = \frac{1540 \cdot 0,39}{3 \cdot 4,055} = 49,37 \text{ кг/см}^2.$$

Они значительно выше возможных в эксплуатации максимальных давлений. Следовательно, осредненные нормальные напряжения в трубе не представляют опасности для новой трубы.

Вместе с тем следует обратить внимание на то обстоятельство, что толщина стенки трубы за 42 года эксплуатации уменьшилась в месте язвенной коррозии от 0,39 до 0,08 см. Следовательно, средняя скорость внешней и внутренней язвенной коррозии трубы на участке образовавшейся мембраны составила

$$V_{кор} = (3{,}9 - 0{,}8) / 42 = 0{,}0738 \text{ мм} / \text{год}.$$

Химический состав металла исследуемой трубы, которая работала с потенциалом «труба — земля» — 0,38В, виден из табл. 6.9.

Таблица 6.9

**Химический состав металла труб**

| C | Mn | Si | P | S | Ni | Cr | Cu |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,2 | 0,45 | 0,24 | 0,09 | 0,024 | 0,2 | 0,05 | 0,05 |

Сделаем еще одну оценку, основанную на определении максимальных напряжений на мембране. Согласно [28] они определяются формулой

$$\sigma_{max} = 0{,}423\left[E\left(\frac{\gamma_f P_н R}{\delta}\right)^2\right]^{1/3}, \qquad (6.7)$$

где E — модуль упругости;

$R$ — радиус мембраны.

Наши измерения, представленные на рис. 6.23, показывают, что давления могут достигать 9,5 кг/см$^2$. Радиус мембраны — 5 мм. Тогда максимальное напряжение будет

$$\sigma_{max} = 0{,}423\left[2\cdot 10^6\left(\frac{3\cdot 9{,}5\cdot 0{,}5}{0{,}08}\right)^2\right]^{1/3} = 1687 \text{ кг} / \text{см}^2.$$

Оно превышает допускаемое (см. выражение (6.6) и результат вычисления (табл. 6.10, рис. 6.28)).

Таблица 6.10

**Показатели давления в трубе**

| Давление, при котором происходит разрыв мембраны, $P_н$, кг/см$^2$ | Толщина мембраны, $\delta$, см |
|---|---|
| 2,5 | 0,0247 |
| 3,5 | 0,0346 |
| 4,5 | 0,0445 |
| 6,5 | 0,0642 |

Разумеется, такие оценки не могут считаться основанием для нормативов. Их можно признать лишь начальными попытками обосновать подходы к объяснению и предупреждению причин аварий. Несомненно, что в дальнейшем должны быть изучены усталостные разрушения трубопроводов. Наша попытка оценить число допускаемых циклов нестационарных нагружений (на основании имеющихся у нас или опубликованных экспериментальных ма-

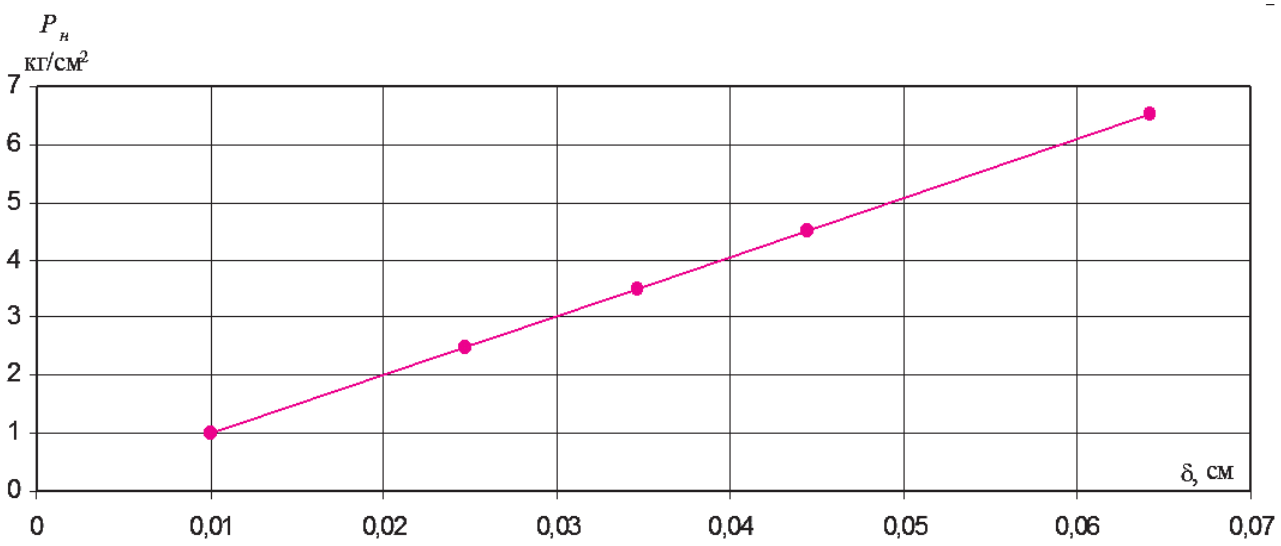



Рис. 6.28. Влияние давления в трубе на разрыв мембраны при различной ее толщине

териалов) окончилась неудачей. Этот вопрос представляется крайне важным, и решение его должно быть предметом специального исследования. Тем не менее установленная автором из опытов величина скорости язвенной коррозии материала стальных труб, составляющая примерно 0,1 мм/год, и возможность оценивать максимальные напряжения по формуле (6.7) представляются имеющими определенное значение.

Опишем материалы, которые, по нашему мнению, должны быть использованы при разработке метода расчета усталостных разрушений трубопроводов.

Как видно из примера (рис. 6.23), в процессе включения и выключения насосов на насосных станциях при почасовом регулировании в системе ПРВ перепад давления не превышает 3,5 кг/см$^2$.

Количество повреждений из-за возникновения свищей в стальных трубах возрастает не только при резких изменениях режимов работы насосных станций (от минимального до максимального водопотребления и от максимального к минимальному (в течение суток), а также на протяжении длительного срока эксплуатации водораспределительной сети), но и от обычных стационарных нагрузок (рис. 6.29, 6.30). Заметим, что режим работы систем водораспределения находится в диапазоне чисел Рейнольдса $70000 \le Re \le 600000$.

Кроме того, произведенные в Харькове измерения свидетельствуют о том, что в водосети среднее значение потенциалов «труба–земля» колеблется в пределах −0,32В÷−0,52В из-за отсутствия в городе комплексной защиты подземных инженерных сетей. До настоящего вре-

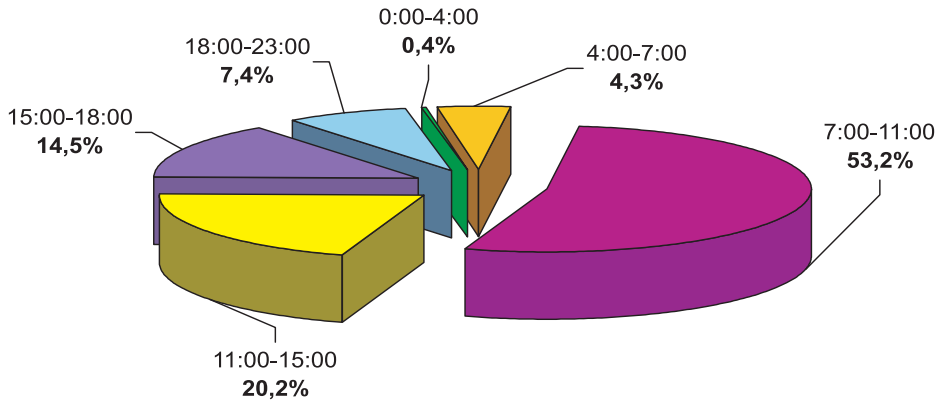



Рис. 6.29. Количество поступившей в диспетчерскую информации о повреждениях в водопроводной сети в течение суток (среднее)

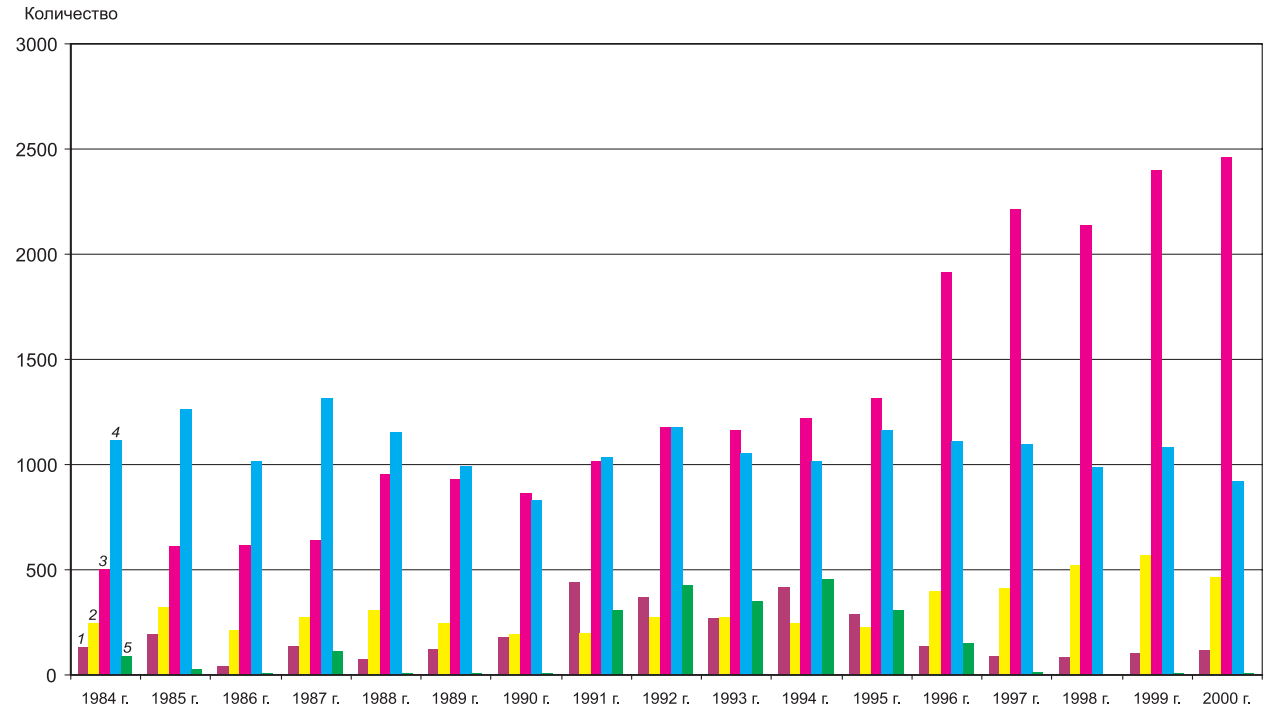



Рис. 6.30. Повреждения на водоводах и в водопроводных сетях Харькова (1984–2000 гг.): *1* — трещины; *2* — переломы; *3* — свищи; *4* — повреждение стыковых соединений; *5* — прочие

мени не достигнут уровень защиты потенциала водосети, предусмотренный ГОСТ 9.602–89 «Общие требования к защите от коррозии», в котором защитный потенциал для стальных труб относительно земли составляет −0,85В÷−1,15В. Вышеизложенное приводит к выводу о том, что вследствие старения инфраструктуры водосети и развития язвенной коррозии стальных труб происходят не только открытые, но и скрытые повреждения труб, которые становятся причиной подтопления городов, ведут к росту потерь воды и неучтенных ее расходов на водопроводах. Эти обстоятельства требуют выявления мест наибольших повреждений и их санации.

## 6.4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОУДАРА В СИСТЕМЕ ПРВ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ПОВРЕЖДЕНИЕ ВОДОСЕТИ

Изменение давления в системе ПРВ при отключении электроэнергии на насосных станциях еще не изучено, в то время как для магистральных водоводов эти работы проводились и продолжают успешно проводиться во всем мире. Предложены и осуществлены различные устройства и технологии (гасители гидроудара, транзитная подача воды в резервуары и т.д.), позволяющие сгладить эффект гидроудара в магистральных водоводах.

В системе ПРВ городов Украины отсутствуют водонапорные башни больших емкостей, способные принимать воду от насосных станций и распределять ее в водопроводную сеть города по горизонтальным и вертикальным зонам водоснабжения.

Трубопроводы системы ПРВ, как правило, имеют большую разветвленную как кольцевую, так и тупиковую сеть различных диаметров. Качество материала труб и их износ различны. Последний определяется главным образом сроком эксплуатации. Как было показано ранее, прочность материала стенок труб различна и постоянно изменяется в процессе эксплуатации труб.

При проектировании систем ПРВ уделяют внимание лишь подбору насосного и другого оборудования и расчету сети для обеспечения суточной потребности воды для хозяйственно-питьевых и промышленных нужд. Анализ состояния сети и ее аварийности при этом не проводится. В условиях отсутствия в больших городах водонапорных башен оценка надежности системы ПРВ, давлений, возникающих при нестационарных процессах, например при отключении электроэнергии на одной или нескольких насосных станциях города, при проектировании систем водоснабжения не делается, нет и рекомендаций службам эксплуатации относительно подобных ситуаций.

Между тем такие оценки необходимы, так как при отключении электроэнергии на насосной станции резкое изменение давления воды создает гидроудар в системе ПРВ и приводит к повреждениям (рис. 6.31).

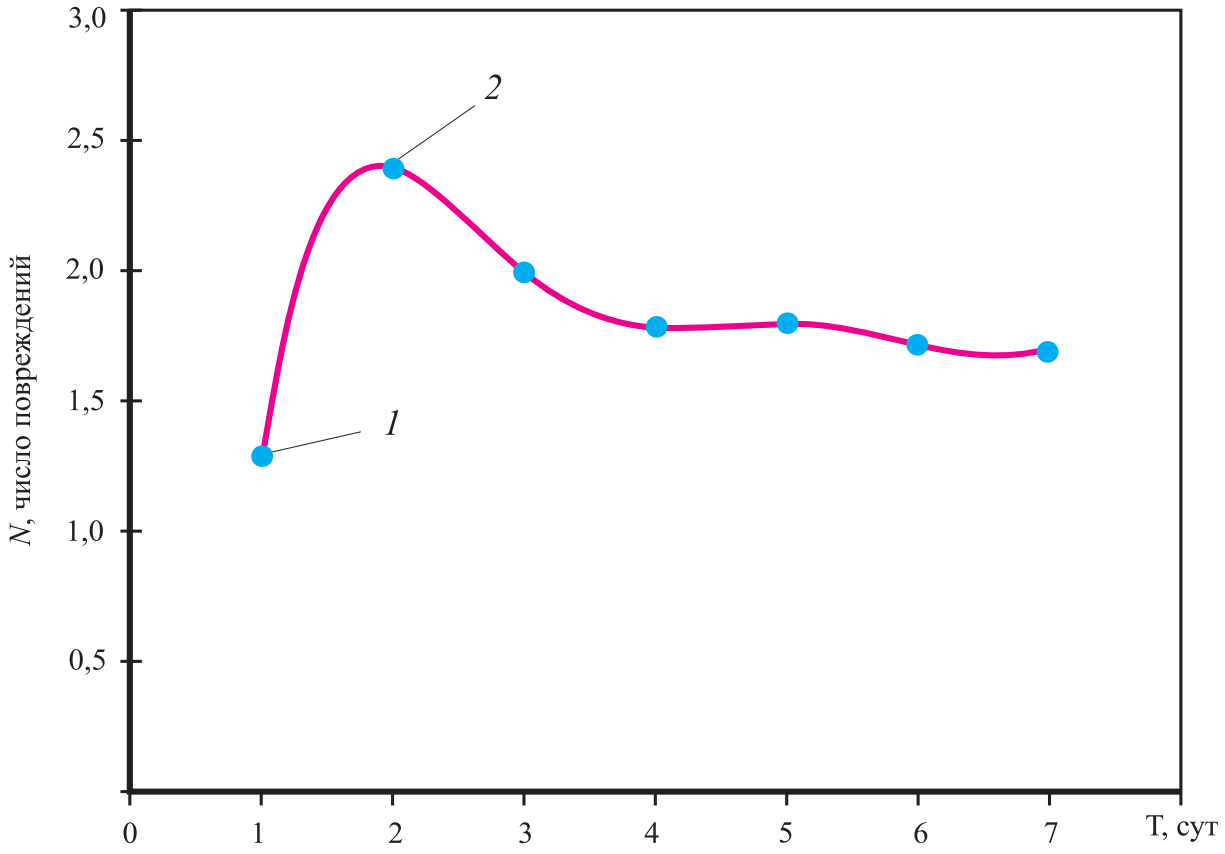



Рис. 6.31. Среднестатистические показатели повреждений в сутки до и после остановки насосных станций после отключения электроснабжения (Харьков): *1* — до отключения электроэнергии; *2* — после отключения

Оценка количества повреждений в водосети после остановки насосных станций при отключении электроэнергии (6.8) позволяет диспетчерской водосети прогнозировать увеличение числа аварийных бригад для ликвидации последствий аварий:

$$N = -6,871 + 15,034T - 9,207T^2 + 2,724T^3 - 0,421T^4 + 0,0326T^5 - 0,00099T^6, \qquad (6.8)$$

где $N$ — количество повреждений;

T — время, сут.

При проведении эксперимента на насосной станции № 25А, подающей ежесуточно 120 тыс. м$^3$ воды в жилые и промышленные микрорайоны города, ставилась задача исследовать переходное состояние возникновения и распространения ударной волны в системе ПРВ.

К настоящему времени учеными проведены исследования гидроудара, рекомендованы методы расчета и подбора обратных клапанов и различных гасителей, предотвращающих повышение давлений на насосных станциях при подаче воды по водоводам [19].

Вместе с тем состояние системы ПРВ при отключении электроэнергии на действующих городских насосных станциях и возникновении гидроудара остается не изученным, в то время как количество повреждений стыковых соединений труб и свищей, образующихся в водораспределительной сети в процессе ее эксплуатации после остановки насосных станций, растет. Выявление закономерностей этих явлений и поведение систем ПРВ при гидроударе, их влияния на образование повреждений имеет большое значение для экономики водопроводного хозяйства.

Автором проведены исследования поведения системы ПРВ при возникновении гидроудара. Измерения параметров потока велись на насосной станции № 25А и на диктующей точке водораспределительной сети, расположенной на расстоянии 3280 п.м. от насосной станции.

В системах ПРВ эксплуатационные скорости потока воды составляют 0,2–1,3 м/с. Проектировщики систем ПРВ из экономических соображений увеличивают скорость движения воды, хотя величина повышения давлений при гидроударе при этом не оценивается.

Величины длительности и повторяемости «пиков» водопотребления, так же как и гидроударов в системе ПРВ, не поддаются корректному теоретическому определению и поэтому должны устанавливаться на основе натурных испытаний. На рис. 6.32–6.34 и в табл. 6.11 представлены опытные данные изменения давления на насосной станции № 25А и в диктующей точке Алексеевского жилого массива при гидроударе, возникшем из-за отключения электроэнергии на насосной станции. Опытные испытания показали, что насосная станция № 25А, расположенная ниже поверхности земли, при повреждении внутрираспределительной сети на насосной станции до обратного клапана может быть затоплена, если вне станции не будут установлены обратные клапаны. Такая установка обратного клапана вне станции позволяет также погасить давление воды перед обратным клапаном, установленным непосредственно на насосной станции.

При исследовании гидроудара на насосной станции и в диктующей точке зависимости напора от времени определяли с помощью регрессионного анализа по программе статистической обработки и анализа данных STATISTICA.

В обоих случаях (рис. 6.35 и 6.36) аппроксимация зависимостей $H_y = f(T)$ аналитическими функциями выполнялась с учетом того, что в исследуемых процессах изменения давления имеют характер затухающих колебаний. Поэтому выражение для функции, описывающей изменение давления с течением времени, представляется в виде ряда Фурье с экспоненциальным множителем, ответственным за затухание колебаний:

$$H_y = f(T) = a_0 + \left[\sum\left(a_i \cos\frac{2\pi T}{T_i} + b_i \sin\frac{2\pi T}{T_i}\right)\right]\exp\left(-cT^n\right), \qquad (6.9)$$

где $T_i$ — период $i$-й гармоники;

$a_0$ — постоянная составляющая ряда (6.9);

$a_i$ и $b_i$ — амплитуды гармоник;

$c$ и $n$ — коэффициенты, определяющие интенсивность затухания колебаний.

Ниже приведены результаты регрессионного анализа.

Представленная на рис. 6.35 зависимость $H_y = f(T)$ аппроксимируется формулой

$$\begin{aligned} H_y = 36,5 + \big[&0,366\sin(2\pi T/11) + 0,653\cos(2\pi T/11) - \\ &- 0,0321\sin(2\pi T/8) - 0,0329\cos(2\pi T/8) + 0,0284\sin(2\pi T/5) - \\ &- 0,0768\cos(2\pi T/5) - 0,0350\sin(2\pi T/4) - \\ &- 0,0241\cos(2\pi T/4)\big] / 0,00486e^{0,315T^{0,94}}, \end{aligned} \qquad (6.10)$$

где $H_y$ — напор, м;

$T$ — время, с.

Коэффициент корреляции этой зависимости $R = 0,990$.

Доверительный интервал $P = 95$ %.

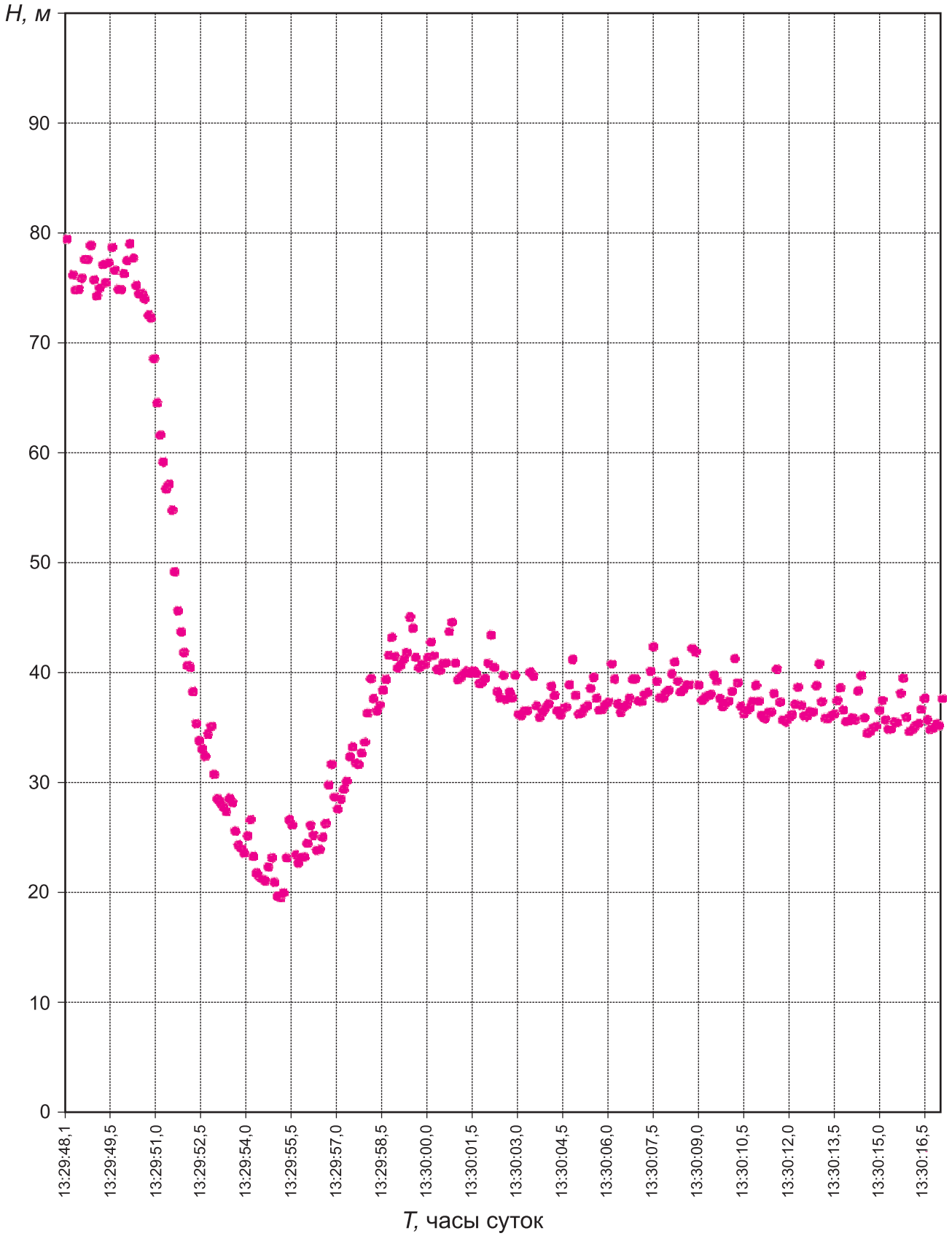



Рис. 6.32. Изменение давления на насосной станции при ее остановке (отключении электроэнергии)

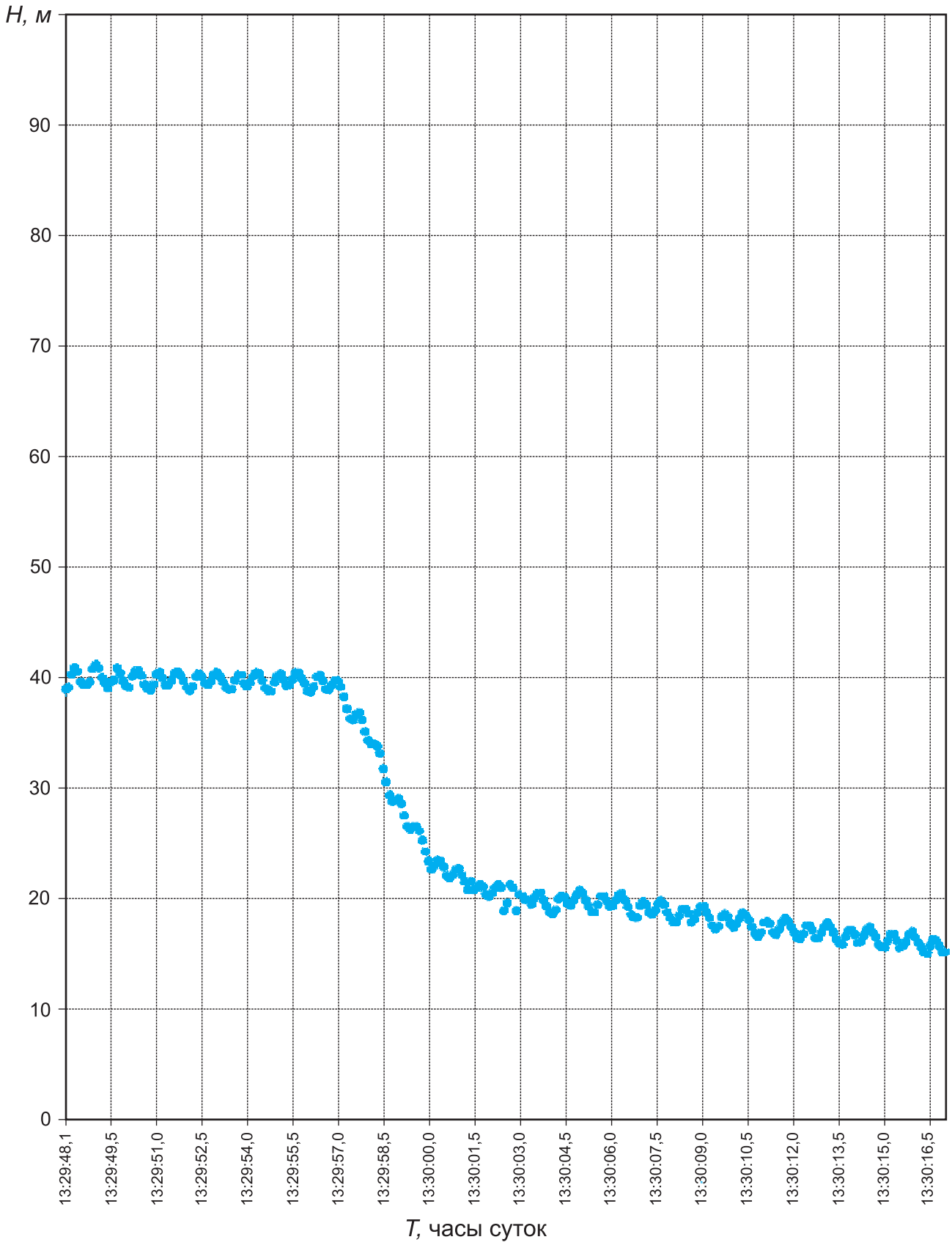



Рис. 6.33. Изменение давления в диктующей точке при остановке насосной станции (отключении электроэнергии)

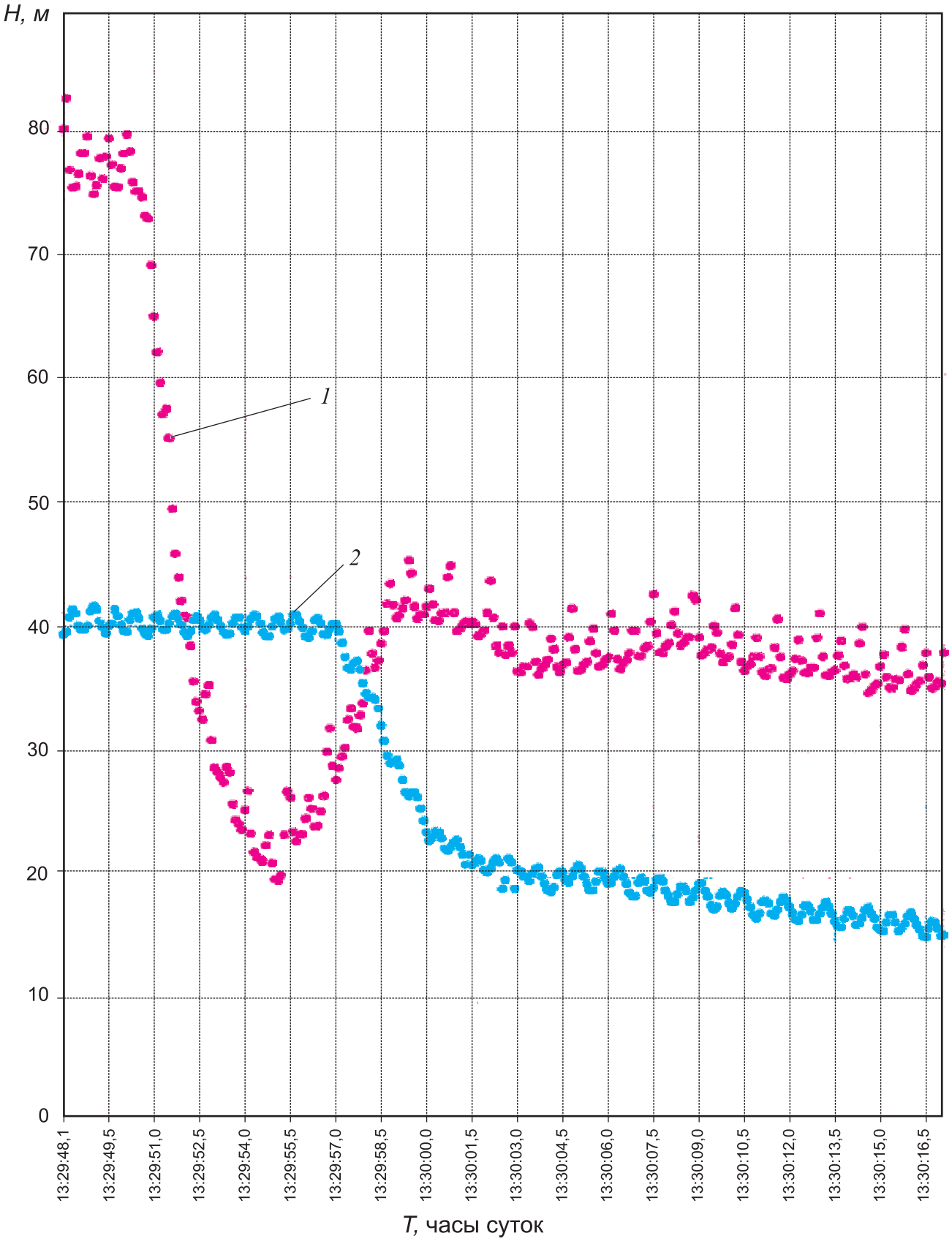



Рис. 6.34. Изменение давления в системе ПРВ
при остановке насосной станции (отключении электроэнергии):
*1* — давление на насосной станции; *2* — давление в диктующей точке

При остановке насосной станции № 25А (рис. 6.35, табл. 6.11) вследствие отключения электроэнергии и последовавшем при этом гидроударе были зафиксированы такие показания манометра:

$T_0 = 0$ с, $H_0 = 82{,}41$ м;
$T_1 = 7{,}5$ с, $H_1 = 18{,}83$ м;
$T_2 = 12$ с, $H_2 = 45{,}47$ м;
$T_3 = 16{,}5$ с, $H_3 = 33{,}78$ м.

За точку отсчета начала записи по оси времени принята точка 13:29:48,1 16.02.2001 г. (время начала гидроудара).

Представленная на рис. 6.36 зависимость $H_y = f(T)$ аппроксимируется формулой

$$H_y = 19{,}2 + [0{,}083\sin(2\pi T / 32) + 0{,}000135\cos(2\pi T / 32) - \\ - 0{,}00767\sin(4\pi T / 20) + 0{,}0215\cos(4\pi T / 20) - \\ - 0{,}003403\sin(6\pi T / 20) - \\ - 0{,}003072\cos(6\pi T / 20)] / 0{,}00091e^{0{,}197T^{0{,}98}}, \qquad (6.11)$$

где $H_y$ — напор, м;
$T$ — время, с.

Коэффициент корреляции $R = 0{,}992$. Доверительный интервал $P = 95$ %.

При остановке насосной станции № 25А (рис. 6.36, табл. 6.11) и последовавшего гидроудара в диктующей точке были зафиксированы такие показания манометра:

$T_0 = 0$ с, $H_0 = 39{,}4$ м;
$T_1 = 7$ с, $H_1 = 41{,}8$ м;
$T_2 = 16$ с, $H_2 = 18{,}3$ м.

За точку отсчета начала записи по оси времени также принята точка 13:29:48,1 16.02.2001 г. (время начала гидроудара). Давление в диктующей точке понизилось через 7 с.

Динамика изменения давления в трубах системы ПРВ на участке от насосной станции до диктующей точки иллюстрируется площадными диаграммами измерений напоров (по секундам; рис. 6.37). Диаграммы свидетельствуют, что при гидроударе в системе ПРВ имеет место демпфирование давления водопотребителем, что, естественно, уменьшает величину гидроудара во времени, так как гашение давления воды в трубах происходит через внутридомовые сети и сантехприборы жилых домов.

Тем не менее приведенные здесь экспериментальные данные и эмпирические формулы могут и должны быть использованы в дальнейшем при разработке методов расчета усталостного разрушения труб.

Таблица 6.11

**Натурные испытания гидроудара на насосной станции № 25А и в диктующей точке КТ-1 Алексеевского жилого массива при отключении электроэнергии (16.02.2001 г., 13:29:48,1)**

| Часы суток | $T$,с | Насосная станция | | | Диктующая точка | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | фактический напор при гидроударе, $H_ф$, м | расчетный напор при гидроударе, $H_р$, м | процент отклонения | фактический напор при гидроударе, $H_ф$, м | расчетный напор при гидроударе, $H_р$, м | процент отклонения |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 13:29:48,5 | 0,5 | 75,15 | 74,15 | 1,33 | 41 | 40,9 | 0,1 |
| 13:29:49,0 | 1,0 | 74,55 | 74,92 | −0,50 | 41,6 | 41,2 | 0,9 |
| 13:29:49,5 | 1,5 | 79,00 | 78,64 | 0,45 | 40 | 41,0 | −2,4 |
| 13:29:50,0 | 2,0 | 77,80 | 79,91 | −2,72 | 39,6 | 40,6 | −2,4 |
| 13:29:50,5 | 2,5 | 74,75 | 75,86 | −1,49 | 40,6 | 40,2 | 0,9 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13:29:51,0 | 3,0 | 64,80 | 66,69 | −2,92 | 40,7 | 40,1 | 1,6 |
| 13:29:51,5 | 3,5 | 55,05 | 54,79 | 0,47 | 40,2 | 40,0 | 0,4 |
| 13:29:52,0 | 4,0 | 40,85 | 43,16 | −5,65 | 39,5 | 40,1 | −1,6 |
| 13:29:52,5 | 4,5 | 33,25 | 33,95 | −2,10 | 40,5 | 40,3 | 0,4 |
| 13:29:53,0 | 5,0 | 28,70 | 27,85 | 2,95 | 40,9 | 40,6 | 0,8 |
| 13:29:53,5 | 5,5 | 28,35 | 24,28 | 14,34 | 39,4 | 40,9 | −3,8 |
| 13:29:54,0 | 6,0 | 25,35 | 22,13 | 12,70 | 39,6 | 41,3 | −4,2 |
| 13:29:54,5 | 6,5 | 21,40 | 20,52 | 4,09 | 40,2 | 41,6 | −3,4 |
| 13:29:55,0 | 7,0 | 19,80 | 19,26 | 2,73 | 40,6 | 41,8 | −2,9 |
| 13:29:55,5 | 7,5 | 26,35 | 18,73 | 28,93 | 40,3 | 41,8 | −3,7 |
| 13:29:56,0 | 8,0 | 24,65 | 19,53 | 20,78 | 39,2 | 41,5 | −5,8 |
| 13:29:56,5 | 8,5 | 25,25 | 22,03 | 12,77 | 40,2 | 40,8 | −1,4 |
| 13:29:57,0 | 9,0 | 27,80 | 26,09 | 6,15 | 40,2 | 39,6 | 1,5 |
| 13:29:57,5 | 9,5 | 33,50 | 31,11 | 7,14 | 36,6 | 38,0 | −3,8 |
| 13:29:58,0 | 10,0 | 36,55 | 36,21 | 0,94 | 34,7 | 35,9 | −3,6 |
| 13:29:58,5 | 10,5 | 38,65 | 40,56 | −4,95 | 32,1 | 33,6 | −4,6 |
| 13:29:59,0 | 11,0 | 40,70 | 43,63 | −7,21 | 29,4 | 31,0 | −5,6 |
| 13:29:59,5 | 11,5 | 44,30 | 45,23 | −2,10 | 26,8 | 28,4 | −6,1 |
| 13:30:00,0 | 12,0 | 41,65 | 45,47 | −9,16 | 23,6 | 26,0 | −10,1 |
| 13:30:00,5 | 12,5 | 41,10 | 44,64 | −8,61 | 23,1 | 23,8 | −2,9 |
| 13:30:01,0 | 13,0 | 39,65 | 43,10 | −8,71 | 23 | 21,9 | 4,7 |
| 13:30:01,5 | 13,5 | 40,20 | 41,19 | −2,47 | 21,2 | 20,5 | 3,5 |
| 13:30:02,0 | 14,0 | 41,15 | 39,19 | 4,76 | 20,4 | 19,4 | 4,8 |
| 13:30:02,5 | 14,5 | 38,00 | 37,32 | 1,79 | 21,2 | 18,8 | 11,5 |
| 13:30:03,0 | 15,0 | 36,50 | 35,76 | 2,02 | 20,6 | 18,4 | 10,6 |
| 13:30:03,5 | 15,5 | 40,00 | 34,64 | 13,41 | 20,3 | 18,3 | 9,9 |
| 13:30:04,0 | 16,0 | 37,45 | 33,98 | 9,26 | 19 | 18,3 | 3,7 |
| 13:30:04,5 | 16,5 | 37,05 | 33,78 | 8,84 | 20,4 | 18,4 | 9,9 |
| 13:30:05,0 | 17,0 | 36,55 | 33,93 | 7,17 | 21 | 18,5 | 12,1 |
| 13:30:05,5 | 17,5 | 39,90 | 34,32 | 13,99 | 19 | 18,5 | 2,7 |
| 13:30:06,0 | 18,0 | 37,65 | 34,83 | 7,50 | 19,5 | 18,5 | 5,3 |
| 13:30:06,5 | 18,5 | 37,15 | 35,36 | 4,81 | 20,1 | 18,4 | 8,6 |
| 13:30:07,0 | 19,0 | 37,75 | 35,87 | 4,99 | 19,6 | 18,2 | 6,9 |
| 13:30:07,5 | 19,5 | 42,65 | 36,31 | 14,87 | 19,2 | 18,1 | 5,8 |
| 13:30:08,0 | 20,0 | 38,75 | 36,68 | 5,35 | 18,5 | 17,9 | 3,2 |
| 13:30:08,5 | 20,5 | 38,80 | 36,96 | 4,74 | 19,3 | 17,8 | 8,0 |
| 13:30:09,0 | 21,0 | 39,20 | 37,15 | 5,23 | 19,5 | 17,6 | 9,5 |
| 13:30:09,5 | 21,5 | 40,15 | 37,23 | 7,28 | 17,5 | 17,6 | −0,3 |
| 13:30:12,0 | 24,0 | 36,30 | 36,58 | −0,77 | 17,7 | 17,7 | 0,0 |
| 13:30:12,5 | 24,5 | 36,45 | 36,47 | −0,05 | 17,8 | 17,8 | 0,0 |
| 13:30:13,0 | 25,0 | 41,20 | 36,41 | 11,64 | 17,2 | 17,9 | −4,2 |
| 13:30:13,5 | 25,5 | 36,65 | 36,39 | 0,72 | 16,6 | 18,1 | −8,7 |
| 13:30:14,0 | 26,0 | 36,00 | 36,39 | −1,09 | 17,4 | 18,2 | −4,5 |
| 13:30:14,5 | 26,5 | 36,30 | 36,41 | −0,29 | 17,5 | 18,3 | −4,7 |
| 13:30:15,0 | 27,0 | 36,95 | 36,42 | 1,43 | 15,9 | 18,5 | −16,1 |
| 13:30:15,5 | 27,5 | 35,95 | 36,43 | −1,35 | 16,5 | 18,6 | −12,6 |
| 13:30:16,0 | 28,0 | 35,05 | 36,44 | −3,97 | 17,3 | 18,7 | −8,0 |
| 13:30:16,5 | 28,5 | 38,05 | 36,45 | 4,20 | 15,3 | 18,8 | −22,8 |
| 13:30:17,0 | 29,0 | 35,60 | 36,46 | −2,42 | 15,4 | 18,9 | −22,5 |
| 13:30:17,5 | 29,5 | 34,80 | 36,47 | −4,80 | 16,5 | 18,9 | −14,7 |

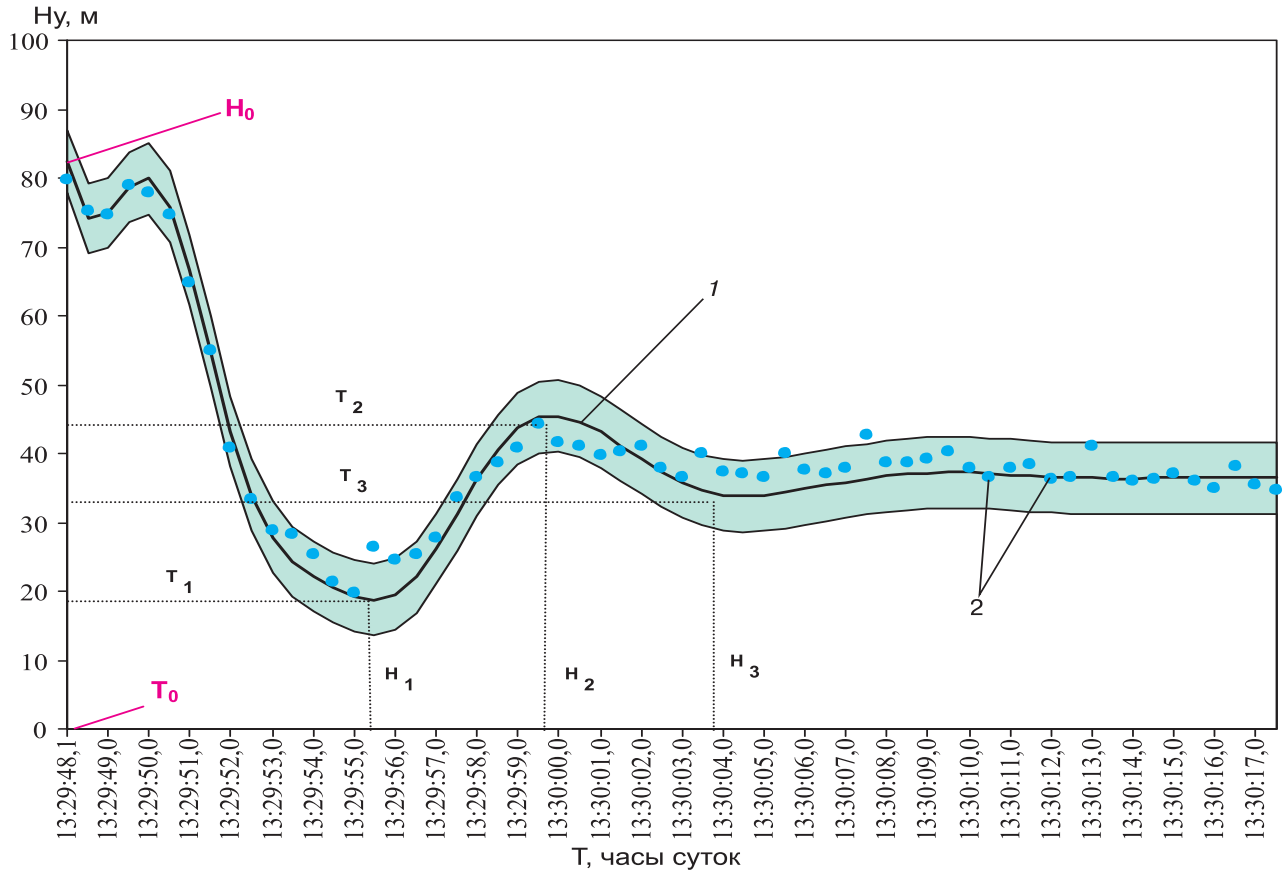



Рис. 6.35. Диаграмма гидравлического удара в насосной станции № 25А, работающей на район Павлова Поля и Алексеевского жилого массива, при отключении электроэнергии на станции:
*1* — расчетное значение $H_р$; *2* — фактическое значение $H_ф$

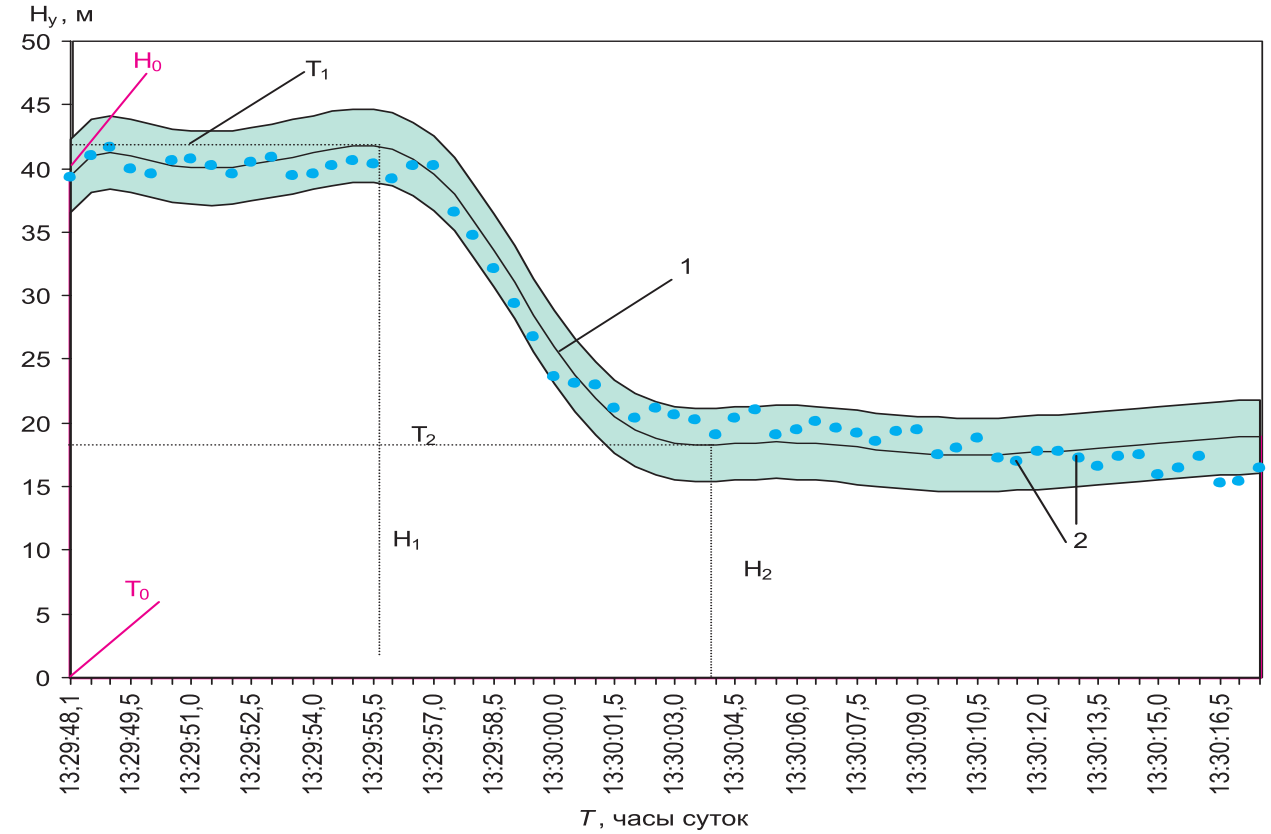



Рис. 6.36. Диаграмма гидравлического удара в диктующей точке Алексеевского жилого массива Харькова при отключении электроэнергии на насосной станции: *1* — расчетное значение $H_р$; *2* — фактическое значение $H_ф$

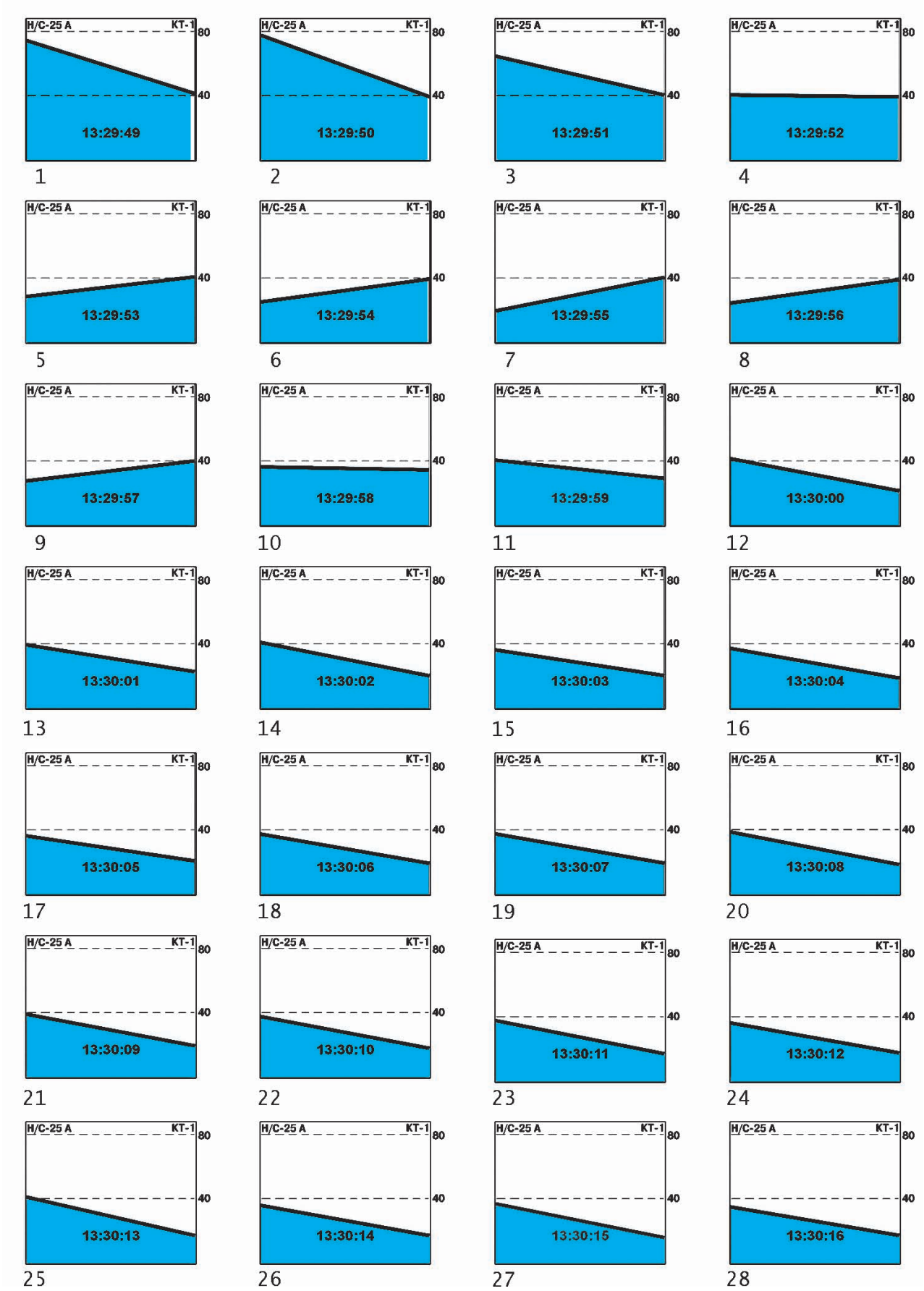



Рис. 6.37. Диаграммы измерений напоров на водосети при отключении насосной станции № 25А от электроэнергии (гидроударе). Диктующая точка — КТ № 1

## 6.5. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ОТКАЗОВ НА ВОДОСЕТИ

Интенсивность отказов в водораспределительной сети увеличивается при колебаниях температур воды и окружающего воздуха. Кроме того, во время морозов создается дополнительное давление на трубопроводы вследствие расширения замерзающей в грунте воды. Комбинированные нагрузки, возникающие при морозах, в значительной степени увеличивают риск эксплуатации трубопроводной сети, элементы которой изготовляются из различных материалов. При замерзании грунта активизируются дефекты, которые образуются летом при интенсификации процессов коррозии. Статистическая обработка интенсивности отказов водосети показывает, что около 50,4 % отказов водосети приходится на последние пять месяцев года, из них первые два месяца связаны с пусконаладочными работами по подготовке к зиме систем отопления и горячего водоснабжения, а последующие месяцы — с периодом наступления холодов.

В табл. 6.12 и 6.13 показаны цикличные изменения температуры воздуха и воды, подаваемой из поверхностного источника, что важно не только для гидравлических, но и для теплотехнических расчетов систем, оценки потребности ресурсов (газа, угля и т. д.), а также для корректировки решений при формировании тарифов на горячее водоснабжение.

Прогноз интенсивности отказа водосети, базирующейся на многолетней статистической обработке данных об интенсивности отказов водосети (табл. 6.14), является основой при выявлении приоритетов для адресной санации или замены участков водосети.

Таблица 6.12

**Данные о средней температуре воздуха за 1980–2000 гг., °С**

| Год | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Средняя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980 | −10,8 | −7,5 | −5,7 | 6,4 | 12,5 | 18,1 | 20,1 | 17,0 | 13,9 | 7,4 | 0,9 | −0,3 | 6,0 |
| 1981 | −2,6 | −2,8 | −0,9 | 5,5 | 14,9 | 22,1 | 22,4 | 20,1 | 14,1 | 9,4 | 1,4 | 0,0 | 8,6 |
| 1982 | −1,4 | −1,1 | −2,0 | 7,3 | 13,7 | 16,5 | 24,5 | 18,8 | 14,8 | 6,8 | 1,6 | 0,7 | 7,5 |
| 1983 | −2,9 | −2,8 | 0,9 | 11,5 | 17,0 | 18,0 | 20,9 | 18,7 | 14,5 | 7,8 | 0,4 | −2,4 | 8,5 |
| 1984 | −2,9 | −9,5 | −0,1 | 9,0 | 18,3 | 18,7 | 19,7 | 18,1 | 15,0 | 8,0 | −0,3 | −8,1 | 7,2 |
| 1985 | −7,2 | −13,4 | −5,5 | 8,1 | 17,3 | 17,6 | 18,6 | 21,8 | 12,7 | 6,9 | −14,9 | −4,9 | 4,8 |
| 1986 | −3,2 | −10,7 | −0,5 | 10,8 | 14,8 | 20,0 | 19,7 | 20,5 | 13,1 | 6,1 | −1,4 | −4,6 | 7,1 |
| 1987 | −15,6 | −6,2 | −8,5 | 2,3 | 15,0 | 18,6 | 20,0 | 16,6 | 12,3 | 5,9 | −0,2 | −4,9 | 4,6 |
| 1988 | −8,2 | −6,6 | 1,5 | 8,0 | 14,6 | 20,9 | 22,3 | 18,9 | 13,9 | 6,6 | −2,8 | −5,3 | 7,0 |
| 1989 | −2,0 | 0,5 | 4,9 | 11,1 | 17,0 | 23,1 | 23,0 | 23,5 | 16,5 | 8,8 | 0,9 | −2,4 | 10,4 |
| 1990 | −2,8 | 0,1 | 4,0 | 10,7 | 13,5 | 16,5 | 20,2 | 18,2 | 13,0 | 7,8 | 4,0 | −1,6 | 8,7 |
| 1991 | −3,4 | −7,9 | −2,1 | 8,9 | 13,7 | 20,7 | 22,0 | 18,9 | 13,8 | 9,9 | 0,7 | −4,4 | 7,7 |
| 1992 | −3,2 | −4,6 | 3,0 | 7,4 | 12,9 | 18,8 | 19,5 | 20,7 | 13,0 | 5,9 | 1,3 | −5,4 | 7,4 |
| 1993 | −3,9 | −3,5 | −1,3 | 7,1 | 15,5 | 16,8 | 19,2 | 18,6 | 10,8 | 6,5 | −7,8 | −2,6 | 6,3 |
| 1994 | −1,0 | −9,1 | −1,1 | 10,0 | 13,5 | 16,6 | 20,5 | 18,8 | 18,1 | 6,7 | −0,5 | −7,9 | 7,2 |
| 1995 | −4,8 | 0,4 | 2,6 | 10,3 | 15,7 | 21,1 | 20,1 | 18,9 | 14,6 | 7,0 | 0,9 | −7,0 | 8,3 |
| 1996 | −11,3 | −8,1 | −5,0 | 7,2 | 18,4 | 18,8 | 26,8 | 19,2 | 14,9 | 6,8 | 4,9 | −5,2 | 7,3 |
| 1997 | −6,4 | −5,2 | 0,9 | 5,1 | 13,8 | 20,7 | 20,8 | 18,8 | 11,2 | 5,7 | 0,4 | −6,7 | 6,6 |
| 1998 | −4,9 | −3,7 | 0,6 | 8,8 | 15,2 | 21,4 | 21,7 | 19,1 | 14,4 | 8,1 | −3,7 | −6,1 | 7,6 |
| 1999 | −1,3 | −4,1 | 2,9 | 10,1 | 13,5 | 23,4 | 25,1 | 21,3 | 15,0 | 6,5 | −2,6 | −0,4 | 9,1 |
| 2000 | −6,7 | −2,8 | 0,5 | 12,8 | 14,3 | 17,9 | 21,1 | 19,6 | 12,4 | 6,4 | −0,3 | −0,5 | 7,9 |
| Итого | −5,1 | −5,6 | −0,5 | 8,5 | 15,0 | 19,3 | 19,2 | 19,3 | 13,9 | 7,2 | −0,8 | −3,8 | 7,2 |

Таблица 6.13

**Данные о средней температуре питьевой воды, °С (источник — река Северский Донец) за 1980–2000 гг.**

| Год | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Средняя |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1980 | 0,8 | 0,7 | 0,8 | 5,4 | 13,3 | 19,9 | 22,0 | 22,0 | 17,0 | 11,0 | 4,5 | 2,6 | 9,9 |
| 1981 | 1,3 | 1,5 | 2,3 | 5,2 | 15,8 | 22,8 | 25,1 | 23,6 | 18,0 | 13,0 | 5,1 | 2,0 | 11,4 |
| 1982 | 1,0 | 0,8 | 1,8 | 7,3 | 14,4 | 19,8 | 22,0 | 22,1 | 19,6 | 11,0 | 5,0 | 2,3 | 10,5 |
| 1983 | 1,2 | 1,4 | 3,0 | 11,3 | 18,2 | 20,9 | 24,6 | 23,6 | 19,3 | 12,6 | 4,8 | 0,5 | 11,8 |
| 1984 | 0,5 | 0,5 | 1,3 | 6,8 | 15,8 | 20,2 | 22,6 | 21,2 | 17,6 | 11,3 | 3,9 | 0,5 | 10,2 |
| 1985 | 0,5 | 1,2 | 1,8 | 7,5 | 15,8 | 19,9 | 21,0 | 22,3 | 16,8 | 10,9 | 4,6 | 1,6 | 10,3 |
| 1986 | 1,7 | 0,8 | 2,6 | 8,8 | 14,7 | 22,0 | 21,8 | 22,5 | 17,1 | 8,9 | 4,0 | 0,8 | 10,4 |
| 1987 | 0,5 | 0,7 | 1,1 | 3,7 | 12,5 | 20,4 | 23,0 | 19,6 | 15,3 | 9,7 | 2,9 | 1,1 | 9,3 |
| 1988 | 1,0 | 1,2 | 2,9 | 8,4 | 14,2 | 20,9 | 24,6 | 22,8 | 17,5 | 10,7 | 2,3 | 0,8 | 9,2 |
| 1989 | 1,6 | 2,6 | 5,4 | 9,8 | 17,1 | 22,1 | 23,3 | 22,7 | 17,5 | 11,1 | 4,7 | 1,3 | 11,5 |
| 1990 | 1,2 | 2,4 | 4,8 | 10,5 | 15,8 | 18,8 | 23,3 | 21,7 | 16,6 | 11,2 | 6,3 | 2,4 | 11,2 |
| 1991 | 1,3 | 1,3 | 2,7 | 7,9 | 14,6 | 22,3 | 25,4 | 22,4 | 16,2 | 13,7 | 4,3 | 1,7 | 10,7 |
| 1992 | 0,7 | 0,7 | 3,5 | 3,0 | 15,0 | 20,8 | 22,2 | 23,2 | 17,0 | 8,8 | 4,2 | 0,9 | 10,5 |
| 1993 | 0,97 | 1,9 | 2,7 | 7,5 | 16,2 | 19,9 | 21,6 | 22,5 | 15,5 | 9,2 | 2,1 | 0,8 | 10,1 |
| 1994 | 2,4 | 1,3 | 2,4 | 8,1 | 14,7 | 18,7 | 23,0 | 22,5 | 19,5 | 12,3 | 3,8 | 0,8 | 10,79 |
| 1995 | 0,9 | 1,6 | 2,5 | 8,6 | 15,9 | 23,2 | 23,7 | 21,6 | 18,2 | 10,5 | 4,5 | 1,1 | 11,03 |
| 1996 | 0,8 | 0,8 | 1,4 | 4,9 | 13,8 | 21,2 | 23,8 | 21,9 | 16,2 | 10,1 | 6,9 | 4,5 | 10,53 |
| 1997 | 1,6 | 2,0 | 2,7 | 4,9 | 12,1 | 18,6 | 21,6 | 20,2 | 14,8 | 9,5 | 4,3 | 1,6 | 9,51 |
| 1998 | 2,0 | 2,6 | 4,1 | 8,3 | 16,45 | 22,6 | 23,47 | 21,92 | 16,1 | 10,89 | 4,81 | 2,22 | 11,35 |
| 1999 | 3,0 | 2,75 | 4,2 | 10,83 | 14,2 | 23,1 | 25,95 | 22,96 | 17,35 | 12,2 | 3,97 | 1,21 | 11,81 |
| 2000 | 1,13 | 2,68 | 3,27 | 11,03 | 16,38 | 21,26 | 23,27 | 23,23 | 17,7 | 11,0 | 3,73 | 2,68 | 11,61 |
| Итого | 1,24 | 1,50 | 2,7 | 7,6 | 15,1 | 20,9 | 23,2 | 22,2 | 17,2 | 10,9 | 4,3 | 1,6 | 10,7 |

Таблица 6.14

**Интенсивность отказов в водораспределительной сети Харькова**

| Год | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Среднее | Всего |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1993 | 258 | 261 | 162 | 222 | 214 | 200 | 256 | 290 | 284 | 293 | 315 | 358 | 393 | 3113 |
| 1994 | 229 | 203 | 183 | 252 | 225 | 270 | 250 | 287 | 366 | 320 | 376 | 387 | 411 | 3348 |
| 1995 | 277 | 230 | 248 | 251 | 249 | 232 | 167 | 355 | 314 | 350 | 310 | 318 | 407 | 3301 |
| 1996 | 240 | 202 | 217 | 232 | 310 | 241 | 379 | 370 | 360 | 411 | 362 | 387 | 439 | 3711 |
| 1997 | 335 | 262 | 250 | 249 | 314 | 292 | 376 | 364 | 403 | 372 | 316 | 289 | 448 | 3822 |
| 1998 | 267 | 200 | 232 | 254 | 244 | 302 | 347 | 372 | 413 | 376 | 372 | 347 | 440 | 3726 |
| 1999 | 289 | 206 | 262 | 294 | 268 | 274 | 335 | 420 | 433 | 482 | 446 | 451 | 474 | 4160 |
| 2000 | 279 | 197 | 212 | 260 | 278 | 359 | 354 | 419 | 412 | 430 | 369 | 403 | 459 | 3972 |
| Среднее | 272 | 220 | 221 | 252 | 263 | 271 | 308 | 360 | 373 | 379 | 358 | 368 | | |

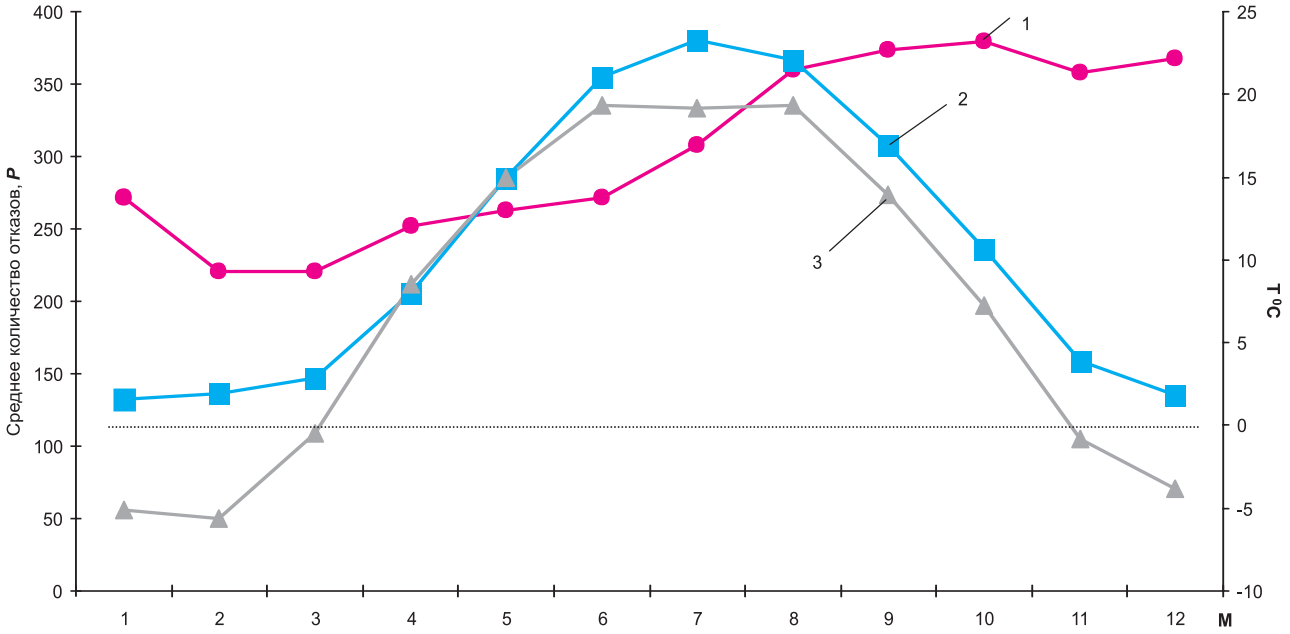



Рис. 6.38. Динамика количества отказов за 1993–2000 гг. (*1*), среднемесячных температур наружного воздуха (*2*) и температуры водопроводной воды (*3*), °С, на протяжении года

Наглядное представление о зависимости числа отказов водораспределительных сетей от температуры воды дает рис. 6.38. Он иллюстрирует возможность аппроксимации этой зависимости рядом Фурье вида

$$P(M) = a_0 + \sum_{i=1}^{n} a_i \sin\left(\frac{\pi}{6} Mi\right) + \sum_{i=1}^{n} b_i \cos\left(\frac{\pi}{6} Mi\right), \qquad (6.12)$$

где $P$ — количество отказов;

$M$ — номер начинающегося месяца в году;

$a_0$ — среднее количество отказов в месяц за год;

$i$ — номер гармоники в ряде Фурье;

$a_j$ и $b_j$ — амплитуды гармоник.

Аппроксимация выполнена с использованием программного пакета STATISTICA. Достаточно точная аппроксимация имела место при ограничении 3-м порядком разложения ($n = 3$). Как показывают результаты аппроксимации (рис. 6.39), минимум на кривой $P$(M) соответствует стабильным значениям температуры воды (февраль — март). Максимум на кривой, описывающей динамику отказов, приходится на август — декабрь, так как в этот период происходит наиболее резкое снижение температуры наружного воздуха и водопроводной воды (см. рис. 6.38).

Конкретный вид зависимости (6.12), полученный методом наименьших квадратов, имеет вид

$$P = 303{,}7 - 74{,}9\sin\left(\frac{\pi}{6}M\right) + 23{,}6\cos\left(\frac{\pi}{6}M\right) - 13{,}3\sin\left(\frac{\pi}{3}M\right) +$$
$$+ 6{,}6\cos\left(\frac{\pi}{3}M\right) + 3{,}4\sin\left(\frac{\pi}{2}M\right) + 18{,}04\cos\left(\frac{\pi}{2}M\right). \qquad (6.13)$$

С использованием этой зависимости были адресно выявлены участки водосети, соответствующие на рис. 6.39 максимальным значениям отказов. На этих участках водосети была проведена замена труб общей протяженностью 5,7 км, что позволило уменьшить число отказов водосети на 188 единиц и сократить неучтенные расходы и утечки в водораспределительной сети Харькова.

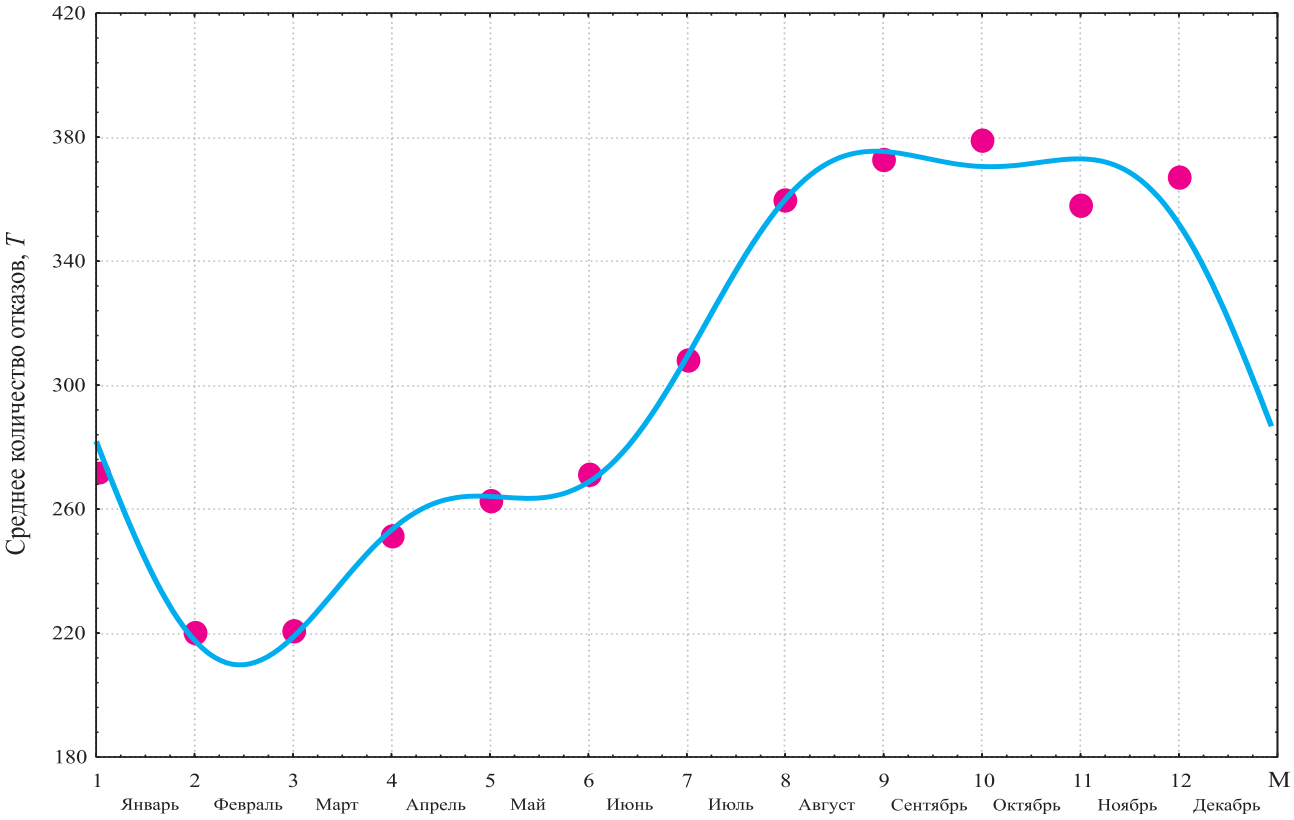



Рис. 6.39. Диаграмма интенсивности отказов в водораспределительной сети Харькова (1993–2000 гг.)

Таблица 6.15

**Сопоставление расчетного (по формуле (6.12)) и фактического значений интенсивности отказов водораспределительной сети Харькова**

| Номер месяца в году, M | Среднее количество отказов за период 1993–2000 гг., $P$ | Прогнозируемое количество отказов, $P_1$ | Процент отклонения расчетного значения от прогнозного |
|---|---|---|---|
| 1 | 272 | 281 | –3,3 |
| 2 | 220 | 217 | 1,6 |
| 3 | 221 | 205 | 7,5 |
| 4 | 252 | 228 | 10,7 |
| 5 | 263 | 238 | 10,2 |
| 6 | 271 | 255 | 6,2 |
| 7 | 308 | 308 | 0,0 |
| 8 | 360 | 359 | 0,2 |
| 9 | 373 | 362 | 3,1 |
| 10 | 379 | 345 | 10,0 |
| 11 | 358 | 347 | 3,2 |
| 12 | 368 | 339 | 8,5 |

В мировой практике, в том числе и в Харькове, ряд сооружений водопровода работает более 50–100 лет. Представление об относительных сроках эксплуатации трубопроводов Харькова дают данные табл. 6.16.

Таблица 6.16

**Продолжительность эксплуатации трубопроводов в Харькове**

| Срок эксплуатации, лет | Протяженность трудопровода | |
|---|---|---|
| | км | процент общей протяженности |
| 0–5 | 46,6 | 2,57 |
| 5–10 | 78,3 | 4,31 |
| 10–20 | 329,9 | 18,17 |
| 20–30 | 442,4 | 24,36 |
| Свыше 30 | 918,9 | 50,6 |
| Всего | 1816,1 | 100 |

На основании проведенных исследований предлагается методика определения интенсивности отказов на водосети, включающая следующие этапы работ:

1. Осуществляется ретроспективная (за срок не менее 8 лет) выборка из базы данных ЭВМ статистики аварий по всей сети города отдельно за каждый месяц года $M$ ($M$ = 1–12).

2. Для каждого месяца вычисляется среднее по рассматриваемому периоду количество аварий $P(M)$.

3. Эмпирическая зависимость $P(M)$ аппроксимируется рядом Фурье с основным периодом $T$ = 12; при аппроксимации ограничиваются первыми тремя гармониками ряда

$$P(M) = a_0 + \sum_{i=1}^{3}\left(a_i \cos\left(\frac{2\pi i}{T}M\right) + b_i \sin\left(\frac{2\pi i}{T}M\right)\right);$$

коэффициенты Фурье вычисляют по приближенным формулам Эйлера–Фурье

$$a_0 = \frac{1}{T}\sum_{M=1}^{12} P(M); \quad a_i = \frac{2}{T}\sum_{M=1}^{12} P(M)\cos\left(\frac{2\pi i}{T}M\right);$$

$$b_i = -\frac{2}{T}\sum_{M=1}^{12} P(M)\sin\left(\frac{2\pi i}{T}M\right)$$

либо определяют с помощью ординарных средств программного пакета STATISTICA или какого-либо аналогичного пакета программ для ПЭВМ, позволяющего производить аппроксимацию рядом Фурье.

4. Полученная формула используется для оценки интенсивности отказов для любого месяца года путем подстановки в формулу номера месяца $M$, после чего планируются организационно-технические мероприятия по сокращению повреждений.

5. Численные значения коэффициентов в ряде Фурье вычисляются по предложенной методике индивидуально для каждого города, исходя из природно-климатических условий и фактического технического состояния водосетей.

## 6.6. МЕТОДИКА АДРЕСНОГО ВЫБОРА ДЛЯ ЗАМЕНЫ ИЛИ САНАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ ИЗНОШЕННЫХ УЧАСТКОВ

В Украине отсутствуют нормативы для проектирования сооружений, предусматривающие продолжительность их работы. Законом Украины «О налогообложении прибыли предприятий» (редакция Закона Украины от 22 мая 1997 г. № 283/97-ВР) предусматри-

ваются (ст. 8 «Амортизация...», п.п. 8.6.1) нормы амортизации для I группы в размере 5 % в год от балансовой стоимости основных фондов. Сооружения, здания, передаточные устройства водоснабжения отнесены к I группе. Таким образом, проектные сроки эксплуатации сооружений должны быть примерно 20 лет. Однако практика показывает, что работающая инфраструктура распределения питьевой воды в зависимости от размеров системы ПРВ и сроков службы (более 30 лет) должна иметь финансовую возможность для реновации (санации или замены) участков водосети, где из-за старения происходят частые аварии. В предыдущем пункте главы было показано на опыте Харькова, как необходимо подходить к оценке частоты отказа действующей водосети, исходя из природно-климатических условий.

Путь к решению этих проблем лежит также в выявлении с помощью АСУ элементов водосети, имеющих наибольшее число отказов. На базе прогнозной оценки интенсивности отказов в водораспределительной сети Харькова для выявления участков водосети, подлежащих санации или замене, выдаются адресные рекомендации. С помощью ЭВМ производится выборка тех участков сетей, которые имеют число повторных отказов от 0 до 5; от 5 до 10; от 15 до 25; от 20 и более в год. После выдачи рекомендации (рис. 6.40) производится оценка финансовых возможностей, определяются порядок финансирования, организация работ и оцениваются возможности сокращения числа отказов водосети. Расчеты показывают, что для резкого сокращения количества отказов в водосети необходимо ежегодно заменять или санировать не менее 2 % общей протяженности водосети.

Таким образом, предлагаемый метод адресного выбора для замены или санации технически изношенных водосетей (реновации) в городах сводится к ускорению воспроизводства и повышению надежности работы системы ПРВ, к снижению протяженности изношенных сетей, сокращению повреждений в водосети города, а следовательно, к сбережению водных, энергетических и других ресурсов. Применение метода адресного выбора для реновации водосети не только сокращает эксплуатационные издержки, но и способствует сохранению дорожных покрытий в городах, снижению процесса подтопления территории. Метод адресного выбора водосетей для реновации предусматривает проведение следующих этапов работы.

1. Осуществляется последовательная выборка из базы данных ЭВМ статистики аварий по участкам водосети (название улицы, длина участка водосети, диаметр и материал трубы), где число неоднократно повторяющихся аварий было наибольшим за последние 10 лет и последний год перед началом выборки.

2. На ЭВМ выполняется ранжировка статистики повреждений по улицам города по принципу: от максимального количества отказов в водосети (по их адресной принадлежности) к минимальному.

3. Проводится технико-экономический расчет, в ходе которого по каждому участку водосети определяют необходимые затраты на реновацию. Готовится регламентное решение об объемах работ и возможности финансирования.

4. На основании принятого регламентного решения составляется алгоритм сортировки на ЭВМ и определяется первая очередь реновации участков водосети на планируемый период. По суммарной протяженности предполагаемой реновации оценивают процент темпов модернизации сети от общей протяженности водосети города.

5. После выбора участков водосети, подлежащих реновации, дополнительно проводят менеджмент и маркетинг предложений фирм и строительных организаций относительно способов, методов, стоимости реновации водосети, их эффективности и долговечности, включая рассмотрение вопроса о применении бестраншейной реновации выбранных участков водосети.

Рис. 6.40. Рекомендации для адресной замены или санации участков водосети

## 6.7. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УТЕЧЕК И ПОТЕРЬ ВОДЫ В ЖИЛОМ ФОНДЕ ГОРОДОВ

Утечки воды через внутридомовые сантехустройства и внутридомовые сети оказывают значительное влияние на увеличение скорости движения воды в наружной водораспределительной сети, из-за чего растут потери напора на них, а значит, и уменьшаются свободные напоры, необходимые для обеспечения водой населения, живущего на верхних этажах жилых домов. Это вынуждает службы водообеспечения переводить режимы работы насосных станций на дополнительное повышение напоров в системе подачи и распределения воды. Такие вынужденные меры позволяют решать проблему подачи воды всем потребителям, но при этом возникают давления в трубах, превышающие проектные, а значит, растут не только непроизводительные потери воды во внутридомовых системах. Непредусмотренное повышение напоров приводит к авариям в водораспределительной сети города. Утечки воды, как во внутридомовых, так и во внешних распределительных сетях, СНиПом не предусмотрены, несмотря на то, что в других нормативных документах указано, что для эксплуатации внутридомовых систем должны быть созданы аварийные службы, в обязанности которых входит обслуживание жилого фонда и проведение ремонтных работ. Рост потребления воды, ограниченность водных ресурсов, необходимость постоянного развития систем водоснабжения требуют пересмотра существующей практики, необходимы более эффективное управление, оценка причин потерь воды во внутридомовой системе жилого фонда городов и поиск методов, направленных на их сокращение, а значит, — поиск потенциальных резервов для водообеспечения населения.

В Харькове были проведены исследования потерь воды в жилом фонде. Обследованы квартиры с централизованным водоснабжением в четырех административных районах, составляющие около 40 % всего жилого фонда города. В них выявлены утечки воды через несовершенные смывные бачки и сантехприборы. Результаты фактических и расчетных данных сведены в таблицу (табл. 6.17).

Получены зависимости $B = f(A)$; $C = f(A)$, где $A$ — количество обследованных квартир с централизованным водоснабжением; $B$ — количество квартир с утечками воды в сантехприборах; $C$ — количество квартир с утечками воды через смывные бачки (рис. 6.41 и 6.42).

Таблица 6.17

**Данные об утечках воды в квартирах жилого фонда Харькова (1997–2000 гг.) и их расчетное значение**

| Административный район Харькова | Количество квартир в административном районе | Количество обследованных квартир с централизованным водоснабжением, $A$ | Количество обследованных квартир с утечками в сантехприборах, $B$ | Расчетное (прогнозное) количество квартир с утечками через сантехприборы, $B_р$ | Процент отклонения от количества обследованных квартир | Количество обследованных квартир с утечками через смывные бачки, $C$ | Расчетное (прогнозное) количество квартир с утечками через смывные бачки, $C_р$ | Процент отклонения от количества обследованных квартир |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Червонозаводский | 21 266 | 8 260 | 1941 | 1965 | −1,2 | 1451 | 1569 | −8,1 |
| Московский | 107 077 | 20 540 | 4143 | 4500 | −8,6 | 3627 | 3613 | 0,4 |
| Фрунзенский | 47 094 | 31 042 | 6249 | 6552 | −4,8 | 5190 | 5272 | −1,6 |
| Орджоникидзевский | 55 568 | 38 272 | 8506 | 7926 | 6,8 | 6510 | 6387 | 1,9 |
| Итого | 456 727 | 179 389 | 32 286 | 32 316 | −0,1 | 26 264 | 26 272 | 0,0 |

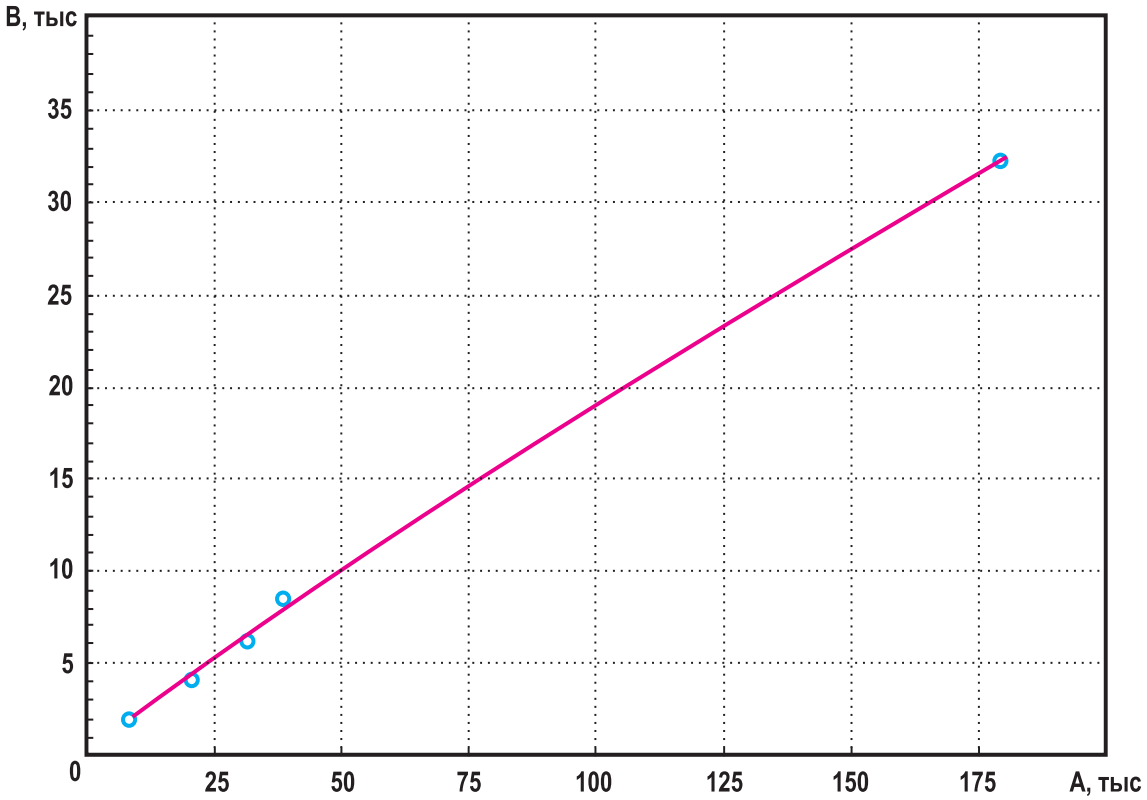



Рис. 6.41. График зависимости между общим количеством обследованных квартир *A* и количеством квартир с обнаруженными утечками воды в сантехприборах *B*: *1* — фактическое значение; *2* — расчетное

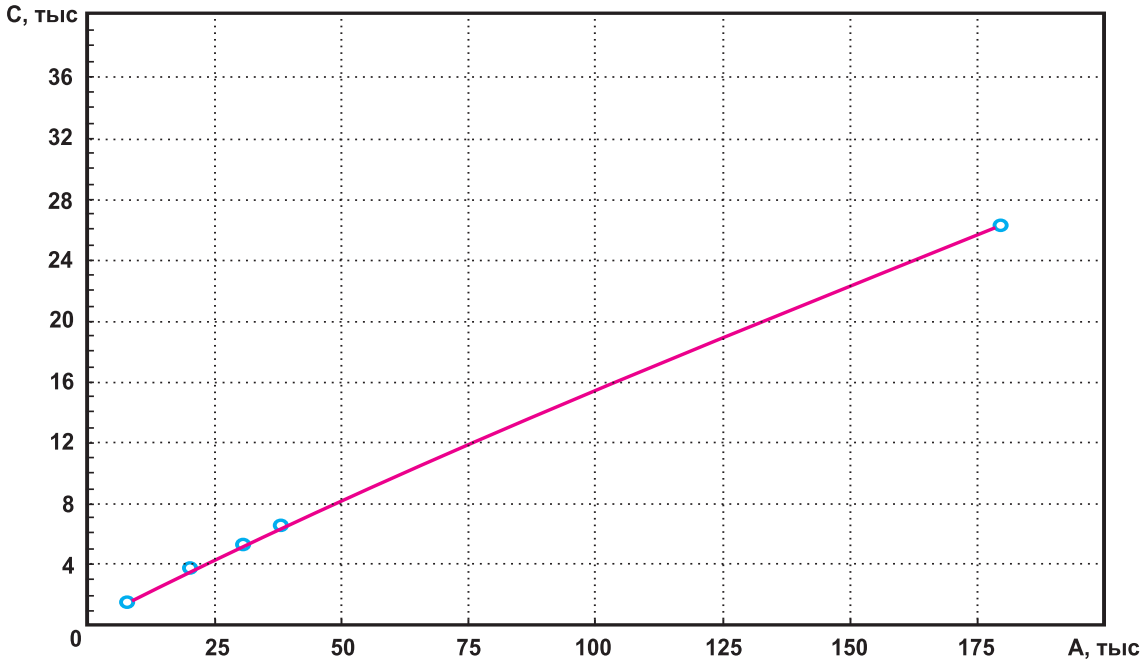



Рис. 6.42. График зависимости между общим количеством обследованных квартир *A* и количеством квартир с обнаруженными утечками через смывные бачки *C*: *1*– фактическое значение; *2* — расчетное

Значение количества отказов оборудования с утечками через сантехприборы аппроксимировано зависимостью

$$B_{\text{р}} = 0,537A^{0,91}, \tag{6.14}$$

где $8260<A<180000$, исходя из количества обследованных квартир.

Количество отказов оборудования с утечками через смывные бачки

$$C_{\text{р}} = 0,407A^{0,92} \quad . \tag{6.15}$$

Значения $B_{\text{р}}$ и $C_{\text{р}}$, полученные по формулам (6.14) и (6.15), имеют отклонение до 10 % от измеренных, что следует считать приемлемой точностью.

Проведем расчет нерационального использования воды в жилом фонде Харькова из-за утечек через смывные бачки и из сантехоборудования (кранов, вентилей, смесителей) в соответствии с РДИ 204 УССР 040-84. По инструкции нерациональный расход воды (утечки) через краны, вентили, смесители (обозначим его $q_1$) оценивается как 0,05–2 м$^3$/сут; нерациональный расход воды (утечки) через смывные бачки (обозначим его $q_2$) — как 1–4 м$^3$/сут.

В расчете для $q_1$ и $q_2$ принимаем минимальный предел нерационального расхода воды (утечек) $q_1$ = 0,05 м$^3$/сут, $q_2$ = 1 м$^3$/сут. Таким образом, для непроизводительных потерь воды в жилом фонде из-за утечек через сантехприборы

$$q_B = 0,537A^{0,91}q_1, \tag{6.16}$$

для непроизводительных потерь воды в жилом фонде из-за утечек через смывные бачки

$$q_C = 0,407A^{0,92}q_2, \tag{6.17}$$

где $A$ — количество квартир с централизованным водоснабжением (в Харькове $A$ = 456 727).

Следовательно, $q_{\text{В}}$ и $q_{\text{С}}$ для всего жилого фонда Харькова составят

$$q_B = 0,537 \cdot 456727^{0,91} \cdot 0,05 = 3795,2 \text{ м}^3/\text{сут}, \tag{6.18}$$

$$q_C = 0,407 \cdot 456727^{0,92} \cdot 1 = 65\ 535,8 \text{ м}^3/\text{сут}. \tag{6.19}$$

Суммарные минимальные потери воды (из-за утечек) в жилом фонде Харькова

$$q = q_B + q_C = 69\ 331 \text{ м}^3/\text{сут}. \tag{6.20}$$

Если учесть, что на подготовку 1 м$^3$ питьевой воды и ее транспортирование затрачивается 1,686 кВт·ч электроэнергии, то минимальные непроизводительные затраты электроэнергии за сутки составят 116 892, а в год — 42 665 604 кВт·ч на сумму около 8 млн грн.

На основе расчета по формулам (6.15) и (6.16), с учетом среднесуточной подачи воды населению в квартиры с централизованным водоснабжением в объеме 405 713 м$^3$/сут, минимальный процент непроизводительных потерь воды (утечек) в жилом фонде Харькова составит

$$H_{\text{п}} = \frac{q_{\text{н}}}{q_{\text{п}}}100 = \frac{69\ 331}{405\,713}100 = 17,1\%, \tag{6.21}$$

где $q_{\text{н}}$ — объем нерациональных потерь воды в сутки;

$q_{\text{п}}$ — объем подачи воды населению в сутки.

Суммарный объем непроизводительных потерь воды в жилом фонде Харькова достаточен для круглосуточного водоснабжения двух городов — Лозовой и Чугуева. При отсутствии должной культуры эксплуатации сантехоборудования утечки составляют около 1,5 м$^3$/сут на человека в городе и могут расти, если не принимать меры к их устранению. Во время проведения эксперимента в Харькове на протяжении января 2001 г. относительная величина непроизводительных потерь и утечек воды в целом по городу составила 31,47 % всей по-

данной городу воды, что достаточно для круглосуточного водоснабжения крупного города с численностью населения 236 тыс. человек.

Утечки воды в жилом фонде города, как правило, в течение суток изменяются. Например, в ночное время (3:00 ч) городское население практически не пользуется водой. В это время большую часть подаваемой в дома воды можно считать бесполезно потерянной и сброшенной через сантехоборудование жилых домов в канализацию.

Добиваться уменьшения потерь воды в жилом фонде городов методом установления норм водопотребления представляется нецелесообразным. Нельзя согласиться с утверждением, что нормы водопотребления способствуют укреплению самофинансирования предприятий и являются мобилизующим началом в борьбе с потерями воды в жилом фонде. Более эффективными мерами должны стать: установка водомеров на водопроводных вводах в жилые дома городов, введение тарифов, стимулирующих повышение культуры водопотребления, установка современного ресурсосберегающего сантехоборудования и замена технически изношенных внутридомовых сетей сетями из долговечных материалов.

Таким образом, потери воды через сантехоборудование в жилом фонде городов — одно из свидетельств неудовлетворительного технического состояния внутридомовых систем водоснабжения. Устранять эти потери проще, чем в городских системах ПРВ. На практике невозможно методом измерений установить все утечки воды в жилых домах крупных городов в реальном масштабе времени. Однако масштабы этих утечек и количество отказов сантехоборудования, процент потерь воды можно определить на основе предложенной выше методики.

Данная методика сводится к выполнению в городах следующих работ:

1. Обследуется небольшой, но репрезентативный участок жилого фонда с централизованным водоснабжением, включающий не менее 8260 квартир, где определяется количество отказов оборудования с утечками воды в сантехприборах и через смывные бачки.

2. По формулам (6.14)–(6.21) оценивается как количество потерь воды, так и процент утечек от всей поданной в обследуемый жилой фонд воды.

3. Полученные результаты экстраполируются на жилой фонд всего города.

4. После проведенных оценок разрабатываются технологический регламент и график движения трудовых и материальных ресурсов для устранения потерь воды в жилом фонде.

## ВЫВОДЫ

1. Определены причины повреждений систем ПРВ. Критерием оптимизации управления системой ПРВ принято снижение избыточных напоров в сети. При этом установлено, что интенсивность гидроудара в системе ПРВ ниже, чем в транзитных магистральных водоводах, транспортирующих воду в города и имеющих практически установившееся давление потока.

Изменение давления при гидроударе в системе ПРВ (при отключении электроэнергии на насосных станциях) представляет существенную опасность для технически изношенных сетей, находящихся в эксплуатации, так как гидроудар вызывает массовые повреждения трубопроводов на участках раструбных стыковых соединений и интенсивное образование свищей в стальных трубах.

Диктующая точка в системе ПРВ является чувствительной к отключению насосной станции. Здесь изменение давления происходит с задержкой (в нашем случае $T = 7$ с) и интенсивность волны гидроудара значительно меньше. Причиной гашения ударной волны в диктующей точке является ее демпфирование потребителями воды в жилых микрорайонах (через многотысячные домовые ответвления от водосети к сантехоборудованию в каждой квартире), а также другими потребителями — промышленными предприятиями, организациями и пр.

2. Разработана методика прогнозирования интенсивности отказов в водосети, позволяющая адресно выявлять участки сети, где необходима замена труб или их санация.

3. Применение методики определения утечек и потерь воды в жилом фонде городов позволяет по-новому оценить утечки воды во внутридомовых сетях.

4. Учитывая то, что в системе ПРВ эксплуатируются не только новые трубопроводы, но и такие, срок эксплуатации которых уже значительно превысил нормативный, необходимо в ближайшие годы создать программы и технические средства для систем ПРВ, обеспечивающих плавное регулирование процессов подачи и распределения воды.

5. Установлено, что разработка, внедрение и эксплуатация в Харькове первой в бывшем СССР и в Украине автоматизированной системы управления технологическими процессами водоснабжения позволили: сократить расход электроэнергии на подачу и распределение воды на 7 %; снизить утечки и непроизводительные потери воды на 10–12 %; уменьшить количество повреждений на водосети в среднем на 5–7 % в год; получить экономию реагентов, нефтехимических материалов и материалов, используемых при ремонте участков водосети; повысить культуру ведения технологических процессов, улучшить условия труда оперативного персонала водопровода; повысить качество принимаемых решений по управлению водоснабжением, реконструкции и модернизации водопровода.

# ГЛАВА 7

# ОБЗОР РАБОТ ПО ПРОБЛЕМАМ ОВ, БС, РВ, СПОСОБНЫХ ПОРАЖАТЬ ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ

В начале XXI века, не считая высокоразвитых государств, обладающих мощными запасами боевых отравляющих веществ и химических боеприпасов, около 20 развивающихся стран мира будут иметь химическое и биологическое оружие, представляющее собой токсичные химикаты и их прекурсоры, высокопатогенные микроорганизмы. Как вид химического оружия могут также рассматриваться гербициды избирательного и сплошного действия, дефолианты и десиканты. В области создания биологического оружия в ряде стран проводятся интенсивные исследования высокопатогенных микроорганизмов, нозоареалов, их распространения, путей передачи, разрабатываются вакцины и средства лечения. Среди биологических агентов военного назначения особое место занимают вирусы опасных для жизни инфекций. Это особенно касается группы энцефалитов и геморрагических лихорадок.

Таблица 7.1

**Некоторые биологические и химические угрозы водопроводным предприятиям**

| | Название | Воздействие | Вероятность угрозы | Обработка |
|---|---|---|---|---|
| Нервно-паралитические вещества | GA (Табун) | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Смертельное | Маловероятно | Нервно-паралитические вещества гидролизуются в воде до нетоксичных составляющих. Период полураспада при нормальном уровне остаточного хлора составляет 9 часов. Повысить уровень остаточного хлора |
| | GB (Зарин) | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Смертельное | Маловероятно | Нервно-паралитические вещества гидролизуются в воде до нетоксичных составляющих. Период полураспада при нормальном уровне остаточного хлора составляет 15—600 часов. Повысить уровень остаточного хлора |
| | GD (Зоман) | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Смертельное | Маловероятно | Нервно-паралитические вещества гидролизуются в воде до нетоксичных составляющих. Период полураспада при нормальном уровне остаточного хлора составляет 40—80 часов. Повысить уровень остаточного хлора |
| | VX | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Смертельное | Маловероятно | Нервно-паралитические вещества гидролизуются в воде до нетоксичных составляющих. Период полураспада при нормальном уровне остаточного хлора составляет 1000 часов. Повысить уровень остаточного хлора |

| | Название | Воздействие | Вероятность угрозы | Обработка |
|---|---|---|---|---|
| Кожно-нарывные | Очищенная горчица (HD) | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Может оказаться смертельным | Маловероятно | Частичное окисление может привести к образованию токсичных побочных продуктов; дальнейшее окисление способно привести к образованию нетоксичных соединений. |
| | Иприт (H) | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Может оказаться смертельным | Маловероятно | Частичное окисление может привести к образованию токсичных побочных продуктов; дальнейшее окисление способно привести к образованию нетоксичных соединений. |
| | Люизит | Всасывание, вдыхание, глаза, кожный покров<br><br>Может оказаться смертельным | Маловероятно | Обычные дезинфицирующие средства способны окислить до сравнительно нетоксичных побочных продуктов. |
| Другие химические вещества | Арсин | Вдыхание<br><br>Может оказаться смертельным | Маловероятно | Неизвестно |
| | Цианид | Всасывание, вдыхание, кожный покров<br><br>Может оказаться смертельным | Маловероятно | Хлор окисляет цианид до цианоген хлорида (CNCl), который также является токсичным. При pH < 8,5, CNCl сохраняется; при pH >8,5 продолжается переход в цианаты и нетоксичные побочные продукты. Точных данных о токсичности и устойчивости CNCl в подготовленной воде нет. |
| Промышленные химикаты | Различные | Всасывание, вдыхание, глаза, слизистые оболочки, кожный покров<br><br>Могут быть от вредных до смертельных | Маловероятно | При вредных концентрациях в воде большинство промышленных химикатов четко дают о себе знать (особенно запахом) и таким образом легко поддаются обнаружению. Они не считаются вероятной угрозой системам водоснабжения. |
| Биологические токсины | Афлатоксин | Всасывание | Возможно | Неизвестно. Выдвигалась гипотеза, что афлатоксины, очевидно, устойчивы к воздействию хлора при обычных остаточных концентрациях. |
| | Анатоксин | Всасывание | Возможно | Неизвестно. При нормальных уровнях хлор не действует. |
| | Ботулинический токсин [A] | Всасывание<br><br>Смертельно | Возможно | >99,7 % инактивация свободным хлором при концентрации 3 мг/л в течение 20 минут. Хлорамины обычно оказываются неэффективными. |
| | Микроцистин | Всасывание | Возможно | Хлор не действует. Хлорамины — неизвестно. Обратный осмос способен удалить до 90 %. |
| | Рицин [B] | Всасывание | Возможно | Хлор не действует. Хлорамины — неизвестно. Обратный осмос способен удалить до 99,8 %. |
| | Сакситоксин | Всасывание | Возможно | Хлор не действует. Хлорамины — неизвестно. Обратный осмос способен удалить до 98,9 %. |

| | Название | Воздействие | Вероятность угрозы | Обработка |
|---|---|---|---|---|
| Биологические токсины | *Staphyloccoal Enterotoxin* B (SEB) [B] | Всасывание | Возможно | Неизвестно. Активированный уголь может оказаться эффективным. |
| | *Tricothecene mycotoxins* (T-2) | Всасывание | Возможно | Неизвестно. Активированный уголь может оказаться эффективным. |
| | *Tetrodotoxin* | Всасывание | Возможно | Неизвестно |
| Бактериологические средства | *Bacillus anthracis* (Сибирская язва) [A] | Всасывание, вдыхание, через кожный покров | Возможно | Вегетативные клетки инактивируются 5 мг/л свободного хлора в течение 20 минут. Споры выдерживают воздействие хлора и хлораминов. Обратный осмос, ультрафильтрация или ультрафиолетовая дезинфекция могут оказаться эффективными против спор. |
| | *Brucella melintensis* и *B. suis* (Бруцеллез) [B] | Всасывание через порезы кожного покрова | Возможно | Инактивируется 1 % раствором гипохлорита натрия. Другие средства дезинфекции неизвестны. |
| | *Burkholderia mallei* (Сап) [B] | Вдыхание, всасывание | Возможно | Неизвестно. Может инактивироваться 1 % раствором гипохлорита натрия. |
| | *Chlamydia psittaci* (Пситтакоз) | Вдыхание | Маловероятно | Неизвестно. Может инактивироваться 1 % раствором гипохлорита натрия. |
| | Cryptosporidium parvum (Криптоспоридиоз) | Всасывание | Возможно | Ооцисты сопротивляются дезинфекции продуктами на основе хлора. Для инактивации требуются передовые системы обработки. См. LT2ESWTR. |
| | *Escherichia coli* O157:H7 | Всасывание | Возможно | Легко инактивируется обычными средствами дезинфекции. |
| | *Francisella tularensis* (Туляремия) [A] | Вдыхание | Маловероятно | Легко инактивируется обычными средствами дезинфекции. |
| | *Salmonella typhimurium and S. typhi* (Пищевое отравление) | Всасывание | Возможно | Легко инактивируется обычными средствами дезинфекции |
| | *Shigella dysenteriae* (Шигеллос) | Всасывание | Возможно | Инактивируется 0,05 мг/л свободного хлора в течение 10 минут. |
| | *Yersinia pestis* (Чума) [A] | Всасывание, вдыхание | Возможно | Инактивируется 1 % гипохлорита натрия. О возможности инактивирования обычным остаточным хлором и хлораминами неизвестно. |
| | *Variola major* (Ветрянка) [A] | Всасывание, вдыхание | Возможно | Инактивируется 1 % гипохлорита натрия. О возможности инактивирования обычным остаточным хлором и хлораминами неизвестно. |
| | *Vibrio cholerae* (Холера) | Всасывание | Возможно | Легко инактивируется обычными средствами дезинфекции. |

| | Название | Воздействие | Вероятность угрозы | Обработка |
|---|---|---|---|---|
| Бактериологические средства | Другие вирусы (например, геморрагический, Норуолк, Эбола, ротавирусы) [A, C] | Всасывание | Неизвестно | Неизвестно. Как правило, говорится о дозах инактивации 1 % гипохлорита натрия. |

После подписания в 1990 году двустороннего советско-американского соглашения о прекращении производства химического оружия и сокращении его запасов в мире сложилась благоприятная ситуация для практического воплощения в жизнь решения по полному запрещению и уничтожению химического и биологического оружия, представляющего особую опасность при попадании в водные источники водоснабжения [361, 362, 363, 364, 365]. Но при этом нельзя исключать возможность хищения из лабораторий и складов этого оружия и химико-бактериологического поражения водных источников в результате действий экстремистов, международных террористов.

В то же время в странах НАТО, и прежде всего в США, ведутся НИОКР в области создания перспективных химических боеприпасов, агентов биологического оружия, средств индивидуальной и коллективной противохимической и биологической защиты, приборов заблаговременного обнаружения отравляющих веществ и компонентов биологического оружия, технических средств контроля за соблюдением договоров в области химического разоружения.

На снабжении армии США имеется свыше 20 гербицидных рецептур, предназначенных для уничтожения сельскохозяйственной и лесной растительности, поражения воды — источника жизни человека. Дальнейшее совершенствование препаратов данного класса ведется как путем поиска фитотоксикантов с более высокими поражающими характеристиками, так и путем подбора различных компонентов, усиливающих трансформацию и эффективность основных действующих начал.

Поражающие возможности гербицидных рецептур в значительной степени зависят от качественных и количественных соотношений входящих в них веществ, а также от той формы, в которой они выполнены для практического применения.

Из всех физико-химических свойств гербицидов важнейшим в формировании препаративных форм является их способность переходить в раствор в воде или органических жидкостях. В зависимости от этого свойства они подразделяются на липофильные и гидрофильные.

Растворителями липофильных гербицидов при получении из них концентратов служат различные фракции нефти, представленные алифатическими или ароматическими углеводородами с низкими точками кипения.

Концентраты менее липофильных и гидрофильных активных ингредиентов получают растворением их в смесях спиртов, гликолей эфиров и хлорированных органических растворителях. Устойчивость растворов и придание им большей эмульгируемости при разбавлении водой и формировании эмульсии перед применением достигаются добавлением толуола или ксилола. Водно-масляные эмульсии стабилизируют эмульгаторами — химическими соединениями с молекулами, несущими липофильные или гидрофильные участки. К таким соединениям относятся длинноцепочечные сульфинированные эфиры полиэтиленгликоля и полиоксиэтиленолеата. Консервантами добиваются снижения скорости побочных реакций, ведущих к потере активности гербицидов. Для этих целей используются производные бензилацетонитрила, натриевые соли алкилбутилдиамата, сложные эфиры натрий-тиобутилдиоата. В рецептуры вводятся также дисперсанты и связующие вещества, способствующие образованию аэрозоля, близкого к монодисперсному при распылении, и удерживающие частицы на поверхности растительности при осаждении. В качестве таких веществ используются материалы, содержащие белок (молочные продукты, мука зерновых культур, альбумин,

желатин), масла, растительные клеи и камеди, смолы, канифоли, терпены, а также сульфинированные спирты, нефтяные сульфонаты, эфиры жирных кислот, эфиры полиоксиэтиленгликоля и каолин. Миграцию гербицида с поверхности к внутренним тканям листа и стебля усиливают введением в рецептуры различных липидов и поверхностно-активных веществ: эфиров высокомолекулярных жирных кислот, арилалкилполиэтиленоксидов гликолей, алкиламинацетатов, алкиларилсульфонатов и алкилфосфатов.

Твердофазные носители действующих соединений гербицидов представлены гранулированной формой и дустами. Основой гранул является каолин, а дустов — силикатно-карбонатные порошки. Слеживание и укрупнение частиц гранулированных и порошковых рецептур предупреждают антиконгломератными средствами. В частности, изменение сыпучести рецептур становится минимальным при использовании диатомита и натриевой соли моно- и диметилнафталинсульфоната.

В ходе разработки рецептур длительного действия в США в качестве наполнителя и носителя фитотоксикантов испытываются полиамиды, полисахариды, лигнины, крахмал, полиэтилен, полипропилен. Носители с равномерно распределенными в них активными веществами подвергаются микрокапсулированию. По заключению американских специалистов, продолжительность поражающего действия изготовленных таким образом рецептур может составлять несколько лет.

Значительная часть современных гербицидов сплошного и селективного действия, используемых в интересах вооруженных сил западных стран, поражает растительность за счет избирательного нарушения одного или нескольких жизненно важных процессов. В связи с этим они обладают высокой фитотоксичностью при относительно низком токсичном воздействии на млекопитающих. Указанное свойство обусловлено значительными различиями в цепях обмена, характерных для растительных и животных организмов. Однако при приготовлении конкретных препаративных форм гербицидов военного назначения в них могут вводиться добавки, которые существенным образом видоизменяют токсичность и раздражающее действие рецептуры на человека и животных. Накопленный опыт в США и государствах блока НАТО показывает, что проявление токсичности прежде всего зависит от физико-химических свойств веществ. Так, например, водорастворимые гербициды быстро выводятся из организма и оказывают в зависимости от дозы лишь кратковременное острое токсическое действие, тогда как липофильные пестициды выводятся медленно и способны накапливаться, вызывая хронический токсикоз, к которому обычно приводило применение ДДТ и диоксина, присутствующего в некоторых гербицидных рецептурах.

В военных медико-биологических исследованиях, проводимых в США и государствах НАТО, токсичность препаратов, вызывающих острый токсикоз, оценивается по количественному значению средней летальной дозы ($ЛД_{50}$). При этом используются данные экспериментов, проводимых на животных (токсичность пестицидов определяется в основном на крысах).

В США в зависимости от результатов испытаний химические соединения с $ЛД_{50}$ меньше 50 мг/кг относят к высокотоксичным веществам. Препараты с $ЛД_{50}$ выше 50 мг/кг считаются токсичными, среднетоксичными и малотоксичными. Более точное разделение веществ по классам токсичности, принятое в США, приведено в таблице 7.2.

Таблица 7.2

**Классы токсичности веществ**

| Класс токсичности | Вероятные $ЛД_{50}$ для человека массой 70 кг | |
|---|---|---|
| | *мг/кг* | *мл* |
| 6 | менее 5 | менее 0,15 |
| 5 | 5—50 | 0,15 — 5 |
| 4 | 50 — 500 | 5 — 28 |
| 3 | 500 — 5000 | 28 — 473 |
| 2 | 5000 — 15000 | 473 — 946 |
| 1 | более 15000 | более 946 |

Наиболее распространенными активными составляющими существующих гербицидных структур являются производные феноксиуксусных кислот. На их основе создано несколько сотен разнообразных препаративных форм, концентратов и смесей, ряд из которых состоит на снабжении войск. В частности, 2,4-D или 2,4-дихлорфеноксиуксусная кислота имеет более 60 фирменных вариантов.

Разнообразные формы имеют также кислоты:

2,4-DP или 2,4-дихлорфеноксипропионовая;

2,4-DB или 2,4-дихлорфеноксибутиловая;

2,4,5-T или 2,4,5-трихлорфеноксиуксусная.

Производные хлорфеноксиалифатических кислот и эфиров представлены MCPA —(4-хлор-2-метилфенокси)уксусная кислота (Metaxon, Agroxone, Weedone), MCPB — 4-(2-метил-4-хлорфенокси)бутиловая кислота (Can-Troe, PDQ Thistrol), MCPP — 2-(4-хлор-2-метилфенокси)пропионовая кислота (mecoprol, Methoxone M, Mecopex, Gondon's Mecomec) и дикамба (Banvel) -2-метил-З,6-дихлорбензойная кислота.

Калиевые, натриевые и алкиламинные соли феноксиуксусных и феноксиалифатических кислот применяются в водных растворах. Эфиры этих кислот менее растворимы в воде по сравнению с солями и используются в виде эмульсий.

Специфическое раздражающее действие на кожу, глаза, слизистые оболочки органов дыхания и желудочно-кишечный тракт оказывают хлорфеноксикислоты, их соли и эфиры. Они проникают в организм через кишечную стенку, легкие и кожу. Причем аккумуляция их в жировой прослойке не наблюдается. Вещества выводятся в основном с мочой. Происходит также незначительная биотрансформация и связывание хлорфеноксигербицидов.

Период полувыведения из организма человека 2,4-D в среднем равен 18 часам; 2,4,5-T — 24 часам. Индивидуальные различия в кислотности мочи могут изменять эти величины от 4 до 140 часов. Чем меньше кислотность мочи, тем быстрее выводятся гербициды.

В экспериментах, проводимых в США на животных, большие дозы 2,4-D вызывают рвоту, понос, отсутствие аппетита, потерю массы, изъязвление полости рта и глотки, поражение легких, почек и центральной нервной системы. Установлено, что доза 5 мг/кг, введенная человеку однократно, не оказывает вредного воздействия.

В процессе производства гербицида на базе 2,4,5-T при нарушении технологии (превышение температуры) образуется высокотоксичный, обладающий канцерогенным и тератогенным действием хлордибензодиоксин. Указанный компонент присутствовал в смеси гербицидов «Orange-1», которая применялась американцами во время войны в Юго-Восточной Азии, поражая воду, землю, растения и воздух.

Отличительной чертой нитрофенольных и нитрокрезоловых гербицидов и пестицидов, слабо растворимых в воде, является применение их в органических растворителях. Ряд препаратов, таких как динитрофенол (Chemox PE), динитрокрезол (DNOC, DNC, Chemsect DNOC, Elgeto 130, Nitrador, Selinon, Sinox, Trifocide), диносеб (DNBP, dinitro, Basanite, Caldon) и другие, используются в виде эмульсий и смачиваемых порошков. Они высокотоксичны для человека и животных, поскольку применяются в виде тонких аэрозолей и хорошо проникают в организм через легкие, желудочно-кишечный тракт и кожу. Выведение и биотрансформация этих нитроароматических соединений относительно замедлены. Период половинного выведения из организма составляет 5—14 дней. Механизм токсического действия основан на активации окислительных процессов в митахондриях клеток.

Класс дипиридилов среди гербицидов представлен паракватом и дикватом. Первый характеризуется системным неселективным контактным действием и обычно производится в виде дихлорида и диметилсульфата. Его технический продукт характеризуется концентрациями 20—50 %. Паракват широко используется в смесях с другими гербицидами. Он и его смеси при контакте с кожей вызывают появление ожогов и изъязвлений. При отравлениях паракват обладает способностью накапливаться в легочной ткани и поражает ее за счет генерирования активных радикалов кислорода и инициирования перекисного окисления липидов. Попавшее внутрь соединение в дозах 20—40 мг/кг через 2—3 недели в большинстве случаев приводит к смерти. Гибель наступает из-за глубокого нарушения нормальных процессов жизнедеятельности желудочно-кишечного тракта, почек, печени и легких. При дозах выше 40 мг/кг смертность достигает 100 % в течение 1—7 суток.

Паракват особо опасен для людей при авиационном распылении жидкой рецептуры. Вдыхание аэрозоля приводит к смерти вследствие возникновения отека легких при дозах более 4 мг/кг.

Дикват (реглон) — гербицид и десикант, производится в виде дибромида моногидрата. В жидких концентрациях его содержится 20—25 %. В сравнении с паракватом он в меньшей степени поражает кожу, а также не накапливается (избирательно) в легких. Основной причиной гибели организма при отравлении дикватом является поражение почек. За счет токсикоза тяжелому поражению подвергается центральная нервная система.

По ряду пестицидов выявлено, что они представляют значительную угрозу не только для жизни человека, но и для среды обитания. В связи с этим по решению национального агентства по охране окружающей среды запрещено распространение на территории США бутахлора, ДДТ, нитралина, трисбена, ципразина, значительно ограничено применение вапотона, ГМК, монурона. Планируется полностью уничтожить запасы и прекратить использование диносеба, EDB, сильвекса, 2,4,5-Т. По оценке, на изъятие из хозяйственного оборота лишь четырех последних препаратов потребуется около 200 млн долларов США. Как видим, сам человек создает средства массового поражения, а затем, осознавая их чрезвычайную опасность, стремится к запрету их распространения.

Высоким раздражающим действием на глаза, кожу и органы дыхания обладает также одна из препаративных форм прометона (Pramitol 25E).

Несмотря на то, что гибель животных от острого токсикоза не позволяет сделать вывод о других возможных вредных эффектах рецептур, величина $ЛД_{50}$ остается на практике важным количественным критерием оценки токсичности гербицидов. В таблице 7.3 приведены $ЛД_{50}$ наиболее токсичных для людей и животных фитотоксикантов, являющихся представителями групп соединений, на основе которых синтезирован ряд гербицидов.

Таблица 7.3

**Дозы гербицидов, вызывающих острый токсикоз у животных**

| Химическая группа | Название гербицида | | $ЛД_{50}$, мг/кг |
|---|---|---|---|
| | промышленное | фирменное | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Алифатические и фено-кислоты | 2,4-D | Agrotect и др. | 375 |
| | 2,4,5-T | Amine 2,4,5-T и др. | 300-500 |
| | MCPA | Metaxon и др. | 700 |
| | MCPP | Mecoprop | 930 |
| | Дихлорпропионовая кислота | Dalapon | 970 |
| | | Basfapon | |
| Триазины, триазолы | Атратон | Atratone | 1465 |
| | | Gesatamin | |
| | Сианазин | Bladex | 288 |
| | | Fortrol | |
| | Десметрин | Semeron | 1390 |
| | Метрибуцин | Sencor | 1100 |
| | Прометон | Pramitol 25E | 2276 |
| Урацилы | Бромацил | Borea | 5200 |
| | | Bromax | |
| Производные мочевины | Линурон | Alfalon | 1500 |
| | | Linex 4L | |
| | Тебутиурон | Spike | 644 |
| | | Graslan | |
| | Тетрафлуорон | Tomilon | 1265 |
| Карбаматы | Асулам | Asulox | 5000 |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Тиокарбонаты | Диаллат | Avadex<br>Pyradex | 395 |
| | Триаллат | Avadex BU | 1675 |
| | Тиобенкарб | Bolero<br>Saturn | 1300 |
| Карбонилаты | Барбан | Carbyne | 1350 |
| Бензонитрилы | Дихлобенил | Casoron | 3160 |
| Амиды | Аллидохлор | Randox | 750 |
| Анимиды | Пропахлор | Ramrod | 710 |
| | Пропанил | Bexton<br>DPA<br>Erlan | 1384 |
| Бипиридины | Паракват | Ortho Paraquat Cl<br>Reqion | 100<br>157-440 |
| Производное пиколиновой кислоты | Пиклорам | Tordon<br>Grazon | 8200 |
| Фталаты | Эндотал | Aguathol | 51 |
| Фосфонаты | Глифосат | Roundup<br>Glifonox | 4300 |
| Никотиновая кислота | ———”——— | Arsenal | >5000 |
| Оксадиазолинон | Оксадиазон | Ronstar | >3500 |
| Изоксазолидинон | ———”——— | Command | 1369 |
| Хлоропиридинил | Триклопир | Carlon<br>Grosbow | 630 |
| Циклогесенон | Сетоксидим | Poast | 3125 |
| Динитроаминобензены | Пендиметалин | Prowl<br>Stomp | 1250 |
| Фтординитротолуидины | Динитрамин | Cobex<br>Conalan | 3000 |
| | Флюхлоралин | Tolban | 1550 |
| | Профлюралин | Treflan | 1808 |

Дальнейшее совершенствование гербицидов идет по двум основным направлениям. Прежде всего, осуществляется разработка рецептур, обладающих повышенной фитотоксичностью при снижении побочных токсичных факторов, воздействующих на человека, животных и насекомых. Кроме того, для препаратов боевого предназначения ведется поиск добавок, обеспечивающих воспрепятствование употреблению продуктов питания (отталкивающий запах, вкус и т.п.), полученных из обработанной гербицидами растительности.

Предпринимаемые в результате ужесточения законодательной политики США в области охраны окружающей среды обследования военных объектов показали, что их деятельность ведет к загрязнению почвы, поверхностных и подземных вод, а также атмосферы отравляющими токсичными и радиоактивными веществами. Установлено, что наряду с отходами военного производства одним из основных источников загрязнения окружающей среды являются устаревшие химические боеприпасы, отравляющие вещества (ОВ) в подтекающих контейнерах, фитотоксиканты, компоненты ракетных топлив и другие токсичные соединения, используемые в боевой и повседневной деятельности армии.

По оценке военных специалистов США, расходы на полную очистку окружающей среды от вредных веществ на этих объектах методами, используемыми в настоящее время, составят около 200 млрд долларов США. Высокая стоимость очистных работ определила потребность поиска новых путей и способов решения этой задачи.

Одним из них является требование снижения уровня токсичности промышленных отходов, что уже непосредственно отразилось на производстве бризантных и взрывчатых веществ, а также компонентов химического и ядерного оружия. Так, США вынуждены осуществлять закупки тринитротолуола в больших количествах за рубежом, поскольку собственные предприятия-производители пока еще не до конца отработали технологию обезвреживания отходов, образующихся при его получении. В то же время некоторым заводам, работающим с нитроцеллюлозой, уже удалось, используя биотехнологические и химические процессы, добиться обезвреживания побочных продуктов и за счет этого сохранить рабочий ритм снаряжательных линий. В частности, завод по производству боеприпасов в г. Холстон для очищения сточных вод от циклотриметилен-тринитроамина использует микроорганизмы.

Разработки научно-исследовательского центра инженерных войск армии США (Пикатиннский арсенал, шт. Нью-Джерси) показали также возможность разложения соединений, содержащихся в отходах производства взрывчатых веществ, с помощью микроорганизмов или выделяемых из них ферментов. В исследованиях внимание сконцентрировано в основном на биодеградации органических нитратных эфиров — диэтиленгликоле, динитрате и нитратах целлюлозы. В экспериментах достигнуто денитрирование диэтиленгликоля динитрата с помощью глютатион-3-трансферазы, выделенной из печени кролика при добавлении в среду восстановленного глютатиона и других реагентов. Биодеградация нитроцеллюлозы осуществлена в лабораторных и поисковых масштабах с помощью грибка Aspergillus fumigatus в реакторе объемом 15 л с добавлением 3 % глюкозы при температуре 25—30 °С и исходно кислом состоянии (pH=4,5). Другой грибок — Phanerochaete chrysosporium рассматривается в качестве средства биодеградации жидких отходов (красной воды), образующихся в процессе синтеза тринитротолуола. Однако на него оказывают токсичное действие содержащиеся в красной воде нитрит-ионы. В этой связи предусматривается предварительно, с применением фермента нитрит-редуктазы, переводить нитрит-ионы в неактивное по отношению к грибку состояние, а затем вести дальнейшую биодеградацию с помощью хризоспориума.

Обращено внимание на возможность использования для очистки от радиоактивных элементов микроба-концентратора GS-15, способного связывать находящийся в воде уран. Микроорганизм выделен учеными геологической лаборатории (Рестон, шт. Вирджиния) из донных отложений реки Потомак. Лабораторно-промышленные испытания подтвердили аккумулирование микробом урана. Считается, что он способен накапливать также плутоний и технеций.

В целях искусственного ускорения процессов детоксикации американские специалисты ведут поиск и создание штаммов микроорганизмов, обладающих способностью разлагать токсичные вещества с высокой скоростью. С применением молекулярной биологии и генной инженерии такие штаммы получены, а из микробов выделены ферментативные системы, дегазирующие боевые отравляющие вещества и разлагающие имитаторы отравляющих веществ, гербициды и токсичные отходы их производства. Однако, по мнению западных специалистов, уничтожение общеядовитых отравляющих веществ с помощью микроорганизмов пока малоперспективно. Они не обеспечивают также эффективную дегазацию ОВ кожно-нарывного действия, так как, например, иприты обладают алкилирующим свойством, что приводит к нарушению дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК) и в конечном счете — к гибели микробной клетки. Биотехнологическая переработка нервно-паралитических ОВ еще не вышла из стадии поиска и лабораторных испытаний. Поэтому основной американский запас устаревших боевых отравляющих веществ поэтапно уничтожается химическими и физико-химическими методами (нейтрализацией, термическим разложением или их сочетанием).

В то же время министерство обороны США на контрактной основе ведет исследование других подходов к дегазации боевых отравляющих веществ за счет использования микробов и ферментативных систем, полученных из живых организмов. Это может обеспечить большую полноту разрушения отравляющего вещества, находящегося в относительно невысоких концентрациях на местности, в больших объемах воды и воздуха. Рассматриваются возможности использования таких ферментативных систем в коллективных средствах защиты. Разработки по этому направлению ведут специалисты Натикского научно-исследовательского центра (Натик, шт. Массачусетс), Абердинского полигона (шт. Мэриленд) и Иллинойского технологического института (Чикаго, шт. Иллинойс). Они проанализировали работы,

выполненные Техасским университетом (шт. Техас), Агуроновским (шт. Калифорния) и Калифорнийским технологическими институтами, в области использования биологических объектов, содержащих ферменты-детоксификаторы, и наметили перспективы исследований. Все ферменты-детоксификаторы органофосфатов (боевых отравляющих веществ, имитаторов ОВ, гербицидов, инсектицидов, акарицидов, фунгицидов и др.), имеющие наименование амидазы, зоманазы, галогенидгидролазы, фосфотриэстеразы, паратионгидролазы, диизопропил-фторфосфатазы (ДИП-азы), параоксазы, были объединены в одну группу с общим названием ангидразы органофосфорных кислот. Выделены и сопоставлены по способности гидролизовать и обеспечивать детоксикацию боевых отравляющих веществ нервно-паралитического действия (зомана и зарина) ангидразы из трех штаммов Bacillus stearothermophilus (JD 100, JD 200, JD 300), из двух штаммов E.coli ATCC 25922 (F-1, F-2), а также Flavobacterium SP 4079 и Tetrahymena thermophila. Для эффективной работы ферментов необходимо присутствие ионов марганца. В исследованиях наиболее подробно изучены бациллярные ангидразы. Одна из полученных ангидраз была ковалентно присоединена (иммобилизирована) к хлопчатобумажной ткани и при этом сохранила способность гидролизировать зоман.

В целом американские разработки по биодеградации показывают перспективность изучения использования микробов или отдельных их компонентов в целях дегазации почвы и воды, содержащих относительно невысокие концентрации токсичных веществ. Установлено, что иммобилизованные ферменты сохраняют способность разрушать ОВ нервно-паралитического действия. Однако пока не выделены микроорганизмы, способные надежно обезвреживать значительные объемы боевых отравляющих веществ высокой концентрации и обеспечивать альтернативный подход к ликвидации устаревшего оружия.

Военные и гражданские научно-исследовательские учреждения США ведут разработку новых подходов к созданию средств дегазации боевых отравляющих веществ (БОВ). Целью разработок является полная замена существующей технологии обезвреживания БОВ, состоящей в их нейтрализации с помощью окислителя, находящегося в водном растворе или эмульсии, поверхностно-активных надбавок и стабилизаторов дегазирующей рецептуры. Используемые рецептуры в основном применяют в качестве окислителя хлор, который обеспечивает дегазацию различных типов ОВ. Однако такие рецептуры имеют ограничения в применении из-за сильного коррозионного действия. Это обусловливает необходимость поиска других в равной степени эффективных, но менее агрессивных и более избирательных в химическом отношении методов дегазации.

Одним из направлений таких разработок является использование биологических катализаторов-ферментов (энзимов), выделяемых из живых организмов и представляющих собой белковые молекулы, которые за счет колебательных обратимых конформационных перестроек без изменения собственной первичной структуры обеспечивают разрыв молекул других веществ. В процессе исследований выявлено большое число ферментов, способных разрушать ОВ нервно-паралитического действия, одной из основных частей которых является органофосфорная кислота. Среди них выделены биокатализаторы природного происхождения, способные разрушать нервно-паралитические ОВ со скоростью, превышающей в 1000 раз скорость разложения, проходящего под действием неферментных катализаторов. Ведется отбор энзимов, способных разрушать другие типы ОВ.

В частности, специалисты научно-исследовательского технологического института (г. Чикаго, шт. Иллинойс) изучили применимость фермента — органофосфорной ангидразы для детоксикации связанных с поверхностью БОВ — зарина, зомана и их имитатора. Фермент выделен из гепатонанкреаса и зрительных ганглиев восточного и западного кальмаров, принадлежащих соответственно к видам Loligo pealli и Loligo opalenscens.

Дегазирующий раствор, включающий 60 ед. ангидразы на 100 мл, обеспечивал за 6—7 минут на 90—95 % разложение связанного с поверхностью диизопропилфторфосфата (имитатора фосфороорганических отравляющих веществ) и более чем на 80 % в течение 20 минут — зомана. Фермент в растворе (100 ед./100 мл) сохраняет более 96 % своей исходной активности после дегазации поверхности, содержащей 250 мг зомана или зарина на 2,54 мм$^2$ и может быть использован повторно. Высокоочищенная ангидраза сохраняет 90 % исходной активности после складирования в течение 230 дней при -20°С.

Лаборатория прикладной биотехнологии фирмы «Артур Д. Литтл инкорпорейтид» (г. Кембридж, шт. Массачусетс) в течение последних 10 лет изучает молекулярное взаимодействие токсичных веществ с биомолекулами и обнаруженные эффекты использует в разработке новых методов в индикации и дегазации. Взаимодействие токсина или ОВ с молекулярными компонентами клетки или ткани в большинстве случаев влечет за собой их связывание со специфичной биомолекулой (например, ферментом, нуклеиновой кислотой или рецептором) на поверхности клетки или внутри ее. Результатом связывания может быть полное поражение одной или нескольких биохимических реакций, что приводит к нарушению физиологической функции. На основе изучения механизма связывания ОВ нервно-паралитического действия гидролизатами белков разработаны повязки для быстрого обеззараживания ран от ОВ. В поисках более эффективных и дешевых дегазационных средств синтезирован ряд новых пептидов, связывающих и нейтрализующих ОВ нервно-паралитического действия. Эти пептиды моделировались по строению активного центра сериновой и сульфгидрильной эстераз. Они могут применяться как при закрытии раневой поверхности, так и для дегазации техники в условиях нейтрального pH раствора. Эти подходы позволили иммобилизовать крупные надмолекулярные образования, такие как нервные рецепторы, и использовать их в целях обнаружения ОВ. Разработанная технология применима ко всем видам рецепторов и антителам. Сочетание методов молекулярной биологии и биотехнологии позволило выявить новые способы защиты от химических ОВ и биологических токсинов.

Разработчики намерены повысить скорость разложения ОВ за счет целенаправленного изменения структуры белковых молекул и получения рекомбинантных ферментов. Для этого развернуты исследования, направленные на изучение взаимосвязи между структурными и объемными особенностями биомолекул с их каталитической активностью и стабильностью в процессе использования. Структура белков устанавливается по дифракции рентгеновских лучей, ядерным магнитным резонансом и молекулярным моделированием. Уровень современной биотехнологии позволяет осуществить наработку природных и рекомбинантных ферментов, пригодных к использованию в дегазации. Причем стоимость производства относительно низка и, по мнению американских специалистов, не будет препятствием для создания на основе ферментов дегазирующих рецептур в промышленных объемах.

Анализ последствий массированного боевого применения гербицидов для уничтожения лесов и сельскохозяйственных посевов американскими вооруженными силами в Индокитае и аварий на химических производствах показал, что поражающие растительность активные ингредиенты длительное время сохраняются в окружающей среде и оказывают долгосрочное вредное воздействие на экологическую обстановку, и особенное место здесь занимают проблемы, связанные с поражением источников воды. Это обусловлено высокой фитотоксичностью, а также значительной химической и термической стойкостью экологически вредных веществ, к которым, наряду с фитотоксикантами, относятся диоксины, инсектициды, фунгициды и отходы химических производств. Такие вещества чужды окружающей среде и чрезвычайно медленно обезвреживаются естественными микробными и растительными сообществами почвы и воды. В связи с этим национальные и международные НИИ и химические фирмы — производители пестицидов ведут поиск путей усиления процессов детоксикации за счет выявления и практического использования штаммов микроорганизмов, обладающих способностью с высокой скоростью разлагать токсичные вещества. Налажено также получение таких штаммов методами генной инженерии.

Лаборатория по обезвреживанию пестицидов министерства сельского хозяйства США провела анализ выполненных работ, в результате чего было установлено, что существует реальная возможность, используя ферменты, содержащиеся в микроорганизмах, вести обезвреживание гербицидов и пестицидов. В исследовании обобщены данные по способам и средствам нейтрализации наиболее распространенных рецептур. Считается, что в наибольшей степени для этих целей подходят гидролазы (амидазы, галогенидгидролазы, эстеразы). В классе гидролаз выявлена галогенидгидролаза из микроорганизма Pseudomonas putida, которая удаляет хлор из гербицида далапона, арилациламидаза (Bacillus sphaericus), с высокой скоростью разрушает гербициды линурон, диурон. Фосфотриэстеразы, выделенные из Flavobacterium sp., инактивируют паратион и близкие к нему по строению пестициды. Паратионгидролаза (Pseudomonas diminuta) успешно при-

менена для обезвреживания органофосфорных инсектицидов и отходов их производства, хранящихся в контейнерах.

В США установлено, что ряд ферментативных систем, дезактивирующих гербициды, пестициды, а также токсичные отходы их производства, обеспечивают разложение отравляющих веществ (ОВ) и имитаторов ОВ. Работы в этой области по контрактам с командованием НИОКР министерства обороны (МО) США, научно-исследовательским управлением сухопутных войск США, научно-исследовательским центром технического обслуживания ВВС США и агентством по охране окружающей среды ведут университет Цинциннати (шт. Огайо), Техасский университет (шт. Техас), Агуроновский институт (шт. Калифорния), Иллинойский и Калифорнийский технологические институты. Контракты предусматривают проведение следующих работ: клонирование бактериальных генов фосфотриэстераз и гена, кодирующего фермент диизопропил фосфорофлуоридгидролазу из морских моллюсков, получение энзимов, гидролизующих фосфорооорганические и другие отравляющие вещества, и дрожжевых культур, разлагающих токсичные химикаты.

В результате исследований из головоногих моллюсков выделен фермент диизопропилфторфосфатаза (ДФП-аза), гидролизующий диизопропилфосфат (имитатор фосфорооорганических отравляющих веществ) и боевое отравляющее вещество — зоман. Включение в разработки других живых объектов — микроорганизмов (E. coli, штамм ATCC 25922; Proteus vulgaris, Saccharomycas cerevisae, Tetrahymena tyrmophila) и тканей млекопитающих (почки свиней) выявило наличие у них способности продуцировать фермент, гидролизующий зоман с большей эффективностью, чем ДФП-аза моллюска. Он получил название ДФП-аза Мазура. Новый фермент наиболее активно синтезируется кишечной палочкой. Ферментативная скорость гидролиза зомана может быть увеличена за счет добавления двухвалентных ионов марганца и при отсутствии в среде марганца осаждением энзима 10-процентным охлажденным этанолом. Молекулярная масса дезактивирующего ОВ фермента у моллюсков равна 26 тысячам, а у микроорганизмов и почечной ткани свиней — 62 тысячам.

Чистые культуры микроорганизмов Alcaligenes и Alcaligenes и Arthrobacter — за счет работы собственных оксигеназ в присутствии кислорода разрушают 2,4-D. Другой микроб Pseudomonas cepacia участвует в разрушении 2,4,5-T. Применение генетической инженерии позволило получить мультиплазмидные варианты Pseudomonas, способные разрушать широкий спектр субстратов. Опыты показали, что с их помощью можно в течение 5 суток очистить почву на 80 % от 2,4,5-T, а также от нефти и продуктов ее переработки.

По мнению американских специалистов, особое внимание заслуживает грибок Phanaerochaete chrysosporium, продуцирующий фермент, подобный пероксидазе, который разрушает диоксин (2,3,7,8-тетрахлордибензо-р-диоксин) и ДДТ.

Паратионгидролаза, продуцируемая Flavobacterium sp. (ATCC 27551), с высокой скоростью гидролизует кумафос (акарицид), превращая его в хлорферон и диэтилтиофосфорную кислоту. Культура клеток этого микроорганизма за 48 часов в полевых испытаниях разложила кумафос, содержащийся в 2,4 тыс. литров отходов, полученных в результате обработки скота в траншеях проныривания во время борьбы с переносчиками эпизоотических заболеваний. (В отходы добавлялось 22,8 л культуры микроорганизма, 9,5 кг ксилозы, 4,5 кг сульфата аммония, pH в емкости поддерживался между 6,8—7 за счет 1,4 кг одноосновного фосфата калия и 1,8 кг двухосновного фосфата калия, температура раствора была 33—36 °C.)

Швейцарские специалисты федерального технологического института (Цюрих) и фирма «Сиба-Гейги» выделили аэробную культуру (Pseudomonas sp.), изготовили ферментеры объемом 2 и 25 л и подобрали необходимые условия, обеспечивающие биодеградацию атразина, симазина, а также отходов гербицидного производства. Разработка впервые продемонстрировала существование принципиальной возможности обезвреживания триазинов с помощью микробов.

В США в Калифорнийском университете разрабатывается перспективный метод обезвреживания опасных отходов. Метод основан на непрерывном выращивании культур двух бактерий (Pseudomonas putida и Ps.alcaligenes) в колонке с керамическим носителем, где микробы обмениваются генетическим материалом, обеспечивающим разложение соединений, циркулирующих через колонку. Указанный способ применения микробов позволяет сократить сроки очистки с 8—13 месяцев до одной недели.

Методы молекулярной биологии и генетической инженерии позволяют определить аминокислотный состав ферментов, гены, ответственные за их синтез, а также осуществить перенос генетической информации из одних видов живых организмов в другие с целью обеспечения наибольшей эффективности по скорости и стоимости ферментативного разрушения ОВ, гербицидов и других токсических веществ. Установлено, что эта информация закодирована в основном в дезоксирибонуклеиновой кислоте (ДНК) плазмид, которые существуют в клетке и кодируются независимо от хромосомы (генетической информации) микроба. Это облегчает перенос факторов дезактивации токсических веществ из одного вида микробов в другие. В частности, гены деградации гербицидов 2,4-D, далапона, паратиона расположены на плазмидах. При этом генетическая информация, ответственная за образование паратион-гидролазы и, соответственно, за разрушение паратиона, выделена из американского штамма Pseudomonas diminuta и успешно введена в другие виды бактерий. Дополнительные детальные исследования по ДНК-ДНК гибридизации показали, что гены, кодирующие паратионгидролазу из «американского» и «филиппинского» (Flavobacterium sp.) источников, идентичны, хотя принадлежат различным микроорганизмам и находятся на плазмидах, отличающихся по размерам, соответственно 66 и 43 тысячи оснований. Одновременно выявлено глубокое отличие участков плазмидных ДНК, которые не соответствуют гену фермента.

Экономические расчеты наряду с лабораторными и полевыми испытаниями показали перспективность использования микроорганизмов в целях разрушения токсичных веществ. По данным программы «Falmouth Associates», биологическая очистка одной тонны стоит 40—70 долларов США, а ее озоление требует 250—550 долларов США. Американская фирма «Biota» за 10 недель очистила 150 тысяч кубических метров земли от нефтяных загрязнений. Затраты на это составили лишь четверть того, что потребовалось бы на удаление и транспортировку загрязненной почвы.

В ходе выполняемых по контракту с министерством обороны США опытно-конструкторских работ по созданию системы обнаружения биологических поражающих агентов отделом атмосферных исследований Лос-Аламосской национальной лаборатории (г. Лос-Аламос, шт. Нью-Мексико) проведены полевые испытания экспериментального мобильного лидарного комплекса дистанционного определения в искусственно создаваемых аэрозольных атмосферных образованиях вегетативных и споровых форм микроорганизмов.

Принцип обнаружения микроорганизмов с помощью невосприимчивого к спектру солнечного излучения ЛИДАРа (LIDAR - Laser- Induced Detection and Range) основан на способности циклических аминокислот (тритофана, фенилаланина и тирозина), находящихся в бактериальной стенке, поглощать генерируемое лазером ультрафиолетовое излучение с переизлучением сигналов (флуоресцировать) на других определенных для различных видов и форм микроорганизмов длинах волн этого диапазона (со сдвигом к нижней его границе). Флуоресцентное излучение микробных клеток, которое в несколько раз превышает как отраженное, так и фоновое, улавливается зеркальным телескопом и выделяется с помощью приемно-аналитической аппаратуры. Аппаратура позволяет выявлять наличие биологического аэрозоля, определять его концентрацию, размеры облака, удаленность, скорость и направление перемещения.

В экспериментальном ЛИДАРе использовался эксимерный лазер (EMG201E) на фтористом криптоне, работающий на длинах волн 248 и 277 нм импульсами мощностью более 0,5 Дж с расхождением луча, не превышающим 0,5 мрад. В качестве оптической системы ЛИДАРа применялся параболический телескоп диаметром 40 см с тремя диэлектрическими зеркалами и оптическим разделителем луча. Последний позволяет одновременно с помощью фотометров выделять отраженный (на длине волны лазерного излучения) и флуоресцентный (280—360 нм) сигналы.

В ходе подготовки к полевым испытаниям была проведена лабораторная калибровка ЛИДАРа по клеткам и спорам Bacillus globiggi, помещенным в физиологический раствор. Было установлено, что наибольшая разрешающая способность достигается при длине волны лазера 248 нм, которой соответствует флуоресцентное излучение у клеток Bacillus globiggi в диапазоне 290—350 нм (с максимумом на 310 нм) и спор этих же микроорганизмов — 330—400 нм (с максимумом на 360 нм). По калибровочным данным были подобраны

спектральные фильтры для фотометров телескопа, рассчитанных на спектры флуоресценции задействованных в испытаниях имитаторов биологических агентов.

При проведении полевых испытаний на открытой местности использовались стационарная система пробоотборников для контроля инструментальных измерений, лидарный комплекс и генератор биологического аэрозоля. В качестве имитаторов биологических агентов применялись очищенные от питательной среды клетки и споры Bacillus globiggi и Bacillus thuringinesis в физиологическом растворе. Облако аэрозоля создавалось на расстоянии 300 м от площадки с пробоотборниками перемещающимся генератором с выводом рабочей смеси 0,2 л/мин. Лазером велась постоянная корректировка положения автомобиля с аэрозольным генератором для того, чтобы создаваемое облако проходило над пробоотборниками независимо от направления ветра. Обработка данных, а также управление ЛИДАРом и полигонным оборудованием осуществлялись с помощью ЭВМ типа VAX, выдававшей требуемую информацию на телевизионные мониторы, принтеры и графопостроитель в реальном масштабе времени.

Испытаниям предшествовало определение реальной концентрации аэрозоля с помощью сети пробоотборников (посредством вакуумного отбора проб воздуха заданного объема с последующим подсчетом плотности выросших микробных колоний) и лазерного счетчика аэрозольных частиц в целях калибровки ЛИДАРа. Проведена серия замеров общего фонового излучения и сигналов от пылевых облаков, промышленных и автомобильных источников загрязнения атмосферы, естественных облаков и тумана, строений, деревьев и других элементов местности. Излучение от указанных объектов принципиально отличалось от флуоресценции биологического аэрозоля, которая по мощности значительно превышала отраженный сигнал.

Основной объем исследований с биологическими аэрозолями проводился в светлое время суток при скорости ветра 2—4 м/с на удалении ЛИДАРа от контрольной площадки 600 м. Создавались различные концентрации аэрозоля. В одном литре воздуха содержалось от 300 до 600 аэрозольных частиц, на каждую из которых приходилось в среднем 20 микробных единиц. В ходе экспериментов на терминалах ЭВМ фиксировались две кривые, отображающие интенсивность флуоресцентного и рассеянного излучений. Флуоресценция биологических частиц, возбужденных лучом лазера, характеризовалась выраженным пиком, в то время как интенсивность рассеянного излучения на той же дальности была близка к порогу чувствительности прибора. Соотношение флуоресцентного сигнала, полученного от единичного импульса, к уровню фона на расстоянии 600 м при концентрации аэрозоля 300 частиц на литр составляло 2:1. При 10 последовательных лазерных импульсах с удалением аэрозольного облака (концентрацией 500 частиц/л) 1200 м это соотношение равнялось 3:1, что свидетельствовало о достаточных возможностях аппаратуры по обнаружению микроорганизмов. Американским специалистам удалось выявить на дистанции более 1200 м наличие в атмосфере споровых форм бактерий при концентрации аэрозоля 6 спор в одном кубическом сантиметре.

По мнению разработчиков, накопление базы данных ЭВМ об атмосферных параметрах и характеристиках различных аэрозолей, получаемых с помощью ЛИДАРа, а также совершенствование аппаратуры, включая улучшение сопряжения лазера с телескопом, позволяют увеличить радиус действия созданной установки до 2 км.

Лидарный комплекс выполнен в мобильном варианте с размещением всего оборудования на одном грузовике. Источником питания являлся дизельный электрогенератор мощностью 12,5 кВт. В испытаниях подтверждены хорошие эксплуатационные характеристики комплекса. Его подготовка к длительному (более 1000 км) маршу двумя операторами занимает 3 часа, а развертывание в конечном пункте — 2 часа. При перемещении комплекса на небольшие расстояния для его развертывания требуется менее 20 минут.

Проведенные испытания лидарного комплекса, работающего в ультрафиолетовом диапазоне волн, свидетельствуют о продвижении в США работ по созданию качественно новой системы раннего обнаружения и оповещения о применении биологических поражающих агентов. По мнению американских специалистов, осуществленный этап НИОКР позволит разработать на базе созданной модели прототип войскового мобильного лидарного комплекса. Учитывая ранее проведенные в Лос-Аламосской лаборатории эксперименты по обнаружению

с помощью ЛИДАРа этого же диапазона волн химических отравляющих веществ, можно ожидать появление в ближайшей перспективе в США универсального прибора химической и биологической разведки.

Важную роль в обеззараживании воды играют окислители: диоксид хлора, озон, хлор. Сравнительный анализ эффективности их действия показан на рис. 7.1.

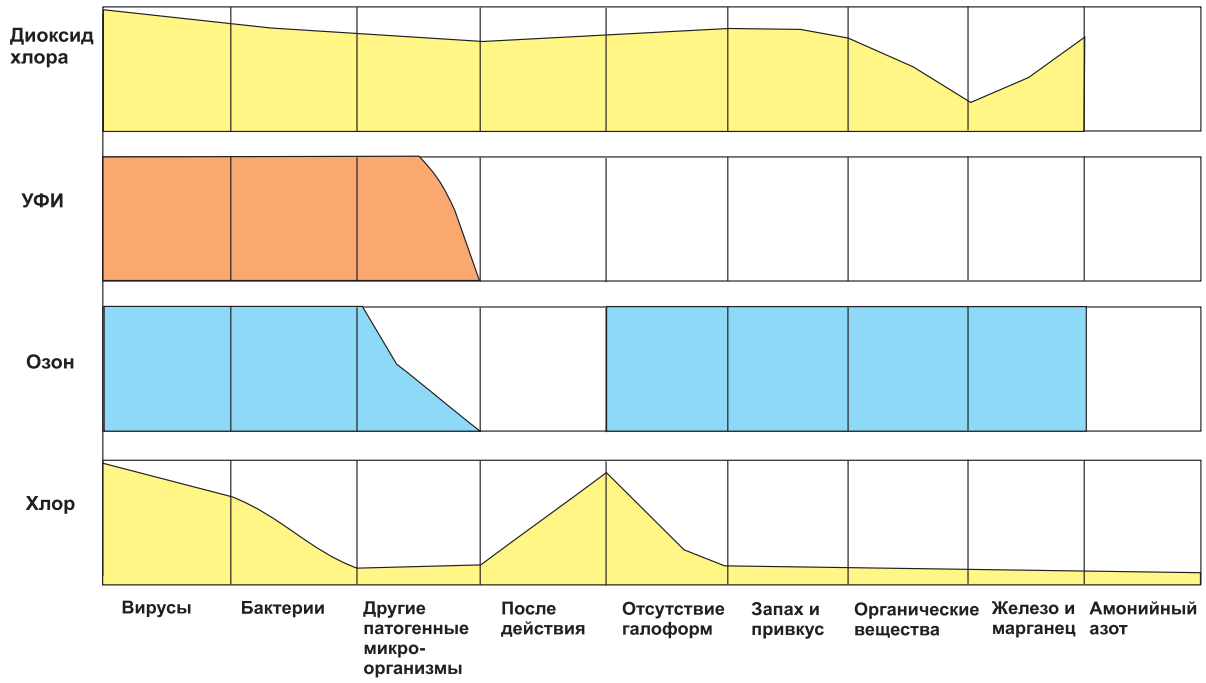



Рис. 7.1. Сравнительный анализ эффективности действия и преимущества основных окислителей в воде

Корпорацией по разработке средств водоснабжения — General Water Development Corporation (Шаан, Лихтенштейн) создана установка нового типа для обеззараживания воды методом анодного окисления. Она предназначена для получения питьевой воды из открытых водоисточников и обеспечивает ее хранение в течение 5 лет.



Фото. Мобильная установка для очистки воды ОВ, БС

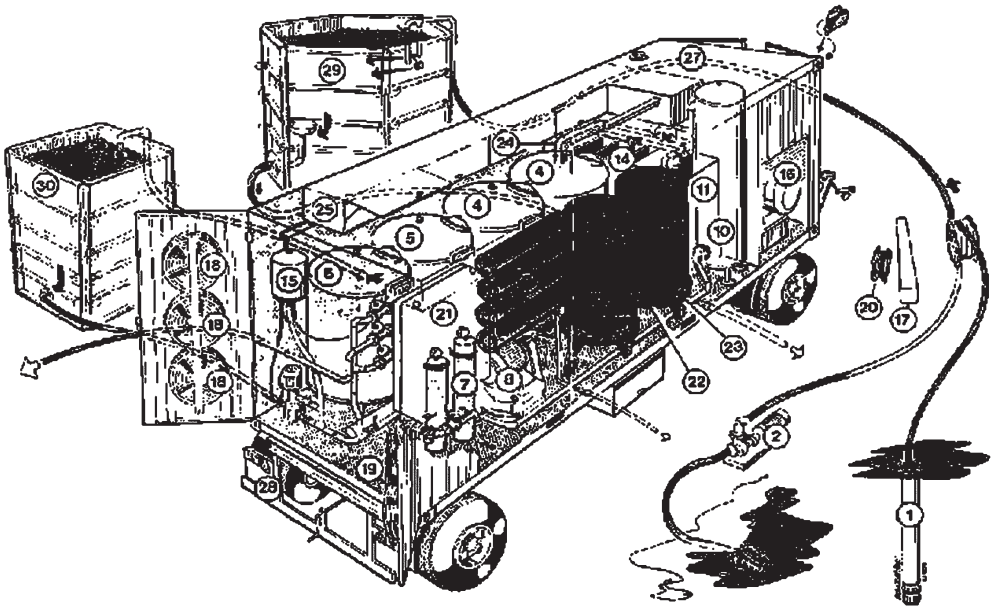


Рис. 7.2. Мобильная установка для очистки воды ОВ, БС




Фото. Мобильная установка для очистки воды ОВ, БС




Фото. Мобильная установка для очистки воды ОВ, БС

Метод обеззараживания путем анодного окисления основан на принципе электрохимической реакции, в результате которой на границе среды анод-электролит образуются ионы кислорода различной степени устойчивости, разрушающие оболочные структуры бактерий и вирусов, чем обеспечивается длительное хранение воды. Метод обладает высокой степенью надежности и не требует дополнительного применения каких-либо химических препаратов, приводящих к быстрому износу технологического оборудования и возникновению побочных явлений у человека при потреблении воды для питья.

Установка смонтирована в специальном контейнере и состоит из реактора анодного окисления, источника постоянного электрического тока, пульта управления и системы трубопроводов, фильтров и клапанов для подачи, предварительной очистки и распределения воды. Контейнер с оборудованием приспособлен для установки на шасси грузового автомобиля.

**Тактико-технические характеристики установки**

| | |
|---|---|
| Производительность: | |
| установки | 3000 л/ч |
| упаковочной машины | 2000 пакетов в час |
| Размеры: | |
| длина | 6100 мм |
| ширина | 2440 мм |
| высота | 2590 мм |
| Максимальная мощность двигателя | 14 кВт |
| Расход электроэнергии на 1000 л | 0,02—0,1 кВт•ч |

Процесс обеззараживания полностью автоматизирован, контроль за его ходом осуществляется с помощью микропроцессора. Установка проста в эксплуатации, экономична и обеспечивает получение воды, соответствующей существующим стандартам. В качестве источника питания используется трехфазный дизельный генератор.

Упаковочная машина осуществляет расфасовку воды в индивидуальные пакеты объемом $0,2-1,5$ л$^3$. Пакеты изготовлены из специальной газонепроницаемой пятислойной синтетической пленки (масса одного квадратного метра пленки 112 г) и выдерживают нагрузку до 80 кг. Срок хранения питьевой воды в индивидуальном пакете — 5 лет.

Специалистами корпорации разработаны различные, в том числе стационарные, варианты установок производительностью до 1000 тыс. л/ч, которые могут использоваться в различных климатических условиях. Срок эксплуатации — не менее 15 лет.

По мнению военных эпидемиологов, мобильный вариант установки анодного окисления, предназначенной для использования в пунктах полевого водоснабжения войск, может также применяться в эпидемических очагах и зонах биологического заражения.

Специалистами отдела токсикологии института инфекционных болезней сухопутных войск (СВ) США (Форт-Детрик, шт. Мэриленд) в рамках работ по совершенствованию токсинного оружия проводятся исследования ядов природного происхождения. Одним из направлений этих работ является определение иммуногенных особенностей наиболее активных компонентов некоторых змеиных ядов, представляющих, по мнению американских специалистов, перспективную группу биологических поражающих агентов, превосходящих по эффективности боевого применения табельные токсины.

Изучение механизма действия змеиных ядов показало, что они обладают избирательным воздействием на центральную нервную систему человека благодаря выраженному тропизму по отношению к нервной ткани. Сравнительная токсикологическая оценка отдельных компонентов ядов на органо-системном, клеточном и молекулярном уровнях свидетельствовала о наибольшей токсичности пептидов класса фосфолипаза-$А_2$. Результаты лабораторных испытаний показали высокую эффективность их применения в аэрозольной форме. Токсины этой группы, имеющие, по американской оценке, наибольшее прикладное значение, приведены ниже (табл. 7.4).

Одновременно с изучением токсичности осуществлялись разработки способов индикации биологически активных компонентов змеиных ядов, а также средств медицинской защиты, основанных на нейтрализации ядов антитоксическими сыворотками.

С этой целью специалистами института методом жидкостной хроматографии под давлением с последующим электрофорезом в геле производилась очистка фосфолипазы-$А_2$ нейротоксинов от примесей, конечный продукт содержал не менее 95 % нейротоксина. Антисыворотку к каждому выделенному токсину получали путем гипериммунизации кроликов в дозах от 10 до 100 мкг. Методами иммунодиффузии и электрофореза подтверждено появление иммунного ответа, пик которого регистрировался спустя 6—8 недель после введения антигена. Выявление антигенных особенностей токсинов осуществлялось постановкой реакции ELISA с гомологичными антисыворотками. Результаты свидетельствовали о значительном сходстве величин иммуногенности всех исследуемых ядов, а также о наличии перекрестной активности их антисывороток в широком диапазоне. По мнению американских ученых, эффект кросс-нейтрализации связан с наличием в структуре фосфолипаза-$А_2$ нейротоксинов однородных эпитопов, что позволяет одной антисыворотке нейтрализовывать несколько типов различных токсинов этой группы. Так, сыворотка против текстилотоксина полностью защищает лабораторных животных от нотексина, тайпоксина и текстилотоксина, введенных в организм в дозах 3,50 и 1000 $ЛД_{50}$ соответственно. Расчеты показывают, что эквивалентное количество текстилотоксиновой антисыворотки нейтрализует две молекулы тайпотоксина, три молекулы нотексина и 10 текстилотоксина.

Перекрестную активность во время проведения опытов в различной степени продемонстрировали и все другие сыворотки. Однако попытки подобрать универсальный препарат для индикации всего спектра фосфолипаза-$А_2$ нейротоксинов оказались безуспешными, поскольку, как было установлено, изучаемые группы относятся к разным серогруппам. В ходе дальнейших исследований были наработаны сыворотки для каждого сероварианта токсинов и продемонстрирована их высокая нейтрализующая активность. В то же время оказалось, что серийное производство средств индикации и медицинской защиты на основе поликлональных антител является трудоемким и дорогостоящим процессом, поэтому американские ученые приступили к созданию моноклонов и к настоящему времени получили свыше 50 клеточных линий к 7 изучаемым токсинам.

Дальнейшие исследования направлены на создание моноклональных антител ко всем фосфолипаза-$А_2$ нейротоксинам, имеющим прикладное значение.

Подобный подход, по мнению американских специалистов, позволит создать наборы для индикации токсинов в полевых условиях. Ожидается также, что проводимые работы

в перспективе приведут к созданию лечебных антитоксических типоспецифических сывороток и позволят приступить к разработке средств вакцинопрофилактики поражений токсинами природного происхождения.

Таблица 7.4

**Перечень фосфолипаза-$A_2$ нейротоксинов**

| Название токсина | Название змеи — продуцента яда | Молекулярная масса, (кДал) | Количество пептидных цепей | Смертельная доза для мышей $ЛД_{50}$, (мкг/кг) |
|---|---|---|---|---|
| Тайпоксин | Тайпан | 40 | 3 | 2 |
| В-бунгаротоксин | Полосатый крайт | 20 | 2 | 20 |
| Кротоксин | Южноамериканская гремучая змея | 20 | 2 | 50 |
| Моджавитоксин | Гремучая змея Mojave | 20 | 2 | 30 |
| Конколортоксин | Карликовая гремучая змея | 20 | 2 | 45 |
| Нотексин | Тигровая змея | 14 | 1 | 17 |
| Аммодитоксин | Европейская гадюка | 14 | 1 | 20 |
| Атрокстоксин | Западная гремучая змея | 14 | 1 | — |
| Вергандистоксин | Южноамериканская гремучая змея | 14 | 1 | 50 |
| Атратоксин | Южноазиатская кобра | 14 | 1 | 5000 |
| Каудоксин | Рогатая гадюка | 14 | 1 | 180 |
| Текстилотоксин | Коричневая змея | 80 | 4 | 1 |
| Псеудексин | Австралийский черный полоз Pseudechis porphyriacus | 14 | 1 | 1250 |

В медицинском научно-исследовательском институте инфекционных болезней сухопутных войск США (Форт-Детрик, шт. Мэриленд) в рамках программы исследования токсинов природного происхождения ведется изучение яда скорпионов. В работах принимают участие специалисты университета г. Марсель (Франция).

Число ядов, выделенных к настоящему времени от 600 известных разновидностей этих членистоногих, превысило 90. Являясь белками с низкой молекулярной массой (около 7 кДал), они имеют в своем составе короткую цепь из 60—65 аминокислотных оснований, плотно упакованную четырьмя дисульфидными мостиками. Нейротоксины скорпионов блокируют потенциал-зависимые натриевые каналы нервных и мышечных клеток, что ведет к нарушению ионного обмена и падению мембранного потенциала. Поражаются преимущественно клетки периферической нервной системы с одновременным высвобождением значительного количества медиаторов (ацетилхолин и катехоламины). Чаще всего смерть под действием этих ядов наступает от паралича дыхательной мускулатуры и отека легких. Токсичность их весьма вариабельна.

По механизму поражения потенциал-зависимых натриевых каналов нейротоксины подразделяются на (альфа), (бета), (гамма). Американские специалисты исследовали яд скорпиона Androctonus australis Hector (AaH). На первом этапе, используя высокопроизводительную жидкостную хроматографию, удалось выделить четыре его фракции, относящиеся к (гамма)-токсинам: AaH I, AaH II, AaH III и AaH IV. Половинная летальная доза ($ЛД_{50}$) каждого из них отличалась друг от друга. Наиболее токсичным из них считается компонент AaH II. Его $ЛД_{50}$ для мышей при подкожном введении составляет 9,4 мкг/кг, в то время как $ЛД_{50}$ другого компонента AaH IV равнялась 122,5 мкг/кг.

Кроме того, $ЛД_{50}$ в значительной степени зависит от способа введения токсина. Некоторые данные по этому вопросу приведены в таблице 7.5.

На втором этапе исследований для определения гена, кодирующего наиболее токсичную фракцию яда, ткань железы, секретирующей яд, гомогенезировали и с помощью хроматографии в олиготимидин-целлюлозе получали очищенную от примесей мРНК, содержащую информацию о гене, отвечающем за выработку нейротоксина AaH II. Далее с мРНК была синтезирована комплементарная копия ДНК (кДНК), которую встраивали в плазмиду DCDV-1 и клонировали с помощью кишечной палочки. Рестрикционный анализ клонированной кДНК с использованием ферментов Pst 1 и BambH 1 показал, что она содержит около 500 пар оснований.

Таблица 7.5

**Зависимость величины $ЛД_{50}$ выделенных нейротоксинов от способа введения мышам**

| Способ введения токсина мышам | Величина $ЛД_{50}$ исследуемых нейротоксинов, мкг/кг | | | |
|---|---|---|---|---|
| | AaH I | AaH II | AaH III | AaH IV |
| В желудочки головного мозга | 0,5 | 0,025 | 0,35 | 0,9 |
| Подкожно | 17,5 | 9,4 | 24,0 | 122,5 |

Для синтеза нейротоксина AaH II плазмиду pcD-403 включили в геном клеток почки обезьян (культура COS-7). Максимальное выделение токсина наблюдалось на шестой день и составляло 0,2 мкг на $10^6$ клеток культуры. Далее методом ELISA было установлено, что синтезированные токсины связываются с поликлональными антителами, наработанными к исходному нейротоксину AaH II, и также способны блокировать натриевые каналы. При введении их животным $ЛД_{50}$ оказались приблизительно одинаковыми (0,3 нг/мышь — для искусственно синтезированных и 0,5 нг/мышь — для исходных). Дальнейшее сравнение свойств нейротоксинов подтвердило их сходство.

Проводимые в США НИОКР по исследованию структуры биологически активных компонентов природных ядов и механизма их действия, а также формирование библиотеки генов нейротоксинов свидетельствуют о продолжении работ, направленных на получение новых агентов токсинного оружия и создание технологии их наработки.

В научно-исследовательском институте инфекционных болезней сухопутных войск (СВ) США — USAMRIID (Форт-Детрик, шт. Мэриленд) в рамках программы противобиологической защиты проводятся многоплановые исследования ядов природного происхождения. Рассматривая высокотоксичные компоненты ядов некоторых видов животных в качестве потенциальных агентов токсинного оружия, специалисты института разрабатывают методы их искусственного синтеза. Основной целью проводимых работ является создание технологии промышленной наработки биологических поражающих агентов, превосходящих по токсичности химические отравляющие вещества. Отсутствие табельных средств индикации этих соединений и препаратов специфической профилактики и лечения поражений определяет потенциально высокую боевую эффективность их широкомасштабного и диверсионного применения.

Животные яды отличаются большим разнообразием в происхождении, механизме действия и структуре и представляют собой большую группу пептидов, синтезируемых различными видами живых организмов. В целях упорядочения исследовательских работ

американские военные специалисты применяют разработанную ими классификацию исследуемых агентов, в которой яды по механизму фармакологического действия делятся на:

— нейротоксины;
— мембранно-активные вещества;
— цитотоксические вещества.

Нейротоксины, являясь наиболее многочисленной и значимой группой, обладают способностью препятствовать прохождению импульса в нервных окончаниях. Изменяя проводимость ионных каналов, а также нарушая механизм высвобождения и связывания синаптических медиаторов, нейротоксины парализуют двигательную активность, препятствуют нормальному функционированию органов и систем человека.

Мембранно-активные яды нарушают целостность клеточных и органоидных оболочек, в частности эндотелиальных клеток и форменных элементов крови, что в конечном итоге приводит к гемолизу эритроцитов и кровоизлияниям в тканях.

Механизм действия цитотоксических веществ в основном обусловлен поражением жизнедеятельности клеток и тканей, а также влиянием на факторы свертывающей системы крови человека.

Природные яды представляют собой пептиды с относительно низким молекулярным весом и сложной структурой. Выделение из белковых молекул биологически активных субъединиц и применение генетических методов для их наработки микроорганизмами составляет одно из основных направлений военно-прикладных биотехнологических исследований, проводимых в области токсинного оружия.

Специалисты отдела токсикологии USAMRIID, используя технологию рекомбинантной ДНК, работают над получением штаммов микроорганизмов, способных секретировать в окружающую среду заданные токсины с максимально высоким выходом. При этом используются созданные в институте банки генов, содержащие рекомбинантные клоны с последовательностями ДНК наиболее сильных ядов. В качестве экспрессирующих векторов широко применяются прокариотические бактерии Esherichia coli и Bacillus subtilis. Так, экспрессия синтезированного гена, кодирующего выработку эхистатина (яд гадюки Echis carinatus) в кишечную палочку, обеспечило наработку 1,5 мг чистого токсина на 1 л культуры. Клонирование и экспрессия гена нейротоксина B-1V, ответственного за синтез яда скорпиона Celebratulus Lacteus, позволили наработать 12 мг токсина на 1 л культуры. Наличие в структуре рекомбинантных продуктов некоторых модификаций не оказало влияния на величину специфической токсичности, которая была сопоставима с токсичностью нативного яда.

В то же время в ходе исследований установлено, что прокариотические хозяева не всегда способны обеспечить экспрессию чужеродных генов, а синтезированные ими продукты часто обладают пониженной биологической активностью. Кроме того, бактериальные клетки не способны производить посттрансляционные модификации, такие как гликозилирование, амидирование и фосфорилирование.

Для расширения перечня синтезируемых токсинов американские специалисты используют в качестве других экспрессирующих векторов дрожжевые клетки Sacharomyces cerevisial, вирус осповакцины, а также клеточные линии некоторых млекопитающих. В частности, культура клеток COS-7 почечной ткани обезьян использовалась для получения аналога яда скорпиона Androctonus australis Hector (AaH). Выход рекомбинантного продукта, идентичного природному яду, составил 0,2 мкг на 10(6) клеток. В последующем синтетический ген этого токсина был вставлен в плазмиду pAC 380. При этом последовательность мономерных остатков, кодирующая сигнальный пептид человеческого интерлейкина-2, была соединена с геном токсина. Полученная конструкция была последовательно клонирована в плазмиду pMSV, содержащую всю провирусную последовательность возбудителя мышиной саркомы. Полученная в результате этих работ плазмида, получившая обозначение pMSV-IT, определила экспрессию токсина скорпиона мышиными фибробластовыми клетками.

По результатам проведенных работ американские военные специалисты делают вывод о необходимости продолжения исследований в области молекулярной биологии природных ядов, основным направлением которых считается совершенствование технологий наработки значительных объемов синтезируемых агентов.

В то же время, по имеющимся сведениям, под давлением представителей Фонда экономических тенденций, объединившего сторонников защиты окружающей среды в США, было принято юридическое соглашение, которое обязывает министерство обороны (МО) США обнародовать детали одного из самых засекреченных исследований по созданию биологического оружия.

По условиям соглашения МО должно изучить влияние на здоровье людей и окружающую среду исследований по всем проектам, проводимым в рамках Программы биологической обороны, включая и те, в которых заняты ведущие университеты, и подготовить подробный отчет.

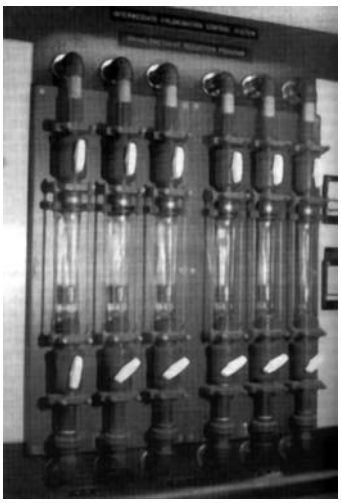
МО должно оценить вероятность утечки патогенных бактерий, мероприятия по срочной эвакуации населения, карантинное и медицинское обслуживание работников исследовательских лабораторий и жителей близлежащих районов, а также обнародовать меры безопасности для предотвращения саботажа и террористических актов. По законам США все эти меры должны быть известны общественности. Кроме того, МО должно проинформировать Фонд о проектах, которые оно планирует исключить из этого списка, с указанием типа болезнетворных бактерий или вирусов и описанием экспериментов.

Исследования по Программе биологической обороны значительно расширились в последнее десятилетие. В Программе принимают участие более 100 исследовательских центров США. Мы как специалисты водоснабжения в Украине не только должны иметь этот набор информации, но создавать системы быстрого обнаружения ОВ, БС и РВ для упреждения и повышения безопасности водообеспечения городов.

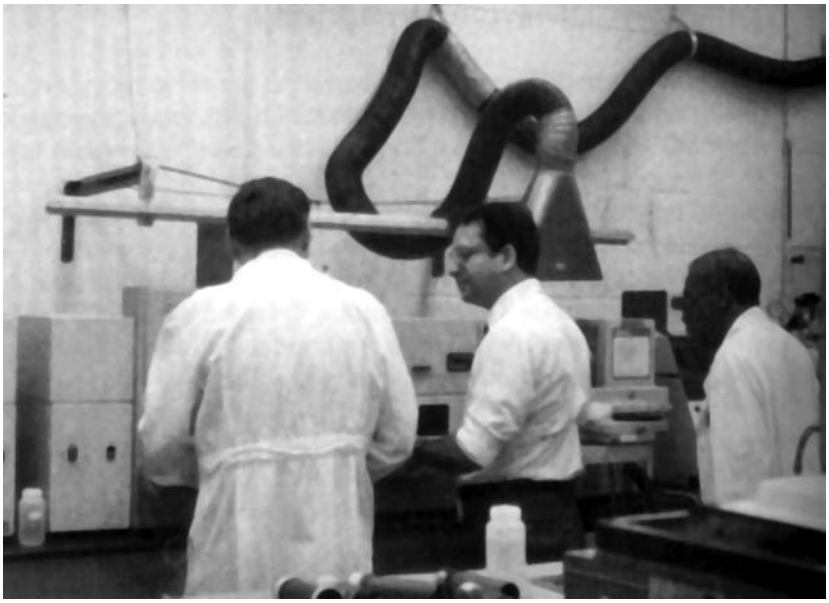
Обеспечение населения качественной питьевой водой, санитарно-гигиеническое обслуживание и постоянная готовность защитить воду, подаваемую населению и народному хозяйству в экстремальных условиях, при загрязнении источников водоснабжения, а также в случае химико-биологического терроризма, обеспечение постоянной мобилизационной готовности служб водоснабжения — приоритетные социальные, экономические и политические задачи, которые входят (по степени контроля директивных органов в странах) в особый раздел военных и оборонных доктрин всех цивилизованных государств мира. (Для справки: 100 граммов растворимого диоксина в воде способны уничтожить 14 миллионов человек, 1 грамм ботулина — 8 миллионов человек. Существуют десятки и других веществ, в том числе так называемые малодозируемые, способные постепенно через воду за 7—9 месяцев уничтожить людей в «планируемых» регионах и т.д.). На основании личных наблюдений, исследований, анализа состава сооружений и приборного парка водоснабжения в Японии, Франции, Германии, США, Италии, Англии и в других странах убедился, что все они владеют полным набором автоматических и тестовых систем обнаружения современного химико-биологического поражения источников водоснабжения, построили и продолжают строить принципиально новые, в отличие от СНГ, системы кондиционирования воды с оперативным управлением водоснабжением, имея при этом различные организационные структуры управления. Эти государства имеют высочайшую мобилизационную готовность, проводят специальную подготовку кадров.



Газовая хроматография для исследования питьевой воды



Лабораторное оборудование для анализа тригалометанов в воде (США)



Спектрофотометр, оборудованный термостатом
(химическая лаборатория Департамента здравоохранения г. Нью-Йорка)

Они располагают не только мощным оборудованием для контроля качества воды, но и резервом водообеспечения, с автономным энергоснабжением, для экстремальных условий — собственными законсервированными за чертой городов цехами по выпуску пакетированной и бутылированной воды, водоснабжающими туннелями, специальными резервуарами воды в горах и т.д. Вопросы мобилизационной готовности не афишируются, не разглашаются, но на международных выставках и конгрессах по водоснабжению профессионалы этой отрасли могут достаточно быстро сделать соответствующие выводы о мобилизационной готовности, просмотрев выставочные образцы приборов, материалов, реагентов, схемы состава сооружений, систем кондиционирования воды и т.д. Посещая объекты водоснабжения городов США и других стран НАТО, их водозаборы, системы кондиционирования воды, санитарные лаборатории, оценивая условия энергоснабжения, также делаешь вывод, что готовность системы обеспечения безопасности водоснабжения, ее надежность, устойчивость и мобилизационная готовность значительно выше, чем в странах СНГ.

В части обеспечения водой, в условиях загрязненных поверхностных источников водоснабжения, наша Украина, в отличие от России, может быть отнесена к государствам с экстремальными условиями водоснабжения населения. Из поверхностных водных ресурсов, используемых для водообеспечения городов и населенных пунктов Украины, 88 % имеют индекс загрязнения 4—6 класса (загрязненная или грязная вода). В результате катастрофы на Чернобыльской АЭС в 1986 году в атмосферу был неоднократно выброшен большой спектр не только коротко-, но и долгоживущих радионуклидов. Под влиянием географических и климатических условий они переносились и транспортировались в различных направлениях. Происходило загрязнение различного уровня не только земли, но и наших поверхностных источников водоснабжения. А это означает, что сооружения, построенные на днепровском источнике водоснабжения городов Украины, требуют значительных затрат на их реконструкцию и изменение состава сооружений кондиционирования воды.

Возраст радиобиологии как науки невелик для того, чтобы она могла адекватно определить степень влияния с течением времени различных загрязняющих веществ, присутствующих в воде в результате аварии на ЧАЭС, на генетический аппарат человека, на наследственность. И в то же время, в связи с очевидностью существования тесной корреляционной связи между сердечно-сосудистыми, инфекционными, онкологическими заболеваниями, употребляемой водой и фатальными последствиями для человека, на мой

взгляд, с учетом экологических условий Украины, назрела необходимость усиления прямого организационного и технического государственного управления водными ресурсами, водообеспечением, водоотведением, водоохраной и недопущения разобщенных и нескоординированных подходов в развитии водоснабжения городов. Эти меры обеспечат развитие экономики и укрепление безопасности водообеспечения нашего населения. Системы водообеспечения должны финансироваться по мобилизационной готовности централизованным органом, как в США и других странах НАТО, и это должно быть отражено в военной доктрине Украины. Отмечу, что системы водоснабжения государств СНГ не могут служить Украине примером по уровню безопасности и устойчивости, так как существенно отстают от современных систем водоснабжения государств блока НАТО. Вот почему Украине необходим прорыв и к высокоэффективным технологиям, и к современным методам управления водоснабжением городов, принимая за эталон страны блока НАТО.

Водопроводно-канализационное хозяйство Украины имеет свои отличительные особенности и работает в условиях загрязненных источников водоснабжения, в том числе и вследствие аварии на ЧАЭС. Барьерная роль очистных водопроводных сооружений в городах Украины ограничена и не случайно дефицит питьевой воды, использование слабо контролируемых источников водоснабжения являются одной из причин вспышек гепатита А, которые в последние годы имели место в Украине.

Водопроводные очистные сооружения, которые проектировались и строились в соответствии с ранее действующими нормативами, сегодня без применения новых высокоэффективных технологических решений и реагентов уже не в состоянии препятствовать поступлению в питьевую воду химических соединений, что представляет реальную угрозу здоровью народа Украины.

Почти половина воды даже из подземных загрязненных источников сегодня подается коммунальными водопроводами с отклонениями от требований стандарта по общей жесткости, содержанию сухого остатка, железа, марганца, фтора, нитратов и соединений аммиака. Свыше 80 % сельского населения пользуются водой из колодцев или индивидуальных скважин, большая часть которых находится в неудовлетворительном санитарно-гигиеническом состоянии.

В Украине также отсутствуют экономически приемлемые технологии кондиционирования подземных вод, за исключением обезжелезивания и в какой-то мере удаления марганца.

Чистая вода — это здоровье нации и ее полноценный генофонд. Этот принцип исповедуется всеми цивилизованными странами мира. К сожалению, Украина не в состоянии затратить большие средства, чтобы обеспечить высокие требования к качеству питьевой воды, которые существуют, например, в Германии по стандарту DIN-2000. Поиск решения этих проблем должен быть активизирован.

Планирование водоснабжения населенных мест является существенным фактором в осуществлении общенациональных задач социального и экономического развития, сохранения и улучшения состояния окружающей среды и государственной безопасности водообеспечения народа. Функциональной задачей планирования является распределение денежных средств из бюджетов районов, городов, областей и государства на цели водообеспечения населения в зависимости от масштабов строительства и территорий, использования тех или иных речных бассейнов. Исполнительная власть обязана способствовать разработке и реализации национальной политики в водообеспечении населения, обеспечивать финансирование и эффективное выполнение всего объема задач технической политики водохозяйственного комплекса и экологии.

К ним относятся:

— строительство и наращивание мощностей, распределение и надлежащее использование водных ресурсов и обеспечение водоснабжения с учетом высокой мобилизационной готовности;

— восстановление и поддержание на своих территориях естественного богатства внутренних водоемов и вод;

— обогащение и сохранение зон отдыха, связанных с внутренними водоёмами, борьба с паводком и т.д.

Специалисты водоснабжения в силу вышеизложенных обстоятельств и в связи с ограниченностью капитальных вложений будут вынуждены для обеспечения "выживаемости" более энергично проявлять инициативу и осуществлять меры, направленные на совершенствование и интенсификацию процессов кондиционирования воды, водо- и энергосбережение и т.д. Это даст возможность без больших затрат обеспечить население дополнительным количеством питьевой воды. Будут создаваться определенные условия и для развития экономики водопровода. И здесь, рассматривая проблемы экономики и качества питьевой воды, получаемой из поверхностных источников, мы особое внимание уделяем проблеме сооружений кондиционирования воды. И это не случайно. Система кондиционирования воды всегда была и остается важнейшей в получении конечного качественного продукта — воды питьевой.

Главное внимание должно уделяться и проблемам, которые способствовали бы выявлению новых резервов, включая поиск путей и возможностей не только для наилучшей санитарно-гигиенической эксплуатации уже построенных сооружений, но и системы экологической защиты водозаборных сооружений, источников водоснабжения. Каждый источник водоснабжения населения должен оцениваться на основе присущих ему индивидуальных свойств физико-химического, гидробиологического и бактериологического качества воды. Определяя перспективу проектного состава сооружений водопровода, важно, чтобы основные критерии для водоснабжения городов и требования к источнику воды были установлены заранее. Нужно учитывать возможное ухудшение качества исходной воды (сырой) в течение не менее 25—30 лет. При разработке проекта развернутой схемы кондиционирования воды такие меры позволят повысить надежность и безопасность водообеспечения населения в течение времени эксплуатации этих сооружений. Подтверждением этому является сама жизнь, сегодняшнее состояние экосистемы. Ухудшение качества воды источников водоснабжения уже приводит к существенным негативным изменениям спектра качества питьевых вод, прошедших очистные сооружения по многочисленным показателям как физическим, химическим, так и бактериологическим при отсутствии дезинфекции воды. Ухудшение качества исходной воды влечет за собой дополнительные затраты на модернизацию и реконструкцию действующих сооружений. Квалифицированная оценка проблем в водоснабжении городов, поиск решения постоянно возникающих задач зависит от тех, кто занимается эксплуатацией и проектированием систем водоснабжения, от уровня их информированности, знаний, компетентности. Это, в свою очередь, требует постоянной работы в деле подготовки и повышения квалификации специалистов водоснабжения. И действительно, согласитесь, меры по повышению квалификации специалистов водоснабжения необходимы, так как надежное, устойчивое и безопасное водоснабжение населенных пунктов является одним из наиболее актуальных критериев в деятельности людей, занимающихся водообеспечением городов. От действия этих людей зависит и комплексный подход к сбережению ресурсов воды, энергии, реагентов, снижение материалоёмкости труда в других отраслях, работающих для обеспечения развития и устойчивости водоснабжения городов, снижение вероятности возникновения рисков в безопасности водоснабжения, обеспечение мобилизационной готовности, чтобы противостоять экстремизму и международному терроризму на объектах водоснабжения!

Водоснабженцам всегда нужны единомышленники в улучшении окружающей среды обитания человека. Вместе с тем, людей не надо обременять информацией о повседневных проблемах в системах водоснабжения. Более того, любая информация может быть использована для химико-бактериологического терроризма. Население нужно своевременно информировать только тогда, когда возникает потребность в изменении подачи воды, отключениях системы, а также предупреждать о необходимости профилактического кипячения воды перед употреблением при возникновении экстремальных условий и т.д.

В ближайшие годы при осуществлении социально-рыночных реформ в СНГ возникнут процессы, которые затронут системы водоснабжения, включая передачу предприятий в концессию, привлечение инвестиций по системе BOOT (build-own-operate-transfer — строительство-владение-эксплуатация-передача), причем последнее более выгодно для больших городов. Растущая конкуренция и поиск новых экономических форм организации

водоснабжения внесут изменения и в саму систему управления водоснабжением. Например, в США, Германии стали практиковать разделение служб, связанных с водообеспечением и канализацией. Одни службы занимаются эксплуатацией, другие, на конкурсной основе по договору с эксплуатационными службами, осуществляют ремонтные работы, сервисное обслуживание по наладке, строят системы водоснабжения. Во Франции эти функции совмещены. Как правило, в особых случаях службы нанимают по контракту высококвалифицированных специалистов для проведения определенных видов работ или консультаций. В США и других странах блока НАТО, в условиях существования различных форм собственности предприятий водоснабжения, вопросам безопасности водоснабжения уделяется особое внимание.

В США 52509 коммунальных систем водоснабжения, из которых более половины – частные. Но частные системы водоснабжения подают воду лишь 15 % населения страны, остальные 85 % населения пользуются услугами государственных служб водоснабжения. В Австралии, Латинской Америке водопроводные предприятия передаются в концессию, используя в основном французскую модель. Частные компании во Франции распределяют более 3/4 питьевой воды и обеспечивают водой около 42 млн человек. Как правило, у частных компаний водоснабжения вода почти на 40 % дороже поставляемой государственными компаниями. В Бостоне (США) оплата за воду и канализацию на одного человека составляет (в среднем) 545 долларов в год. На Восточном побережье США обычная семья в 2005 г. платила за услуги водоснабжения и канализации от 30 до 70 долларов США в месяц.

По данным исследования, проведенного компанией «NUS consulting» (январь 2006 г.), средний тариф на воду и канализацию во Франции составлял 3,02 евро за куб. м. Согласно данным этого исследования средний тариф на воду (без канализации) во Франции равнялся 1,58 доллара США, что делало Францию пятой наиболее дорогой страной в Европе по стоимости воды из 14 стран, участвовавших в исследовании.

В 14 странах, которые в основном являлись членами ОЭСР (Организация по экономическому сотрудничеству и развитию), тарифы без НДС колебались от 0,66 доллара США за куб. м в США до эквивалента 2,25 доллара США за куб. м в Дании. Однако следует отметить, что потребление воды в США и Канаде (в которых существуют более низкие тарифы) гораздо выше, чем во Франции, в Германии же (где существуют более высокие тарифы) – ниже. Таким образом, счета за воду в жилищном секторе могут быть весьма схожими, даже несмотря на разницу в тарифах.

По результатам исследования, которое проводилось по заказу Германской ассоциации водной индустрии BGW в 2006 г., средний счет за воду на душу населения составлял 85 евро во Франции, что выше, чем в Германии (82 евро) или Италии (59 евро), но при этом ниже, чем в Англии и Уэльсе (95 евро) (табл. 7.6).

Таблица 7.6

**Сравнение счетов за воду и канализацию за год в четырех странах ЕС**

| | Тариф на воду | Тариф на канализацию | Всего |
|---|---|---|---|
| Германия | 82 евро | 111 евро | 193 евро |
| Англия и Уэльс | 95 евро | 93 евро | 188 евро |
| Франция | 85 евро | 90 евро | 175 евро |
| Италия | 59 евро | 40 евро | 99 евро |

Цены на питьевую воду разнятся между собой не только в странах Европы, Америки, Азии, но и в разных городах в пределах одного государства резко отличаются друг от друга и во многом зависят от состава сооружений систем водоснабжения, удаленности источников от городов и т.д. Сравнивать цены между городами и делать выводы о ценообразовании в водоснабжении в многофакторных условиях производства питьевой воды, её транспортировки, подачи и распределения некорректно.

На протяжении всего периода развития систем водоснабжения населенных мест в СНГ, наряду с высокими требованиями, предъявляемыми к надежности работы сооружений, безопасному качеству транспортируемой воды, специалисты водоснабжения постоянно работают над проблемой снижения себестоимости воды. Поиск путей решения этой проблемы требует все большего внимания и принятия соответствующих мер, особенно в условиях топливно-энергетического дефицита в СНГ, роста цен на энергоносители, реагенты, горюче-смазочные материалы, оборудование, металл, машины, механизмы и пр. Нужно учитывать и влияние дополнительных затрат, которые требуются для обеспечения санитарно-экологической защиты источников водоснабжения и которые отражаются на росте себестоимости воды. Развитие систем водоснабжения городов требует постоянного проведения научно-исследовательских, проектных, строительных работ, а также работ по совершенствованию уровня эксплуатации и обслуживания систем водообеспечения. Во многих городах СНГ уже возникла насущная потребность в реконструкции и модернизации действующего состава сооружений кондиционирования воды. В связи с этим возникнут и новые концепции водоподготовки для водоснабжения населения.

Несомненно, состояние окружающей среды потребует в ближайшие годы создать современную философию водообеспечения, новую продуктивную идеологию в вопросах водо- и энергосбережения, оценки собственных гидроресурсов для получения энергии, культуры эксплуатации и пользования водными ресурсами у населения и т.д. Наряду с вышеизложенным, как показывает опыт развитых стран мира, необходимо проведение работ по оценке качества поверхностных и подземных источников водоснабжения городов на региональном и государственном уровне. Нужно помнить, что у каждого города эта проблема имеет свои особенности, несмотря на то что по технологиям и составу сооружений водоснабжения городов они похожи между собой, но отличаются друг от друга так же, как и ландшафт городов.

Многие из вышеперечисленных проблем должны решаться на региональном уровне управления системой водообеспечения с высоким уровнем ответственности за повседневную мобилизационную готовность систем водоснабжения противостоять воздействию ОВ, БС, РВ.

# ГЛАВА 8

# КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ

## 8.1. ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

Основное назначение системы очистки воды заключается в такой ее обработке, при которой на выходе этой системы будет получена вода экологически чистая и безопасная для потребителя в соответствии с действующим стандартом ГОСТ-2874-82 «Вода питьевая» и принятым в 1996 году ДержСанПіНом «Вода питна».

Вода из артезианских скважин создает ложное представление у потребителя как о чистой воде. И в это действительно можно поверить, если речь идет об органических соединениях, бактериях, вирусах и хлоре. Но вместо них артезианская вода, как правило, насыщена вредными неорганическими элементами, концентрация которых возрастает с увеличением глубины скважины, из которой осуществляется водозабор. В подземных водах можно обнаружить также токсичные вещества, такие как литий, бор, стронций, фтор, барий, алюминий. Суммарный критерий токсичности этих металлов превышает в шесть-восемь раз ПДК (предельно допустимую концентрацию). В воде из родников, используемых населением, можно обнаружить нитраты, селен, кадмий, свинец, которые вызывают дистрофию мышц и печени, поражают почки. В целом любая вода для питья должна изучаться по качеству и обязательно подвергаться очистке.

Из-за сложной экологической обстановки вода как продукт первостепенной важности для здоровья давно переступила барьер дешевого природного сырья и требует применения к себе искусственных мер, чтобы она стала живой и здоровой для человека.

Переход населения СНГ на использование так называемой бутылированной воды, как в США, Европе, Китае, – один из выходов из создавшегося катастрофического положения с питьевой водой. Однако бутылированная вода в СНГ в большей части своей сомнительного качества. В цивилизованных странах давно применяется сеть специализированных фирм, магазинов, производящих и продающих экологически чистую воду для населения как оптом, так и в розницу. Эти воды проверяются на соответствие стандарту и жестко контролируются санитарными службами.

Пришло время и нам навести порядок в Украине, чтобы наш народ, испытавший на себе последствия катастрофы на ЧАЭС, пил высококачественную воду, способствующую укреплению иммунной системы человека.

Ответственность служб водоснабжения перед потребителем можно обобщить следующим образом:

— Вода должна постоянно подаваться в достаточном количестве и с требуемым напором.

— В резервуарах чистой воды, а также в промежуточных точках распределительной системы должно поддерживаться давление воды и расход в пределах общей нормы водообеспечения и не менее 70 % от общей подачи воды в зоны водоснабжения во время больших аварий, больших пожаров или ремонта существующей системы.

— Техническое обслуживание распределительной системы должно планироваться, осуществляться и контролироваться на том же оптимальном уровне, который предусматривался для проектирования, строительства сооружений и эксплуатации очистных сооружений, а также защиты источника воды от случайного загрязнения.

— Руководители районных, городских, областных советов и общественность должны постоянно получать реальную информацию о функционировании жизненно важной службы – водоснабжения. Это необходимо и для обеспечения того, чтобы требуемое финансирование поступало не только для строительства, модернизации и расширения, но также для безопасной эксплуатации, технического обслуживания и контроля всей системы водоснабжения.

— Опыт показывает, что цена литра воды, подаваемой потребителю, увеличивается в связи с ростом затрат на рабочую силу, автоматизацию, лабораторный контроль, усовершенствование системы ПРВ, очистку воды. Поэтому должны быть приняты меры, направленные на устранение потерь воды, утечек и неразрешенного потребления воды. Это достигается путем установки счетчиков у потребителей для измерения подаваемого объема воды, а также посредством ежемесячной оценки неучтенного расхода воды, что позволит оценить всю систему водоснабжения и предпринять меры по её оптимизации.

— Для того чтобы сократить до минимума вероятность возникновения заболеваний, передающихся через воду, а также возможность долгосрочных или хронических воздействий на здоровье человека, воду из поверхностных и подземных источников нужно кондиционировать, чтобы очистить её от загрязняющих веществ или же сократить их содержание до безопасного уровня.

— На объектах водоснабжения контроль качества воды по физическим, химическим, микробиологическим и радионуклидным параметрам должен выполняться ежедневно. Лаборатория, аккредитованная органами Госстандарта и Минздрава, со сложным аналитическим оборудованием должна иметь в своем штате специалиста по сангигиене. Информация по качеству воды должна анализироваться ежедневно, и результаты анализов представляться в аналитических обзорах.

— Ежегодно должны составляться специальные аналитические обзоры для оценки нестандартных и внештатных ситуаций, возникающих в системе водоснабжения в течение года.

— Необходимо осуществлять постоянный контроль нелегальных подключений и качества санитарно-технических работ для защиты распределительной системы от попадания загрязнений в питьевую воду.

— Отлично спроектированная и слаженно работающая система водоснабжения не сможет долго оставаться таковой, если её будет обслуживать некомпетентный персонал, который нарушит правила эксплуатации и обслуживания или проигнорирует информацию об изменениях качества воды. Контроль операторов и лабораторного персонала на предмет образования, опыта, постоянной учебы, включая также этические и профессиональные качества, снижает риск в водообеспечении потребителей.

— Контроль за работой операторов, обслуживающего персонала и сотрудников лабораторий осуществляют руководители предприятий водоснабжения и соответствующих служб. Они должны нести профессиональную ответственность перед потребителями и органами здравоохранения. В их обязанности входит осуществление эффективного надзора за работой персонала и систем, при этом качество воды, давление в системе и непрерывность подачи должны быть в числе основных приоритетов. С учетом требований экономики и технического совершенствования в этой отрасли, необходимо обеспечивать постоянное повышение квалификации работников и их высокий профессионализм.

— Руководитель водоснабжения города, области обязан предоставлять на рассмотрение городского совета, для включения в годовой бюджет, техническую документацию по каждому пункту, требующему финансирования, а также обосновать свои требования относительно фондов капитального строительства программой, по крайней мере, пятилетней модернизации и реконструкции существующих сооружений и финансирования мероприятий, способствующих повышению качества воды.

Обобщая все, что было сказано ранее о профессиональной ответственности в области контроля качества воды, кратко подытожу то, что не должно остаться незамеченным или забытым в лабиринте множества параметров, составляющих эту задачу:

— Адекватный расход и давление воды.

— Соответствующее хранение и стратегическое расположение запасов воды.

— Точный и постоянный контроль, техническое обслуживание распределительной системы, защита источников воды и водозаборных сооружений.

— Минимизация потребления воды на душу населения.

— Удаление или сокращение содержания загрязняющих веществ до безопасного уровня.

— Соответствующее лабораторное оборудование.

— Составление графика и осуществление надзора за оценкой качества воды.

— Осуществление программы предотвращения случайного подключения к водопроводу.

— Постоянное повышение квалификации операторов и обучение технике безопасности обслуживающего персонала.

— Самооценка результатов работы управленческого персонала с акцентированием внимания на вопросах экономики и технического совершенствования.

— Составление точного бюджета, необходимого для водоснабжения города, обоснование фондов капитального строительства для обеспечения качества и количества подаваемой потребителям воды посредством долгосрочного планирования.

К сожалению, немногие города мира природа одарила эталонной чистой водой, имеющей естественные свойства высокого качества, а значит, повышающей и качество жизни человека. Так можно сказать, например, о питьевой воде г. Мюнхена, которая относится к одной из наилучших вод в Европе. Свежая и совершенно без технологической обработки, она течет из водопроводных кранов Мюнхена. Необыкновенное качество питьевой воды в Мюнхене подтверждают результаты химического анализа.

Она пригодна для приготовления питания грудных детей и диетического питания, так как удовлетворяет немецким требованиям к качеству минеральной и столовой воды. Кроме того, питьевая вода Мюнхена имеет лучшие показатели химического состава, чем многие минеральные воды, имеющиеся в продаже.

Инфильтрованная, каптажная мюнхенская вода, рожденная ледниками Альпийских гор, не нуждается в дополнительной подготовке для использования в питьевых и хозяйственно-бытовых целях. Применение каких-либо водопроводных фильтров на выходе водопроводной сети в Мюнхене совершенно излишне, а при неправильной их установке и отсутствии надлежащей гигиены качество питьевой воды может даже ухудшиться.

Таблица 8.1

**Питьевая вода в г. Мюнхене, апрель 2007 г.**

Текущие результаты анализов в целом по городу:

(Лаборатория фирмы SWM Services GmbH,
аккредитована Немецким химическим аккредитационным центром (DACH GmbH)
в соответствии с DIN EN ISO/IEC 17025 (DAC-PL-0190-03-00)

| Физико-химические параметры | Результаты анализа | | | Предельное значение по TrinkwV[1] 2001 |
|---|---|---|---|---|
| | Среднее значение | Min | Max | |
| Температура (°C) | 9,6 | 7,6 | 12,9 | |
| pH (ед. pH) | 7,59 | 7,32 | 7,91 | 6,5 – 9,5 |
| Растворимость $CaCO_3$ (мг/л) | -15,1 | –33,3 | 3,6 | 5 |
| Проводимость (мкS/см при 20°C) | 464 | 388 | 541 | 2500 |
| Окисляемость (мг/л) | <0,5 | <0,5 | <0,5 | 5 |
| РОУ – растворенный органический углерод (мг/л) | 0,4 | 0,3 | 2,0 | |
| ООУ – общий органический углерод (мг/л) | 0,7 | 0,3 | 2,0 | |
| **Жесткость воды** | **Результаты анализа** | | | **Предельное значение по TrinkwV 2001** |
| | **Среднее значение** | **Min** | **Max** | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Щелочность pH 8,2 (ммоль/л) | 0,329 | 0,100 | 0,700 | |
| Кислотность pH 4,3 (ммоль/л) | 4,92 | 3,70 | 6,00 | |
| Карбонатная жесткость (°KH – градус карбонатной жесткости) | 13,8 | 10,4 | 16,7 | |

[1] *TrinkwV – норматив на питьевую воду.*

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Суммарно щелочноземельные металлы (ммоль/л) | 2,711 | 2,233 | 3,096 | |
| Общая жесткость (°dH – немецкий градус жесткости) | 15,2 | 12,5 | 17,3 | |
| **Микробиологические параметры** | **Аналитические данные** | | | **Предельное значение по TrinkwV 2001** |
| | **Среднее значение** | **Min** | **Max** | |
| Escherichia coli (KOE/л) | 0 | 0 | 0 | 0 в 100 мл |
| Колиформные микроорганизмы (KOE/л) | 0 | 0 | 0 | 0 в 100 мл |
| Энтерококки (KOE/л) | 0 | 0 | 0 | 0 в 100 мл |
| Число колоний при 20°C+/-2°C | 0 | 0 | 0 | 100 в 1 мл |
| Число колоний при 36°C+/-1°C | 0 | 0 | 2 | 100 в 1 мл |
| **Химические вещества** | **Аналитические данные (мг/л)** | | | **Предельное значение по TrinkwV 2001** |
| | **Среднее значение** | **Min** | **Max** | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| Мышьяк (мг/л) | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,01 |
| Сурьма (мг/л) | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,005 |
| Свинец (мг/л) | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,01 |
| Кадмий (мг/л) | <0,0005 | <0,0005 | <0,0005 | 0,005 |
| Хром (мг/л) | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,05 |
| Цианиды (мг/л) | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,05 |
| Фториды (мг/л) | 0,12 | 0,07 | 0,26 | 1,5 |
| Никель (мг/л) | <0,002 | <0,002 | <0,002 | 0,02 |
| Нитраты (мг/л) | 7,3 | 3,7 | 10,8 | 50 |
| Нитриты (мг/л) | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 0,5 |
| Ртуть (мг/л) | <0,0002 | <0,0002 | <0,0002 | 0,001 |
| Полициклические ароматические углеводороды (сумма из 4 параметров) (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | 0,0001 |
| Бенз(а)пирен (мг/л) | <0,0000025 | <0,0000025 | <0,0000025 | 0,00001 |
| Хлорсодержащие соединения: 1, 2-дихлорэтан (мг/л) | <0,0003 | <0,0003 | <0,0003 | 0,003 |
| Трихлорэтилен (мг/л) | <0,0003 | <0,0003 | <0,0003 | сумма |
| Тетрахлорэтилен (мг/л) | <0,0003 | <0,0003 | 0,0003 | 0,01 |
| Тригалогенметаны (мг/л) | <0,0012 | <0,0012 | <0,0012 | 0,05 |
| Пестициды (экстракт) Атразин (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | отдельное вещество 0,0001<br>сумма 0,0005 |
| Симазин (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Дезэтилатразин (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Пропазин (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Диурон (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Изопротурон (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Этидимурон (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Метазахлор (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| Метолахлор (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |
| 2,6-дихлорбензамид (мг/л) | <0,00002 | <0,00002 | <0,00002 | |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|
| Алюминий (мг/л) | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,2 |
| Аммоний (мг/л) | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 0,5 |
| Сульфаты (мг/л) | 23,8 | 7,8 | 52,1 | 240 |
| Хлориды (мг/л) | 7,7 | 4,7 | 10,0 | 250 |
| Натрий (мг/л) | 3,9 | 3,1 | 4,7 | 200 |
| Калий (мг/л) | 1,0 | <1,0 | 1,4 | |
| Магний (мг/л) | 19,9 | 16,8 | 23,4 | |
| Кальций (мг/л) | 75,9 | 61,8 | 87,0 | |
| Марганец (сум.) (мг/л) | <0,005 | <0,005 | <0,005 | 0,05 |
| Железо (сум.) (мг/л) | <0,02 | <0,02 | <0,02 | 0,2 |
| Медь (сум.) (мг/л) | <0,2 | <0,2 | <0,2 | 2 |
| Селен (мг/л) | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,01 |
| Цинк (сум.) (мг/л) | <0,2 | <0,2 | <0,2 | |
| Кислород (мг/л) | 9,2 | 7,1 | 10,7 | |
| $SiO_2$ (обычно присутствует в виде силиката) (мг/л) | 4,3 | 3,6 | 5,3 | 15[1] |
| Фосфаты ($PO_4$) (мг/л) | <0,05 | <0,05 | <0,05 | 6,7[1] |
| Стронций (мг/л) | 0,6 | 0,2 | 1,5 | |
| Бор (мг/л) | <0,1 | <0,1 | <0,1 | 1 |
| Двуокись углерода (мг/л) | 14,3 | 3,7 | 31,5 | |
| Гидрокарбонаты (мг/л) | 294,9 | 220,7 | 366,5 | |
| Карбонаты (мг/л) | 0,5 | 0,2 | 0,8 | |

**Результаты:**

1. Поставляемая предприятием Stadtwerke Munchen GmbH (SWM) – ШтадтВерке Мюнхен ГмбХ – питьевая вода по микробиологическим и химическим свойствам удовлетворяет требованиям норматива на питьевую воду (TrinkwV) от 01.01.2001 г.

2. Мюнхенская питьевая вода пригодна для приготовления питания грудных детей и диетического питания.

3. Все используемые для водоснабжения г. Мюнхена вещества и материалы, на которых имеется контрольный знак DVGW, пригодны для санитарно-технического оборудования зданий и безопасны по санитарным нормативам.

4. Применение оцинкованных стальных труб для подачи горячей воды с температурой выше 70 °С не рекомендуется.

Для получения воды высокого качества в г. Харькове может быть избран путь, базирующийся на строительстве принципиально нового состава сооружений (рис. 8.1).

Выполнение функционального назначения очистных сооружений невозможно без постоянного контроля качества обработанной воды, а также контроля качества воды, поступающей на очистные сооружения на различных этапах её обработки.

Современные региональные сооружения кондиционирования воды представляют собой сложные производственные объекты, на которых протекают различные механические, гидравлические, физико-химические и биологические процессы, что обуславливает необходимость постоянного и оперативного принятия обслуживающим персоналом важных технических решений. Оперативный контроль этих процессов наряду со стационарными лабораториями исследования воды осуществляется и с использованием средств автоматизации.

*[1] Допустимое количество добавок согласно перечню веществ, используемых для водоподготовки, и дезинфицирующих средств в TrinkwV 2001 (Норматив на питьевую воду, 2001 г.).*
*Мюнхенская вода вещества для водоподготовки не содержит!*

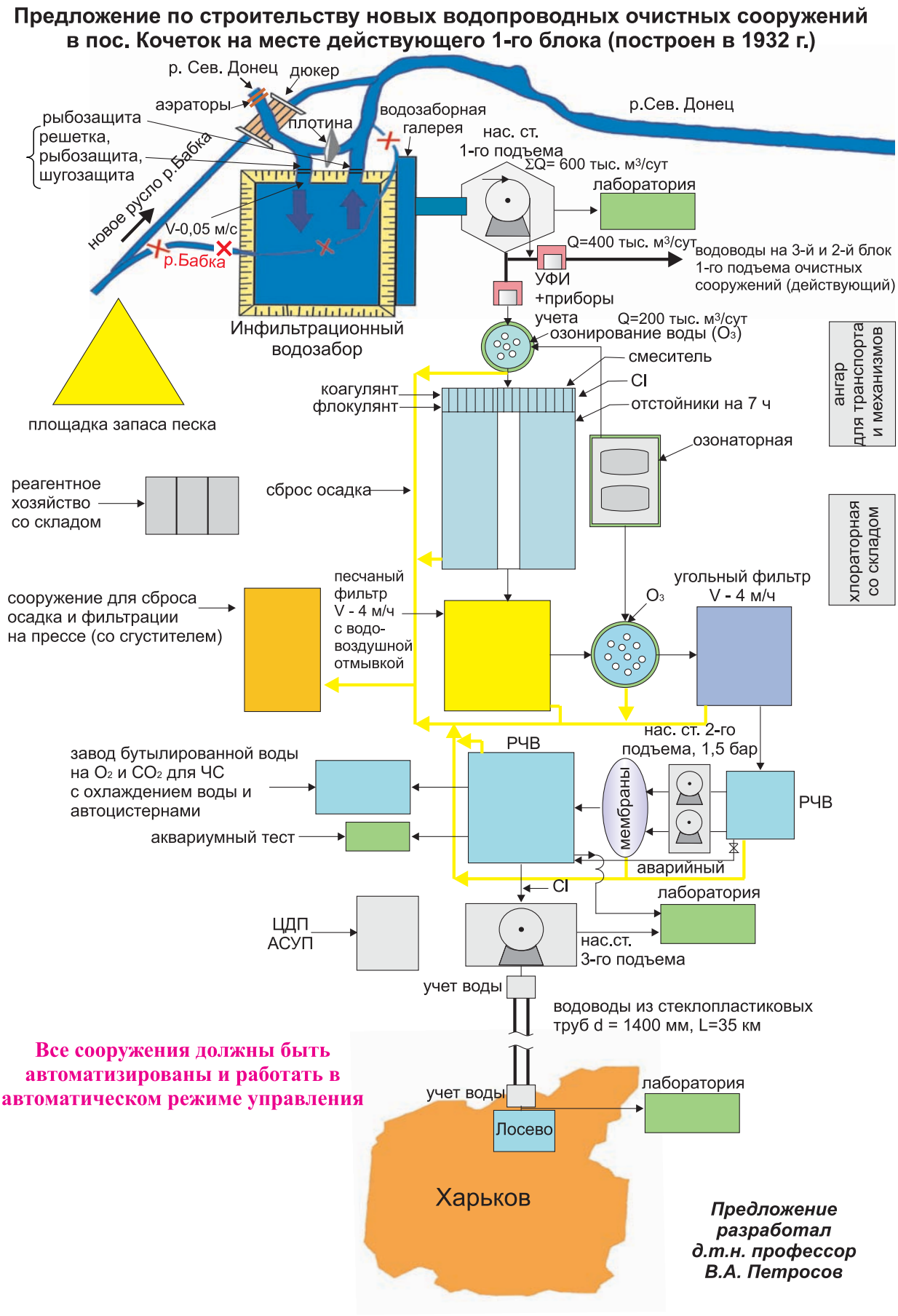



Рис. 8.1. Проект схемы современного состава сооружений водоподготовки для получения воды высокого качества и обеспечения безопасности водоснабжения г. Харькова, учитывающий влияние глобального изменения климата на водные ресурсы

## 8.2. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ

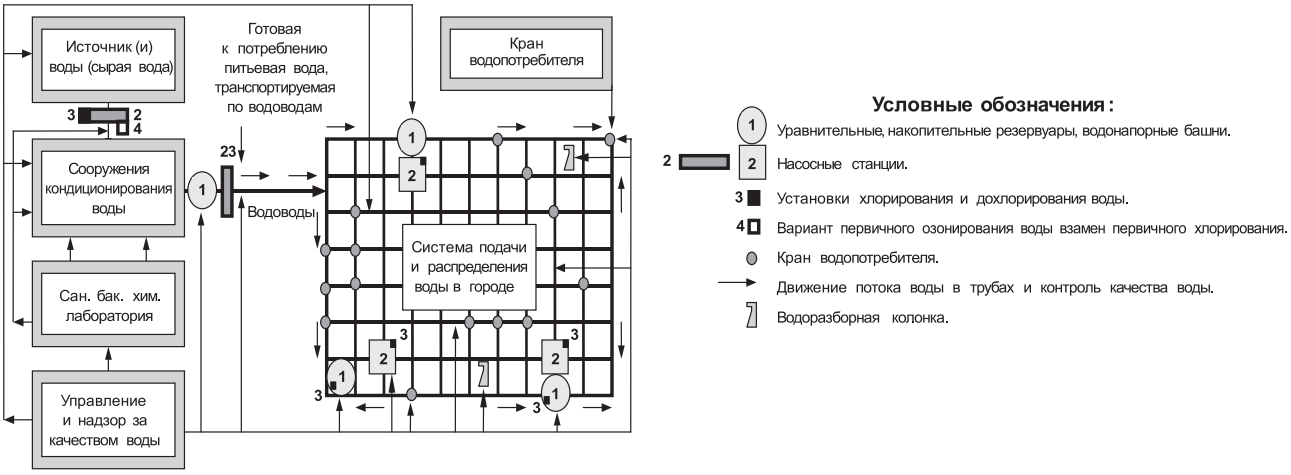



Рис. 8.2. Схематическое изображение контроля качества воды по элементам системы водоснабжения

В стационарных условиях для контроля качества воды необходимо иметь современное оснащение химической и микробиологической лаборатории.

Для химической лаборатории следующее оборудование должно присутствовать как стандартное:

- аналитические весы;
- фотометр (спектрофотометр);
- pH-метр;
- флюориметр;
- иономер;
- атомный абсорбционный спектрометр;
- газовый хроматограф;
- измеритель проводимости;
- жидкостный хроматограф;
- ВЭЖХ-хроматограф;
- хроматомасс-спектрометр;
- система капиллярного электрофореза
- сушильный шкаф;
- эксикатор;
- нагревательная плитка;
- холодильник;
- лабораторная посуда — стеклянная, пластиковая, металлическая;
- нагревательная водяная баня с мешалкой;
- магнитная мешалка;
- шейкер;
- автоматические дозаторы кислот, щелочей, растворителей;
- пипет-дозаторы;
- степлеры.

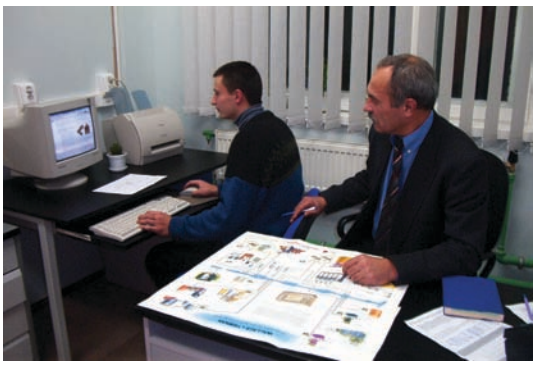
Для бактериологического анализа проб воды с использованием метода мембранных фильтров бактериологическая лаборатория должна иметь следующее оборудование:

- pH-метр;
- весы;

— термометры или регистраторы непрерывного действия;
— воздушные (или с водяным кожухом) инкубаторы (водяные бани), алюминиевые блок-инкубаторы;
— автоклав;
— холодильник;
— оптическую осветительную аппаратуру для счета колоний;
— оборудование для инокуляции (обязательное);
— оборудование для мембранной фильтрации;
— мембранные фильтры;
— лабораторную посуду – стеклянную, пластиковую, металлическую;
— измерительную аппаратуру;
— чашки для культур;
— культуральные пробирки и крышки.



Так, в г. Харькове в КП «Производственно-технологическое предприятие «Вода» под руководством автора создана лаборатория санитарно-эпидемиологического контроля качества воды – крупнейший в Украине специализированный центр, занимающийся исследованием качества воды, способный обслуживать сотни заказчиков – как крупные предприятия и организации, так и частных лиц.



Ежегодно микробиологический, химический, физико-химический и радиологический отделы выполняют свыше 50000 анализов 13000 проб питьевой воды, определяя 86 показателей качества воды. Накоплен уникальный для Украины опыт в организации контроля качества питьевой воды в централизованных системах водоснабжения мегаполисов.



Лаборатория оснащена уникальным современным аналитическим оборудованием для физико-химических, радиологических и микробиологических анализов. В сочетании с высокой квалификацией и опытом специалистов наш приборный парк позволяет достичь точности выполнения анализов, соответствующей требованиям международных стандартов.

**Микробиологический отдел**

Отдел микробиологических методов анализа проводит комплексные исследования воды, дающие всестороннюю оценку ее качества по бактериологическим, вирусологическим, паразитологическим и гидробиологическим показателям. Отдел оснащен современным тепловым оборудованием, боксами, автоклавами, микроскопами; питательными средами, мембранными фильтрами, биохимическими системами идентификации; современными дозирующими устройствами и расходными материалами; обеспечивающими необходимые условия для проведения анализов и безопасность труда.



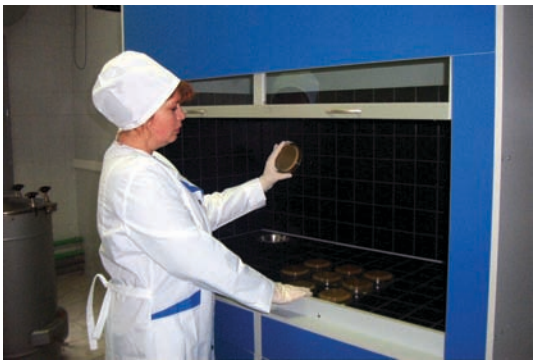
***Бактериология***



Определяемые параметры:
- Общее микробное число при 37 °С
- Глюкозоположительные колиформные бактерии
- Индекс БГКП
- Общие колиформы
- Термотолерантные колиформы.

Используются санитарно-бактериологические методы анализа воды, рекомендованные нормативными документами Украины.

***Вирусология***



Определяемые показатели:
- Колифаги
- Антиген вируса гепатита А.

Используются методы, рекомендованные Минздравом Украины, Всемирной организацией здравоохранения (WHO).

***Паразитология***



Определяемые показатели:
- Цисты лямблий
- Цисты амеб
- Яйца гельминтов.

Используются методы паразитологических исследований воды, установленные украинскими нормативными документами.

***Гидробиология***

Определяемые показатели:
- Общая биомасса по группам
- Общая численность по группам
- Общее число видов в группе
- Индекс сапробности по Пантле и Букку в модификации Сладечека
- Индекс видового разнообразия
- Преобладающие виды
- Зона сапробности преобладающих видов, % от общей численности
- Класс качества вод
- Идентификация гидробионтов до вида: около 300 видов фитопланктона и 160 видов зоопланктона
- Промеры массовых форм фито- и зоопланктона.

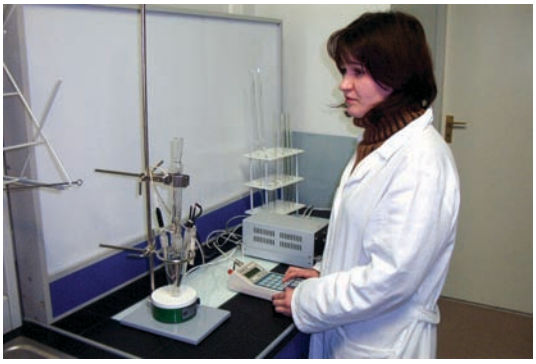
Один гидробиологический анализ включает исследования на фитопланктон (до 27 параметров) и на зоопланктон (до 33 параметров).





**Физико-химический отдел**

Физико-химический отдел определяет интегральные характеристики качества воды, металлы, органические и неорганические соединения, радионуклиды.



Определяемые показатели:

— Тяжелые металлы
— Щелочные металлы
— Щелочноземельные металлы
— Нефтепродукты
— Фенолы
— Полициклические ароматические углеводороды
— Общий и органический углерод
— Поверхностные активные вещества
— Радионуклиды
— Летучие галогенорганические соединения.



Методы анализа воды:

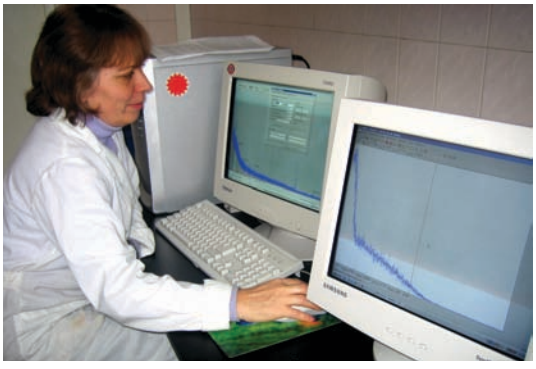
— Флюориметрия
— Потенциометрия
— Фотометрия
— Капиллярный электрофорез
— Газовая хроматография
— Жидкостная хроматография
— Альфа-, бета-, гамма-спектрометрии
— Атомно-абсорбционная спектрометрия с электротермической атомизацией
— Высокоэффективная жидкостная хроматография.



Основное оборудование:

— Система капиллярного электрофореза «Капель»
— Анализатор общего углерода TOC-Vcsn фирмы Shimadzu
— Атомно-абсорбционный спектрометр с электротермической атомизацией МГА-915
— Хроматографический комплекс «Флюорат-02-2М»+ ВЭЖХ-3
— Альфа-, бета-, гамма-спектрометры
— Иономер
— Фотометры КФК
— Газовые хроматографы
— Жидкостные хроматографы
— Флюориметры.







**Химический отдел**

Химический отдел выполняет химические анализы воды, определяя более 20 показателей качества – интегральные характеристики, общие показатели, неорганические соединения.



Определяемые показатели:
- Физико-химические показатели
- Неорганические соединения
- Органолептические показатели
- Растворенные газы.

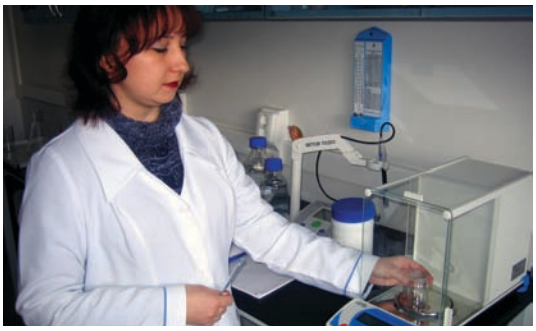
Методы анализа воды:
- Гравиметрия
- Турбидиметрия
- Органолептика
- Потенциометрия
- Титриметрия
- Спектрофотометрия.

Основное оборудование:
- Аналитические весы
- Иономеры
- pH-метры Metler Toledo
- Фотоколориметры
- Цифровые бюретки.









**Обеспечение качества**

Достоверность и объективность результатов анализов – наша главная забота. Точность анализов обеспечивается за счет строго регламентированной системы отбора проб, внутренней системы обеспечения качества, эффективной организации работ, применения современного оборудования, подготовленного персонала.

***Точность анализов***

Высокая чувствительность и точность определений соответствуют нормативным требованиям, принятым в Украине, России и странах ЕС. Профессионализм, высокая квалификация и опыт инженеров, техников и лаборантов, использующих в своей работе самое современное аналитическое оборудование, а также высокоэффективная система контроля качества гарантируют максимально возможную точность результатов.

***Высокая компетентность***

Техническая компетентность и независимость Лаборатории подтверждена Аттестатом аккредитации №8/1 от 10.01.05 г. (выдан Метрологической службой Государственного Комитета Украины по вопросам жилищно-коммунального хозяйства).

Качество питьевой воды, подаваемой централизованной системой водоснабжения г. Харькова (табл. 8.2), соответствует требованиям ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством».

Таблица 8.2

**Водопроводная вода г. Харькова**

| № | Показатели качества воды | Нормы ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая» | Нормы ДержСанПіН «Вода питна» | Экологическая норма | Фактически находится в воде (среднегодовой показатель) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | Запах при 20°С, бал | 2 | 2 | | 1-2 |
| 2 | Запах при 60°С, бал | 2 | 2 | | 1-2 |
| 3 | Вкус и привкус при 20°С, бал | 2 | 2 | | 1-2 |
| 4 | Цветность, град. | 20 | 20 | | 8 |
| 5 | Мутность, мг/дм$^3$ | 1,5 | 0,78 | | 0,7 |
| 6 | Прозрачность по шрифту, см | 30 | не норм. | | 30 |
| 7 | Щелочность, ммоль/дм$^3$ | не норм. | 0,5–6,5 | 1,5–6,0 | 5,5 |
| 8 | Осадок | отсутствует | отсутствует | | отсутствует |
| 9 | Окисляемость, мг$O_2$/дм$^3$ | не норм. | 4,0 | | 6,5 |
| 10 | Хлориды, мг/дм$^3$ | 350 | 250 | 30 | 39 |
| 11 | Амоний-ионы (по азоту), мг/дм$^3$ | 2,0 | 2,0 | 0,05 | 0,04 |
| 12 | Нитриты (по нитрит-иону), мг/дм$^3$ | 3,3 | 3,0 | 0,01 | 0,003 |
| 13 | Нитраты (по нитрат-иону), мг/дм$^3$ | 45,0 | 45,0 | 5,0 | 1,0 |
| 14 | Свободный хлор, мг/дм$^3$ | 0,3–0,5 | 0,3–05 | | 0,4 |
| 15 | Связанный хлор, мг/дм$^3$ | 0,8–1,2 | 0,8–1,2 | | 1,0 |
| 16 | Железо (III), мг/дм$^3$ | 0,3 | 0,3 | 0,1 | 0,14 |
| 17 | pH, ед.pH | 6–9 | 6,5–8,5 | 7,0–8,0 | 8,08 |
| 18 | Сухой остаток, мг/дм$^3$ | 1000 | 100–1000 | 150–600 | 659 |
| 19 | Жесткость общая, ммоль/дм$^3$ | 7,0 | 7,0 | 2,5–5,0 | 5,8 |
| 20 | Жесткость удаляемая, ммоль/дм$^3$ | не норм. | не норм. | | 4,5 |
| 21 | Жесткость постоянная, ммоль/дм$^3$ | не норм. | не норм. | | 1,3 |
| 22 | Кальций, мг/дм$^3$ | не норм. | не норм. | 40–100 | 89,6 |
| 23 | Магний, мг/дм$^3$ | не норм. | 10–80 | 6–30 | 15,1 |
| 24 | Сульфаты, мг/дм$^3$ | 500 | 250 | 40 | 128 |
| 25 | Углекислота, мг/дм$^3$ | не норм. | не норм. | | 6,6 |
| 26 | Гидрокарбонаты, мг/дм$^3$ | не норм. | не норм. | | 353,8 |
| 27 | Калий, мг/дм$^3$ | не норм. | не норм. | 40 | 6,8 |
| 28 | Натрий, мг/дм$^3$ | не норм. | 200 | | 64 |
| 29 | Общий орг. углерод, мг/дм$^3$ | не норм. | 3,0 | | 7,6 |
| 30 | Полифосфаты, мг/дм$^3$ | 3,5 | 3,5 | | 0,8 |
| 31 | Поверхностно-активные вещества, мг/дм$^3$ | 0,5 | 0,5 | | 0,015 |
| 32 | Нефтепродукты, мг/дм$^3$ | 0,3 | 0,3 | | 0,018 |
| 33 | Фенолы, мг/дм$^3$ | 0,001 | 0,001 | | <0,001 |
| 34 | Хлороформ, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,06 | | 0,06 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|
| 35 | Тетрахлорметан, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,006 | | <0,0005 |
| 36 | Трихлорэтилен, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,06 | | <0,0005 |
| 37 | Бенз/а/пирен, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,000005 | | отсутствует |
| 38 | Ванадий, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,1 | | отсутствует |
| 39 | Барий, мг/дм$^3$ | 0,1 | 0,1 | | отсутствует |
| 40 | Бром, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,2 | | отсутствует |
| 41 | Свинец, мг/дм$^3$ | 0,03 | 0,01 | 0,01 | <0,0005 |
| 42 | Алюминий, мг/дм$^3$ | 0,5 | 0,2 | | 0,13 |
| 43 | Марганец, мг/дм$^3$ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,006 |
| 44 | Цинк, мг/дм$^3$ | 5,0 | 1,0 | 0,1 | |
| 45 | Медь, мг/дм$^3$ | 1,0 | 1,0 | 0,05 | 0,014 |
| 46 | Фтор, мг/дм$^3$ | 1,2 | 0,7–1,5 | 0,9 | 0,22 |
| 47 | Бор, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,5 | | отсутствует |
| 48 | Кобальт, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,1 | | отсутствует |
| 49 | Молибден, мг/дм$^3$ | 0,25 | 0,25 | 0,07 | отсутствует |
| 50 | Сурьма, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,05 | | отсутствует |
| 51 | Мышьяк, мг/дм$^3$ | 0,05 | 0,05 | | 0,0023 |
| 52 | Хром (VI), мг/дм$^3$ | 0,1 | 0,1 | 0,01 | 0,004 |
| 53 | Литий, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,03 | | отсутствует |
| 54 | Ртуть, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,0005 | | отсутствует |
| 55 | Таллий, мг/дм$^3$ | не норм. | 0,0001 | | <0,0001 |
| 56 | Никель, мг/дм$^3$ | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,02 |
| 57 | Кадмий, мг/дм$^3$ | 0,001 | 0,001 | 0,0005 | <0,0001 |
| 58 | Селен, мг/дм$^3$ | 0,01 | 0,01 | | <0,0001 |
| 59 | Стронций, мг/дм$^3$ | 7 | 7 | | 2,1 |
| 60 | Бериллий, мг/дм$^3$ | 0,0002 | 0,0002 | | <0,0001 |
| 61 | Суммарная бета-активность, Ки/дм$^3$ | $3*10^{-11}$ | $3*10^{-11}$ | | $1,14*10^{-11}$ |
| 62 | Цезий-134, Ки/дм$^3$ | $8,6*10^{-9}$ | $8,6*10^{-9}$ | | отсутствует |
| 63 | Цезий-137, Ки/дм$^3$ | $5*10^{-10}$ | $5*10^{-10}$ | | $3,9•10^{-13}$ |
| 64 | Стронций-90, Ки/дм$^3$ | $4,0*10^{-10}$ | $4*10^{-10}$ | | $2,1•10^{-12}$ |
| 65 | Радий-226, Ки/дм$^3$ | $5,4•10^{-11}$ | $5,4•10^{-11}$ | | $1,2•10^{-14}$ |
| 66 | Америций-241, Ки/дм$^3$ | $1,9•10^{-9}$ | $1,9•10^{-9}$ | | отсутствует |
| 67 | Церий-144, Ки/дм$^3$ | $1,2•10^{-8}$ | $1,2•10^{-8}$ | | отсутствует |
| 68 | Общее микробное число, КОЕ/см$^3$ | 100 | 100 | | 0 |
| 69 | Индекс БГКП, КОЕ/дм$^3$ | 3 | 3 | | <3 |
| 70 | Колифаги, БОЕ/дм$^3$ | не норм. | отсутствует | | отсутствует |
| 71 | Антиген вируса гепатита А | не норм. | отсутствует | | отсутствует |
| 72 | Гидробиологический показатель, орг. | отсутствует | отсутствует | | отсутствует |

Пригодность воды для питья не достигается простой разработкой стандартов, взятием проб или оценкой лабораторных анализов. Выполнения стандартов, принятых на основе даже наилучших норм, недостаточно для гарантии безопасности питьевой воды, для обеспечения соответствия всем химическим и бактериологическим параметрам. Более того, невозможно провести полный анализ питьевой воды. Это обусловлено недостатком научных знаний. Как правило, для проведения тщательных анализов требуется много времени — недели, возможно, месяцы, тогда как результаты качества воды должны быть получены в реальном масштабе времени при взятии пробы. Таким образом, в настоящее время есть только одно

решение для защиты конечного потребителя: оно состоит в постоянном жестком контроле сырой воды в водоисточнике при водозаборе, в соблюдении технологии кондиционирования и её распределении по сети. Руководители служб эксплуатации водоснабжения могут полностью оценивать, контролировать и анализировать складывающуюся ситуацию, руководствуясь соответствующими стандартами и нормами, касающимися качества воды. Если это делать должным образом и профессионально, то это является единственной гарантией того, что будет использована новейшая технология для защиты потребителя в непрерывно меняющейся ситуации в источниках водоснабжения и системе водопотребления городов, с чем связаны скорости кондиционирования на сооружениях и, соответственно, качество воды.

Водоснабжение питьевой водой и ее гарантированное качество являются неотъемлемыми требованиями для сохранения здоровья общества.

Несмотря на увеличивающиеся расходы на строительство, модернизацию и реконструкцию сооружений, возрастающие расходы на рабочую силу, введение сложного рабочего оборудования и системы управления контролем воды, стоимость обеспечения безопасной и вкусной водой все еще является сравнительно доступной для потребителя, как, например, в США. Причина готовности потребителей платить за воду – понимание того, что вода является предметом первой необходимости, и налогоплательщик хорошо осознает свою потребность в ней. Финансовые гарантии водных компаний высоко ценятся на рынке инвестиций США из-за их надежности. В результате процентные ставки низкие, а расходы на капитальное строительство в условиях социально-рыночных реформ могут быть переведены в очень небольшие повышения годовых тарифов. Для уменьшения количества сточных вод следует убеждать городское население в необходимости установки, технического обслуживания и усовершенствования счетчиков воды, что позволит населению платить только за фактически потребленную воду. При этом не будет расти оплата за услуги канализации, и, как следствие, сократятся затраты и на охрану окружающей среды.

В Украине пока ещё не работает полноценно Закон о питьевой воде. Поэтому тем, от кого это зависит, с большим удовольствием расскажу о таком законе, действующем в США.

До 1974 г. в США федеральные стандарты по воде издавались Службой государственного здравоохранения США во главе с её главным врачом (г. Вашингтон, округ Колумбия). При этом забота о здоровье людей была основополагающим фактором, а действие этих стандартов распространялось только на транспортные средства, осуществляющие перевозки между штатами (поезда, корабли, самолеты и т.д.).

Они были изданы в 1914 г., затем пересмотрены в 1925, 1942, 1946 и 1962 годах. Стандарты 1962 года были более конкретными с точки зрения физических, химических и микробиологических параметров. Эти стандарты, с небольшими изменениями, были приняты всеми 50 штатами. На органические химические вещества не обращали внимания еще 10 лет. В дальнейшем озабоченность общественности качеством питьевой воды, потенциально загрязненной летучими или синтетическими органическими химическими веществами, побудила Конгресс в 1974 г. принять федеральный Закон о безопасной питьевой воде (ЗБПВ). Загрязнение питьевой воды пестицидами и промышленными сточными водами лежит в области контроля за окружающей средой. По этой причине федеральной организацией, ответственной за разработку и издание новых стандартов, главным образом о максимальных уровнях загрязнения, а также требований по обеспечению повышения качества питьевой воды в масштабах всей страны, стало Агентство по охране окружающей среды США.

В Законе о безопасной питьевой воде от 1974 г. оговорены конкретные обязанности, временные рамки и определены параметры. В него были включены положения по мерам, которые должны быть приняты штатом в первую очередь (делегирование полномочий наряду с финансовой помощью), а также положения относительно информированности общественности и разработки программы, направленной на защиту подземных источников питьевой воды.

Поправки к этому Закону принимались в 1977 г., 1979 г., 1980 г., а основная поправка – в 1986 г. Дополнительные требования по контролю загрязнения свинцом были внесены в 1988 г. Новые изменения были приняты в 1996 г.

Во исполнение Закона о безопасной питьевой воде EPA (Агентство США по охране окружающей среды) разработало и установило национальные нормативы питьевой воды.

Национальные первичные нормативы питьевой воды (NPDWR, или первичные стандарты) являются обязательными для общественных водопроводных сетей. Первичные стандарты защищают качество питьевой воды, ограничивая уровни определенных загрязнений, которые могут неблагоприятно влиять на здоровье потребителей воды, и встречаются в общественных водопроводных сетях (табл. 8.3).

Таблица 8.3

**Национальные первичные нормативы питьевой воды**

| Показатели | MCL[1] или TT[2] (мг/л) | Потенциальное воздействие на здоровье при попадании в организм из питьевой воды | Источники загрязнения питьевой воды |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| ***Неорганические компоненты*** | | | |
| Сурьма | 0,006 | Увеличивает содержание в крови холестерина; уменьшает содержание глюкозы | Выбросы нефтеперегонных заводов; вещества — замедлители горения; керамика; электронные компоненты; припой |
| Мышьяк | 0,05 | Заболевания кожи; воздействие на кровеносную систему; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы при производстве полупроводников, нефтеперегонных заводов; консерванты древесины; добавки в корма; гербициды; эрозия природных отложений |
| Асбест (волокна> 10 мкм) | 7 млн волокон/л | Увеличенный риск развития мягких кишечных полипов | Износ асбоцементных труб; эрозия природных отложений |
| Барий | 2 | Повышение кровяного давления | Наполнители при бурении скважин; выбросы металлоаффинажных заводов; эрозия природных отложений |
| Бериллий | 0,004 | Заболевания кишечника | Выбросы металоаффинажных и коксогазовых заводов; выбросы предприятий электротехнической, аэрокосмической и оборонной промышленности |
| Кадмий | 0,005 | Заболевания почек | Коррозия оцинкованных труб; эрозия природных отложений; выбросы металлоаффинажных заводов; попадание из отработанных батареек и из красок |
| Хром (общий) | 0,1 | Некоторые люди, использующие в течение многих лет воду, содержащую хром с превышением MCL, могут страдать аллергическим дерматитом | Выбросы сталелитейных и целлюлозно-бумажных заводов; эрозия природных отложений |

[1] *MCL – максимальный допустимый уровень загрязнения воды, которая поставляется любому пользователю общественной водопроводной сети. MCL – обязательные показатели. Нормативы MCLG гарантируют, что небольшое превышение MCL не представляет значительного риска для здоровья.*

[2] *Методика обработки – обязательная к выполнению процедура или уровень технического выполнения, которым должны следовать общественные водопроводные сети, чтобы гарантировать управление загрязнениями.*

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Медь | Действенный уровень=1.3; ТТ[3] | Краткосрочное воздействие: желудочно-кишечное расстройство. Длительное воздействие: заболевания печени или почек. При болезни Вилсона следует уточнить с врачом уровень загрязнения медью воды распределительной водопроводной сети | Коррозия домашних распределительных систем; эрозия природных отложений; выделения при консервации древесины |
| Цианид (как свободный цианид) | 0,2 | Заболевания нервной системы или щитовидной железы | Выбросы металлообрабатывающих и сталелитейных заводов; выбросы заводов по выпуску пластиков или минеральных удобрений |
| Фторид | 4,0 | Костные заболевания (боли и ломкость костей); пятнистость зубной эмали у детей | Фторирование воды; эрозия природных отложений; выбросы заводов по производству минеральных удобрений и алюминия |
| Свинец | Уровень воздействия=0.015; ТТ[3] | Младенцы и дети: задержки физического или умственного развития. Взрослые: почечные заболевания; высокое кровяное давление | Коррозия домашних распределительных систем; эрозия природных отложений |
| Неорганическая ртуть | 0,002 | Заболевания почек | Эрозия природных отложений; выбросы нефтеперерабатывающих заводов; выделения из мусорных свалок и пахотных угодий |
| Нитрат (в пересчете на азот) | 10 | Острое заболевание младенцев до шести месяцев – посинение ребенка и одышка – угроза для жизни без немедленного вмешательства | Последствия чрезмерного использования удобрений; выделения из канализационных отстойников; эрозия природных отложений |
| Нитрит (в пересчете на азот) | 1 | Острое заболевание младенцев до шести месяцев – посинение ребенка и одышка – угроза для жизни без немедленного вмешательства | Последствия чрезмерного использования удобрений; выделения из канализационных отстойников; эрозия природных отложений |
| Селен | 0,05 | Выпадение волос и ногтей; онемение пальцев; заболевания системы кровообращения | Выбросы нефтеперерабатывающих заводов; эрозия природных отложений; выделения из шахт |
| Таллий | 0,002 | Потеря волос; заболевания крови, почек, кишечника или печени | Выщелачивание из рудных отвалов; выбросы электронной промышленности, заводов по производству стекла и лекарств |

[3] *Свинец и медь регулируются в методике обработки, которая требует, чтобы системы брали образцы водопроводной воды на участках со свинцовыми или медными трубами, которые имеют свинцовый припой и/или обслуживаются с использованием свинца. Меры должны быть приняты, если содержание свинца или меди превышено в более чем 10 % образцов водопроводной воды; для меди – 1,3 мг/л и для свинца – 0,015 мг/л.*

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| ***Органические соединения*** | | | |
| Акриламид | ТТ[4] | Заболевания нервной системы или крови; увеличивает риск онкологических заболеваний | Попадание в воду и из сточных вод или обработанных сточных вод |
| Алахлор | 0,002 | Заболевания глаз, печени, почек или селезенки, увеличенный риск онкологических заболеваний, анемия | Поступление с гербицидами для прореживания с целью повышения урожайности |
| Атразин | 0,003 | Заболевания сердечно-сосудистой системы; нарушение репродуктивной функции | Поступление с гербицидами |
| Бензол | 0,005 | Анемия; уменьшение тромбоцитов крови; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы заводов; утечки из цистерн для хранения газов и со свалок |
| Бензо(а)пирен | 0,0002 | Нарушение репродуктивной функции; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выделение из футеровки цистерн для хранения воды и распределительных линий |
| Карбофуран | 0,04 | Заболевания крови или нервной системы; репродуктивные трудности | Попадание в почву при фумигации риса и люцерны |
| Четыреххлористый углерод | 0,005 | Заболевания печени; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических заводов и других индустриальных объектов |
| Хлордан | 0,002 | Заболевания печени или нервной системы; увеличенный риск онкологических заболеваний | Остатки запрещенного термицида |
| Хлорбензол | 0,1 | Заболевания печени и почек | Выбросы химических заводов и заводов по производству агрохимикатов |
| 2,4-D | 0,07 | Заболевания почек, печени и надпочечников | Поступление с гербицидами |
| Далапон | 0,2 | Незначительные изменения в почках | Поступление с гербицидами |
| 1,2-дибром-3-хлорпропан (DBCP) | 0,0002 | Репродуктивные трудности; увеличенный риск онкологических заболеваний | Поступление/выщелачивание из почвы при фумигации сои, хлопка, ананасов и в садах |
| Орто-дихлорбензол | 0,6 | Заболевания печени, почек или кровеносной системы | Выбросы химических заводов |
| Пара-дихлорбензол | 0,075 | Анемия; повреждение печени, почек или селезенки; изменения в крови | Выбросы химических заводов |
| 1,2-дихлорэтан | 0,005 | Увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических заводов |
| 1,1-дихлорэтилен | 0,007 | Заболевания печени | Выбросы химических заводов |
| Цис-1,2-ди хлорэтилен | 0,07 | Заболевания печени | Выбросы химических заводов |
| Транс-1,2-дихлорэтилен | 0,1 | Заболевания печени | Выбросы химических заводов |
| Дихлорметан | 0,005 | Заболевания печени; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических и фармацевтических заводов |

[4] *Для каждой водопроводной сети должно быть указано в письменной форме (с участием третьего лица или согласно сертификату производителя), что при использовании в системах обработки питьевой воды акриламида и эпихлоргидрина содержание этих мономеров в питьевой воде не превышает для:*
*акриламида = 0.05 %, дозируемый в 1 мг/л (или эквивалентно);*
*эпихлоргидрин = 0.01 %, дозируемый в 20 мг/л (или эквивалентно).*

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| 1-2-дихлор-пропан | 0,005 | Увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических заводов |
| Ди (2-этилгексил) адипат | 0,4 | Общеядовитое воздействие или заболевания репродуктивной системы | Выщелачивание из поливинилхлоридных частей распределительной системы; выбросы химических заводов |
| Ди (2-этилгексил) фталат | 0,006 | Репродуктивные трудности; заболевания печени; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических и резинотехнических заводов |
| Диносеб | 0,007 | Репродуктивные трудности | Поступление с гербицидами для сои, овощей |
| Диоксин (2, 3, 7, 8- TCDD) | 0,00000003 | Репродуктивные трудности; увеличенный риск онкологических заболеваний | Эмиссия при сжигании отходов и других видах горения; выбросы химических заводов |
| Дикват | 0,02 | Катаракта | Поступление с гербицидами |
| Эндоталл | 0,1 | Желудочно-кишечные заболевания | Поступление с гербицидами |
| Эндрин | 0,002 | Заболевания нервной системы | Остатки запрещенного инсектицида |
| Эпихлоргидрин | ТТ[4] | Соматические репродуктивные заболевания; повышенный риск онкологических заболеваний | Выбросы химических заводов; попадание в процессах обработки воды |
| Этилбензол | 0,7 | Заболевания печени или почек | Выбросы нефтеперегонных заводов |
| Этилен-дибромид | 0,00005 | Соматические репродуктивные заболевания; повышенный риск онкологических заболеваний | Выбросы нефтеперегонных заводов |
| Глифосфат | 0,7 | Заболевания почек; репродуктивные трудности | Поступление с гербицидами |
| Гептахлор | 0,0004 | Заболевания печени; увеличенный риск онкологических заболеваний | Остатки запрещенного термицида |
| Гептахлорэпоксид | 0,0002 | Заболевания печени; увеличенный риск онкологических заболеваний | Продукт разложения гептахлора |
| Гептахлорбензол | 0,001 | Заболевания печени или почек; репродуктивные трудности; увеличенный риск онкологических заболеваний | Выбросы металлоаффинажных заводов и заводов агрохимикатов |
| Гексахлорциклопентадиен | 0,05 | Почечные и желудочные заболевания | Выбросы химических заводов |
| Линдан | 0,0002 | Заболевания печени и желудка | Поступление/выщелачивание инсектицидов, применяемых при обработке пиломатериалов для коровников и в садах |
| Метоксихлор | 0,04 | Репродуктивные трудности | Поступление/выщелачивание инсектицидов, применяемых для фруктов, овощей, люцерны, домашнего скота |
| Оксамил | 0,2 | Небольшое воздействие на нервную систему | Поступление/выщелачивание инсектицидов, применяемых для яблок, картофеля и томатов |
| Полихлортрованные бифенилы (PCB) | 0,0005 | Заболевания кожи; тимуса; иммунодефицит; заболевания репродуктивной и нервной систем; повышенный риск онкологических заболеваний | Поступление из мусора, выщелачивание из химических отходов |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| Пентахлорфенол | 0,001 | Заболевания печени и почек; повышенный риск онкологических заболеваний | Выделения предприятий по консервации древесины |
| Пиклорам | 0,5 | Заболевания печени | Поступление с гербицидами |
| Симазин | 0,004 | Заболевания крови | Поступление с гербицидами |
| Стирол | 0,1 | Заболевания печени, почек и системы кровообращения | Выбросы заводов по производству резинотехнических изделий и пластмасс; выделения из мусора |
| Тетрахлорэтилен | 0,005 | Заболевания печени; повышенный риск онкологических заболеваний | Выбросы заводов и химчисток |
| Толуол | 1 | Заболевания нервной системы, почек или печени | Выбросы нефтеперерабатывающих заводов |
| Общее количество тригалометанов | 0,10 | Заболевания печени, почек или центральной нервной системы; повышенный риск онкологических заболеваний | Побочный продукт дезинфекции питьевой воды |
| Токсафен | 0,003 | Заболевания почек, печени или щитовидной железы; повышенный риск онкологических заболеваний | Поступление/выщелачивание инсектицидов, применяемых для хлопка и рогатого скота |
| 2,4,5-ТР (силвекс) | 0,05 | Заболевания печени | Остаток запрещенного гербицида |
| 1,2,4-трихлорбензол | 0,07 | Изменения надпочечников, заболевания системы кровообращения | Выбросы фабрик по отделке тканей |
| 1,1,1-трихлорэтан | 0,2 | Заболевания печени, нервной системы или системы кровообращения | Выбросы участков обезжиривания металла и других заводов |
| 1,1,2-трихлорэтан | 0,005 | Заболевания печени и почек или иммунной системы | Выбросы химических заводов |
| Трихлорэтилен | 0,005 | Заболевания печени; повышенный риск онкологических заболеваний | Выбросы нефтехимических заводов |
| Винилхлорид | 0,002 | Повышенный риск онкологических заболеваний | Выщелачивание из поливинилхлоридных труб; выбросы заводов по производству пластмасс |
| Ксилены (общее содержание) | 10 | Заболевания нервной системы | Выбросы нефтехимических и химических заводов |
| ***Радионуклиды*** | | | |
| Бета-частицы и эмиттеры фотонов | 4 милли бэр/год | Повышенный риск онкологических заболеваний | Распад природных и антропогенных отложений |
| Суммарная альфа активность частиц | 15 пикокюри/л (пКи/л) | Повышенный риск онкологических заболеваний | Эрозия природных отложений |
| Ra 226 и Ra 228 (совместно) | 5 пКи/л | Повышенный риск онкологических заболеваний | Эрозия природных отложений |

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|
| ***Микроорганизмы*** | | | |
| Giardia lamblia | ТТ[5] | Лямблиоз, заболевания желудка | Фекалии человека и животных |
| Гетеротрофный индекс | ТТ[5] | Индикатор эффективности удаления микроорганизмов | – |
| Legionella | ТТ[5] | Болезнь легионеров, обычно проявляющаяся как пневмония | Обнаруживается в воде, накапливается в системах кондиционирования |
| Общие колиформы (включая фекальные колиформы и E. coli) | 5,0%[6] | Используется как индикатор, что могут присутствовать другие потенциально опасные бактерии[7] | Фекалии человека и животных |

Важнейшим элементом системы контроля качества питьевой воды является схема отбора проб воды на объектах водоснабжения.

Директива 98/83/ЕС от 03.11.1998 года «О качестве воды, предназначенной для употребления человеком» в ст. 7 четко устанавливает, что пробы должны отбираться таким образом, чтобы давать представление о качестве воды на протяжении года, а пункты отбора проб должны быть определены компетентными органами.

В Украине предприятия водоснабжения руководствуются программами контроля качества питьевой воды, согласованными с органами СЭС, которые устанавливают перечень объектов, частоту отбора проб и виды проводимых анализов.

Отметим, что при оценке качества питьевой воды по результатам лабораторного контроля необходимо учитывать возможную недостоверность данных, вызванную ошибками и неточностями, допущенными при отборе и транспортировке проб воды в лабораторию.

Например, в п. 1.4. ГОСТа 18963-73 «Вода питьевая. Методы санитарно-бактериологического анализа» установлено, что пробы хлорированной водопроводной воды (с аммонизацией или без нее) отбирают во флаконы с дехлоратором: во флакон, предназначенный для отбора 500 см$^3$ воды, до стерилизации вносят 10 мг серноватистокислого натрия. Невыполнение этого условия приведет к искажению результатов сложного и дорогостоящего бактериологического анализа, что в конечном итоге может привести к ошибочным действиям по корректировке технологического процесса обеззараживания воды.

Также особые требования выдвигаются к отбору проб воды для контроля органического загрязнения воды. Например, ДСТУ ISO 10301:2004 «Качество воды. Определение лег-

---

*[5] Правила обработки поверхностных вод требуют от систем, использующих поверхностные воды или грунтовые воды под прямым влиянием поверхностных вод, проводить дезинфекцию этих вод и их фильтрацию.*
*При этом нижеследующие показатели должны быть такими:*
*Giardia lamblia – 99.9 % убиты/инактивированы;*
*вирусы – 99.99 % убиты/инактивированы;*
*Legionella – предел не установлен, но EPA полагает, что, если лямблии и вирусы инактивированы, то легионелла также будет инактивирована;*
*мутность – не более 5 нефелометрических единиц мутности (NTU). Системы фильтрации должны гарантировать, что мутность полученной воды не выше, чем 1 NTU (0.5 NTU для обычной или прямой фильтрации), по крайней мере, у 95 % ежедневно отобранных образцов в любом месяце;*

*микробиологический показатель HPC — не более чем 500 бактериальных колоний на мл.*

*[6] Не более чем 5,0 % от общего количества образцов за месяц дают положительную реакцию на бактерии кишечной группы (для водопроводных сетей, которые отбирают меньше проб, чем 40 обычных проб за месяц, не больше, чем один образец может давать положительную реакцию на бактерии кишечной группы). Каждый образец, который имеет общее количество колиформ, должен быть проанализирован на фекальные колиформы. Не допускаются любые фекальные колиформы.*

*[7] Фекальные колиформы и E. coli указывают, что вода может быть загрязнена человеческими отходами и отходами животноводства. Эти микроорганизмы могут вызывать понос, спазмы, тошноту, головные боли или другие симптомы.*

колетучих галогенированных углеводородов методом газовой хроматографии» расписывает довольно подробную процедуру отбора пробы воды, позволяющую исключить при дегазации потерю хлорорганических веществ и, как результат — занижение их концентрации в воде.

Очевидно, что расширение перечня контролируемых параметров усложняет работу пробоотборщиц и требует от них постоянного повышения квалификации, причем по самым разносторонним направлениям контроля – физхимия, микробиология, радиология, оргхимия. Установленный еще в советское время для пробоотборщиц 2-й разряд по тарифной сетке в настоящее время не соответствует реальному положению дел. Например, в лаборатории КП «ПТП «Вода» г. Харькова, впервые в Украине аккредитованной на право контроля качества воды по 86 показателям по требованиям ДержСанПіНа «Вода питна», на должностях пробоотборщиц 2 разряда работают специалисты с высшим и среднетехническим образованием, т.е. по сути это уровень инженерно-технических работников. Интересно отметить, что во Франции отбор проб воды на объектах водоснабжения выполняют санитарные инспектора с высшим медицинским образованием, относящиеся по штату к санитарным департаментам. Это гарантирует репрезентативность и достоверность всей процедуры пробоотбора.

Методы контроля параметров качества воды подразделяют на химические, физико-химические, физические и биологические в зависимости от вида процессов, заложенных в основу измерения контролируемых параметров. Как правило, системы водоснабжения располагают мощными санитарно-бактериологическими лабораториями. Однако проведение полных анализов воды занимает значительное время – от 48 часов и более. В современных условиях в развитых странах контроль воды осуществляется по 130÷180 параметрам.

Методы контроля основаны на анализе воды – идентификации её состава, концентрации и других свойств по ранее достоверно установленным специфическим характеристикам. Каждое химическое вещество имеет уникальный «паспорт» таких характеристик, по которому его идентифицируют.

Процедура анализа заключается в обязательном воздействии на неизвестное анализируемое вещество с целью вызвать его реакцию. Реакции на воздействие регистрируются и сопоставляются с ранее полученными от аналогичного воздействия на известные вещества. Анализ вещества, как правило, включает последовательность (комбинацию) воздействий различной природы, достаточных для однозначного распознавания неизвестного вещества и его свойств.

Вид воздействия на неизвестное вещество, характер его реакции на воздействие и способ фиксации этой реакции или количественного измерения параметров реакции (сигнала отклика на воздействие) в совокупности определяют метод анализа.

Как было сказано выше, распознавание вещества основано на уже изученных свойствах вещества. Так, установлено, что хлорофилл зелёных растений, в том числе и микроводорослей, при облучении синим цветом начинает генерировать красный свет, который можно регистрировать с помощью специальной чувствительной аппаратуры и получать много ценной информации о природе хлорофилла, его текущем состоянии, количественных характеристиках и т.п.

Но беда в том, что существуют растения, лишенные хлорофилла. Некоторые водоросли бывают зелеными только на свету, в темноте же они утрачивают хлорофилл и живут, питаясь за счет органического вещества среды обитания.

Для экспресс-контроля качества воды по принципу «хорошо» – «плохо» на сооружениях водоснабжения необходимы не только сложные высокочувствительные биосигнализаторы, измеряющие реакцию рыб (радужной форели, нильской щуки, угря и т.д.) на токсикант, но и более простые биологические тесты-контролеры на микроорганизмах, дающие приблизительную оценку загрязнения воды. Биотест должен базироваться на использовании норм ПДК для каждого отдельного вещества (или группы близких по механизму биологического действия веществ), полученных на основании предварительных тщательных испытаний в лабораторных условиях.

В реальных условиях работы региональных систем водоснабжения анализу подвергается не какое-либо конкретное вещество, а смесь веществ. При определении одного ингредиента смеси остальные могут оказывать нежелательное влияние. В результате из-

мерения реакции на воздействие на конкретное вещество мы получаем от образца (смеси) суммарный сигнал S:

$$S = S_0 + S_f, \tag{8.1}$$

где $S_0$ – полезный сигнал от конкретного ингредиента;

$S_f$ – фоновый сигнал (шум), создаваемый остальными ингредиентами.

Чтобы избежать влияния шумовых ингредиентов на измерение, необходимо либо удалить из смеси все помехогенерирующие ингредиенты, либо выделить полезный сигнал из шума. Однако на практике таких условий трудно достичь. Поэтому чаще величину шума определяют при калибровочных измерениях сигнала реакции смеси на воздействие без наличия в ней анализируемого ингредиента.

Для того чтобы сигнал $S$ позволил определить полезный сигнал $S_0$, его необходимо сопоставить с сигналом $S_э$ от эталонной смеси, состав которой известен и которая не содержит исследуемого нами ингредиента:

$$S_0 = S - S_э. \tag{8.2}$$

При анализе природных и сточных вод, учитывая их сложный состав и связанные с этим трудности контроля качества воды, в последнее время используются интегральные показатели качества. В этом случае исходят из требований биологической полноценности (в случае природной или питьевой воды) или экологической безопасности (в случае сточных вод) исследуемой воды. Особую значимость приобретают методы и аппаратура *биологического тестирования* [367].

Методы биологического тестирования имеют свою историю. Многие из них формировались параллельно с ходом эволюционного развития человечества.

Развиваясь в окружении многочисленных видов живых организмов, человек не мог не обратить внимание на особенности их реагирования на те или иные воздействия окружающей среды, а также имел возможность иногда сопоставлять эти реакции с собственными.

Особый интерес для человека представлял богатейший набор окружающих его химических элементов и веществ органической и неорганической природы. Можно утверждать, что безопасное лавирование человека в мире химических соединений обеспечено знаниями, полученными в ходе наблюдений за живыми организмами. По-видимому, уже тогда, в самом начале истории человечества, закладывалась основа двух направлений биологических методов контроля окружающей среды – *биоиндикация* и *биотестирование*.

Биоиндикация – это наблюдение за реакцией живых организмов в среде обитания, которые подвержены внешнему воздействию.

Как правило, биоиндикация оперирует категориями *сообщества, популяции, биоценоза, совокупности нескольких видов*. Контроль состояния водного объекта по реакции обитателей водоёма составляет сущность биоиндикации.

Биотестирование имеет несколько другую задачу – контроль качества воды по реакции либо *отдельных особей*, либо *ограниченной их совокупности*. В общем случае при биотестировании изучают реакции специально подготовленных живых организмов или их моделей, что определяет особую значимость в биотестировании проблем культивирования и подготовки биологических тест-объектов.

Исходя из этих характеристик методов биоиндикации и биотестирования, можно заключить, что первое направление представлено большей частью результатами пассивного наблюдения и умозаключения, тогда как второе предполагает необходимость активных исследований и экспериментов. Однако оба эти направления чрезвычайно сложны при реализации и требуют хорошей профессиональной подготовки исследователей.

Что касается биоиндикации, то следует сказать, что в настоящее время практически решена проблема формирования совокупности индикаторных видов для каждого конкретного водоёма. По состоянию индикаторных видов имеется возможность оценить текущее состояние водного объекта и дать прогноз изменения этого состояния в условиях антропогенной нагрузки. Но процесс этот чрезвычайно трудоёмок и практически исключает возможность автоматизации процесса контроля.

Биотестирование в этом отношении имеет неоспоримое преимущество. Контроль качества воды (сточной, природной или питьевой) осуществляется оперативно и может быть

полностью автоматизирован. Затраты на техническое обеспечение не превышают затрат на аппаратуру для гидрохимического анализа, однако позволяют получать информацию в обобщенном виде, что дает существенную экономию средств. Поэтому методы биотестирования во многих странах интенсивно развиваются и многие из них включены в систему государственных стандартов по контролю качества воды.

И наконец, с помощью методов биотестирования можно весьма эффективно решать проблему скриннинга биологической активности как природных, так и синтезированных химических веществ, соединений и препаратов.

Всевозрастающее количество загрязняющих веществ, сбрасываемых в водоём, отсутствие обоснованных норм регламентации сброса на многие вещества, значительное отставание в разработке и внедрении технических средств контроля качества воды по отдельным показателям создают существенные трудности при разработке систем контроля качества вод, базирующихся на принципе предельно допустимых концентраций ингредиентов. Создается положение, при котором возможности контроля качества воды не соответствуют проблемам охраны и использования водных ресурсов.

Это позволяет сделать вывод, что стандартизация качества воды на основе разработанных предельно допустимых норм должна заменяться принципиально новым подходом – *экологическим нормированием*.

Принципы экологического нормирования обуславливают значимость биологических показателей загрязненности. На определении реакции биологического тест-объекта на возмущающее воздействие основаны методы биотестирования, являющиеся естественным приёмом оценки токсичности воды. В ряде случаев, например, в условиях полной неопределённости химического состава загрязнений, биотесты могут представлять собой единственный метод интегральной оценки качества воды.

При интегральной оценке качества вод принципиально важно иметь обоснованный критерий (показатель) качества. Наиболее распространенный критерий токсичности – это выживаемость биологического тест-объекта. Однако использование этого критерия имеет существенный недостаток – продолжительность анализа составляет 48 часов и более. В то же время воздействие токсиканта можно обнаружить и по более ранним изменениям биологического тест-объекта.

Набор тестовых реакций для любого живого организма может быть достаточно обширным. В ходе эволюционного развития живые организмы выработали надёжные механизмы защиты от внешних возмущающих воздействий, в том числе от химических чужеродных для организма веществ. При высокой чувствительности и разрешающей способности специальных датчиков и измерительных устройств стало возможным обнаружить сдвиги в этих механизмах на начальных стадиях реакции. Тем самым существенно сокращается время обнаружения токсических веществ. Естественно, что при этом возрастает значимость интегрального показателя качества воды, так как появляется возможность оперативного переключения системы контроля с определения обобщенных характеристик на анализ отдельных составляющих загрязнения.

Таким образом, биотестирование представляется единственно возможным в настоящее время методом интегральной (обобщенной) оценки качества вод. Развитие этого направления позволит службам контроля осуществлять непрерывное наблюдение за состоянием воды (сточной, природной, питьевой) и наиболее рациональным образом переключать внимание на получение данных по отдельным показателям [368].

С помощью методов биотестирования исследователи пытаются решить широкий круг задач контроля качества водной среды, в частности:

— выявление соответствия условий существования биологическим требованиям гидробионтов и опасности повышения (или понижения) концентраций обычных ингредиентов водной среды;

— оценка токсичности сточных вод и её проявление в условиях взаимодействия с природными факторами водной среды;

— сравнительная оценка чувствительности и устойчивости различных гидробионтов к токсическим веществам и их сочетаниям;

— получение «мониторинговой» информации о степени влияния сброса сточных вод

на водный объект, уровне загрязнённости природных вод, активности самоочищения водоёма, а также об уровне остаточного загрязнения; получение исходной информации для выработки рыбохозяйственных и экологических предельно допустимых концентраций вредных веществ;

— предварительная оценка токсичности (эколого-токсилогический скриннинг) природных и вновь синтезируемых веществ, вводимых в народнохозяйственный оборот; отбор биологически активных препаратов (альгициды, моллюскициды, гербициды и др.), предназначенные для борьбы с вредными гидробионтами.

Эти задачи входят в более широкий круг проблем – биомониторинговых, которые относятся к сфере нормального жизнеобеспечения населения регионов в условиях неблагоприятного воздействия, например, антропогенного характера, или специального использования водных ресурсов. При этом очень важно обладать достоверной и оперативной информацией.

Естественно, что контролировать одновременно весь спектр загрязнений (только веществ, на которые разработаны предельно допустимые нормы, существует более тысячи) невозможно. Необходим мощный интегратор всей информации о качестве воды, который бы адекватно соотносил регистрируемые параметры с реальной действительностью. Поскольку искусственный интегратор такого типа не сконструирован, приходится прибегать к определённым упрощениям и допущениям. Например, чтобы оценить биологические последствия сброса сточных вод в водохранилище и возможное ухудшение качества питьевой воды, воздействуют сточной водой с заданной кратностью разбавления на определённый биотест-объект, а также природной водой на другой биотест-объект и по полученным результатам вычисляют показатель токсичности вод. В данном случае подразумевается, что реакции биотест-объектов аналогичны реакции водной экосистемы (в первом случае) и человека (во втором случае). Очевидно, что такое предположение может быть ошибочным. Тем не менее, в масштабах мониторингового контроля, то есть широкомасштабного и непрерывного слежения за состоянием водного объекта, эффективнее методов биотестирования пока не существует.

Значимость и актуальность методов биотестирования заключается в том, что в условиях неопределённого состава химического загрязнения водной среды они являются единственно приемлемыми по методическим, техническим и социально-экономическим критериям методами интегральной оценки состояния водных экосистем.

Учитывая, что в настоящее время отсутствует достойная альтернатива контроля даже в теоретических предположениях, методы биотестирования приобретают особую актуальность.

Методы биотестирования могут помочь в решении таких важных проблем, как обоснованный допуск химических веществ в природную среду и надёжный контроль токсических соединений.

Это двуединая задача – невозможно решить вопрос качества питьевой воды без обеспечения нормального функционирования водных экосистем. Она останется актуальной до тех пор, пока не будет реализована идея полностью безотходного индустриального и сельскохозяйственного производства. В настоящее время мы должны считаться с фактом постоянного загрязнения окружающей среды, в том числе и водной. Вынужденное использование процессов самоочищения природных водоёмов от стоков, то есть использование резервного фонда водной экосистемы, который обеспечивает её устойчивость и надёжность функционирования в экстремальных (но естественного происхождения) условиях, опасно. Во-первых, это может привести к гибели системы, а во-вторых, не гарантирует повсеместного и постоянного соблюдения и контроля норм сброса стоков.

Поэтому постепенная деградация биоценоза гидроэкосистем может послужить первопричиной внезапного ухудшения качества вод по показателям токсичности, канцерогенности и мутагенности, которые трудно определить в оперативном контроле.

В этой связи мониторинговая система контроля должна включать в себя трёхуровневый оперативный контроль с использованием методов биотестирования и текущий контроль (с учётом естественных циклов развития и сукцессии гидроэкосистем) с использованием методов биоиндикации. Первый уровень контроля обеспечивает экспресс-контроль качества сточных вод на сбросах в водоём, второй – оценку состояния качества воды гидроэкосистемы, а третий – контроль водопользователем.

Действующий состав водопроводных сооружений водозаборов, кондиционирования воды, транспортировки, подачи и распределения воды, не говоря уже об организационно-экономическом управлении и контроле качества воды, на предприятиях ВКХ в странах СНГ и Украине, за исключением Москвы, Санкт-Петербурга, Харькова, Киева и некоторых других, в большей своей части значительно отстает от современных требований и, образно выражаясь, недалеко ушел от каменного века.

Как было показано выше, качество воды характеризуется множеством параметров, отдельные из которых можно определять проведением лабораторных анализов на линии от исходной воды до обработанной. Но отсутствие возможности получения информации в реальном масштабе времени, а значит, возможности в режиме on-line контролировать качественные параметры функционирования всех сооружений, делает невозможным принятие ответственными лицами эффективных оперативных решений. Оптимальная работа сооружений стала зависеть и от наличия программного обеспечения накопления и обработки результатов мониторинга качества воды, позволившего бы ежедневно контролировать соответствие параметров обработки воды и экономических затрат, обеспечивая этим рациональный расход ресурсов. Программно-технический комплекс, будучи гибким многопараметрическим средством, должен базироваться на современных достижениях IT-технологий, обеспечивая сбор, накопление, хранение и обработку всех технических данных о работе сооружений, что позволит контролировать ключевые параметры для решения задач устойчивости и надежности работы системы водоснабжения, обеспечит получение данных в форме отчетов и балансов как по оперативному запросу, так и по установленному времени.

Нужно четко понимать, что действующие системы водоснабжения городов требуют полноценного подхода как к уникальным промышленным площадкам, где техническое обслуживание, контроль качества воды и т.д. невозможны без высокого уровня знаний персонала в различных областях науки и техники, управления в условиях растущего изменения гидробиологического и солевого состава воды, а также технической сложности систем водоснабжения. Коллективы профессионалов водоснабжения городов обязаны обеспечивать устойчивую и надежную работу систем водоснабжения, способствовать тому, чтобы техническое обслуживание стало стратегической задачей по непрерывности предоставляемых услуг с качеством воды в соответствии с нормативными требованиями, рентабельности инвестиций за счет продления срока службы оборудования с высоким КПД.

Таким образом оптимизируется готовность сооружений при минимальной общей стоимости эксплуатации. Здесь производственные службы и техническое обслуживание имеют внутреннюю взаимную трансформацию за счет качественного функционального управления.




За прошедшие два десятилетия произошли значительные достижения в научно-техническом развитии систем водоснабжения городов мира. Они стали ключом к успеху в повышении устойчивости систем водоснабжения, качества воды, социального развития, защиты окружающей среды, экономики водопроводов и т.д.

Городам Украины необходимо обеспечить своевременное проектирование сооружений систем водоснабжения с решением задач в области промышленной информатики и структур автоматизации, обеспечивая высокий уровень контроля качества воды и устойчивости систем водоснабжения, что будет гарантией здоровья и достойного уровня жизни нашего народа.

# Приложение А

Исходные данные для регрессионного анализа зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от величины относительной макрошероховатости и числа Рейнольдса

Таблица А.1

Гидравлическое сопротивление стального водовода диаметром 1200 (1195) мм в течение времени его эксплуатации по данным натурных исследований (источник – река Северский Донец)

| Номер опыта | Дата | $T_{экс}$ | Номер измеряемого участка | Ось манометра, $\frac{O_1}{O_2}$ | $\frac{q, м^3/с}{V, м/с}$ | $i_ф$ | $\lambda_ф$ | $\lambda_{KB_{ф.ср.}}$; $Re >$ 950000 | $Re$ | $l$, м | $\nu$, $см^2/с$ | Пьезометры, $\frac{П_1}{П_2}$ | Потери напора $H$, м | $t$ воды, °С | $\bar{\Delta}=\delta/d_ф$ | $\delta$, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1 | 18.07.1964 | 4 месяца | 4 | $\frac{167,80}{172,4}$ | $\frac{1,384}{1,2296}$ | 0,001574 | 0,0244 | 0,0248 | 1498400 | 17088 | 0,00985 | $\frac{208,8}{181,9}$ | 26,9 | 21 | 0,0028 | 3,3 |
| 2 | 18.07.1964 | | 4 | $\frac{176,47}{172,4}$ | $\frac{1,384}{1,2296}$ | 0,001552 | 0,02407 | | 1498400 | 10615 | 0,00985 | $\frac{198,37}{181,9}$ | 16,47 | 21 | | |
| 3 | 18.07.1964 | | 3 | $\frac{167,80}{176,47}$ | $\frac{1,384}{1,2296}$ | 0,00158 | 0,0245 | | 1498400 | 6473 | 0,00985 | $\frac{208,8}{198,57}$ | 10,23 | 21 | | |
| 4 | 18.07.1964 | | 3–4 | $\frac{167,80}{172,4}$ | $\frac{1,438}{1,273}$ | 0,001714 | 0,0247 | | 1556950 | 17088 | 0,00985 | $\frac{208,9}{179,6}$ | 29,3 | 21 | | |
| 5 | 18.07.1964 | | 3 | $\frac{167,80}{176,47}$ | $\frac{1,438}{1,273}$ | 0,0017503 | 0,0253 | | 1556950 | 6473 | 0,00985 | $\frac{208,9}{197,57}$ | 11,33 | 21 | | |
| 6 | 18.07.1964 | | 4 | $\frac{176,47}{172,4}$ | $\frac{1,438}{1,278}$ | 0,001702 | 0,0245 | | 1556950 | 10615 | 0,00985 | $\frac{197,67}{179,6}$ | 18,07 | 21 | | |
| 7 | 18.07.1964 | | 3–4 | $\frac{167,80}{172,4}$ | $\frac{1,333}{1,185}$ | 0,001527 | 0,0255 | | 1443650 | 17088 | 0,00985 | $\frac{210,5}{184,4}$ | 26,1 | 21 | | |
| 8 | 18.07.1964 | | 3 | $\frac{167,80}{176,47}$ | $\frac{1,333}{1,185}$ | 0,001518 | 0,0253 | | 1443650 | 6473 | 0,00985 | $\frac{210,5}{200,67}$ | 9,83 | 21 | | |
| 9 | 18.07.1964 | | 4 | $\frac{176,47}{172,4}$ | $\frac{1,333}{1,185}$ | 0,001532 | 0,0256 | | 1443650 | 10615 | 0,00985 | $\frac{200,67}{184,4}$ | 16,27 | 21 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 18.07.1964 | 1 г. 1 мес. | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,384 / 1,2996 | 0,001711 | 0,0265 | 0,0269 | 1519187 | 7299 | 0,00985 | 221,29 / 208,8 | 12,49 | 21 | 0,0036 | 4,3 |
| 2 | 18.07.1964 | | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,438 / 1,278 | 0,00186 | 0,0267 | | 1556950 | 7299 | 0,00985 | 222,89 / 208,9 | 13,99 | 21 | | |
| 3 | 18.07.1964 | | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,333 / 1,185 | 0,001642 | 0,0274 | | 1443650 | 7299 | 0,00985 | 222,49 / 210,5 | 11,99 | 21 | | |
| 1 | 12.04.1965 | 1 г. 2 мес.– 1 г. 5 мес. | 3–4 | 167,8 / 172,4 | 1,263 / 1,125 | 0,001527 | 0,0283 | 0,028 | 943356 | 17088 | 0,0143 | 209,9 / 183,8 | 26,1 | 7 | 0,0045 | 5,4 |
| 2 | 19.04.1965 | | 3–4 | 167,8 / 172,4 | 1,272 / 1,133 | 0,001533 | 0,028 | | 999700 | 17088 | 0,0136 | 206,1 / 179,9 | 26,2 | 9 | | |
| 3 | 19.06.1965 | | 3–4 | 167,8 / 172,4 | 1,373 / 1,223 | 0,001773 | 0,0278 | | 1322160 | 17088 | 0,0111 | 212,6 / 182,3 | 30,3 | 16 | | |
| 4 | 20.07.1965 | | 3–4 | 167,8 / 172,4 | 1,407 / 1,253 | 0,001866 | 0,0279 | | 1478810 | 17088 | 0,0101 | 212,4 / 180,5 | 31,9 | 20 | | |
| 1 | 12.04.1965 | 1 г. 10 мес.–2 г.1 мес. | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,263 / 1,125 | 0,0015604 | 0,0289 | 0,0298 | 943356 | 7299 | 0,0143 | 221,29 / 209,9 | 11,39 | 7 | 0,005 | 6,0 |
| 2 | 19.04.1965 | | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,272 / 1,133 | 0,001615 | 0,0295 | | 999700 | 7299 | 0,0136 | 217,89 / 206,1 | 11,79 | 9 | | |
| 3 | 19.06.1965 | | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,373 / 1,223 | 0,001957 | 0,0307 | | 1322160 | 7299 | 0,0111 | 226,89 / 212,6 | 14,29 | 16 | | |
| 4 | 20.07.1965 | | 2 | 153,69 / 167,8 | 1,407 / 1,253 | 0,001999 | 0,0299 | | 1478810 | 7299 | 0,0101 | 226,99 / 212,4 | 14,59 | 20 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12.04.1965 | 2 года | 1-2 – 3-4 | 166,325 / 172,4 | 1,269 / 1,125 | 0,0015993 | 0,0297 | 0,0295 | 943356 | 31903 | 0,0143 | 234,825 / 183,8 | 51,025 | 7 | 0,004 | 4,8 |
| 2 | 19.04.1965 | | 1-2 – 3-4 | 166,325 / 172,4 | 1,278 / 1,133 | 0,00161191 | 0,0295 | | 999700 | 31903 | 0,0136 | 231,325 / 179,9 | 51,425 | 9 | | |
| 3 | 19.06.1965 | | 1-2 – 3-4 | 166,325 / 172,4 | 1,313 / 1,223 | 0,00187521 | 0,0294 | | 1322160 | 31903 | 0,0111 | 242,125 / 182,3 | 59,825 | 16 | | |
| 4 | 20.07.1965 | | 1-2 – 3-4 | 166,325 / 172,4 | 1,407 / 1,253 | 0,00197551 | 0,0295 | | 1478810 | 31903 | 0,0101 | 243,525 / 180,5 | 63,025 | 20 | | |
| 1 | 18.07.1964 | 2 г. 1 мес. | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,384 / 1,2296 | 0,0019458 | 0,0302 | 0,030 | 1498400 | 7521 | 0,00985 | 235,925 / 221,29 | 14,635 | 21 | 0,005 | 6,0 |
| 2 | 18.07.1964 | | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,438 / 1,278 | 0,0021054 | 0,0303 | | 1556950 | 7521 | 0,00985 | 238,725 / 222,89 | 15,835 | 21 | | |
| 3 | 18.07.1964 | | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,333 / 1,185 | 0,0018528 | 0,031 | | 1443650 | 7521 | 0,00985 | 236,425 / 222,49 | 13,935 | 21 | | |
| 1 | 2.04.1966 | 2 г. 2 мес. – 2 г. 8 мес. | 3-4 | 167,8 / 172,4 | 1,347 / 1,197 | 0,001802 | 0,0295 | 0,03 | 1004470 | 17083 | 0,0143 | 207,8 / 177,0 | 30,8 | 7 | 0,0055 | 6,6 |
| 2 | 26.09.1966 | | 3-4 | 167,8 / 167,53 | 1,383 / 1,232 | 0,001941 | 0,030 | | 1128549 | 15076 | 0,0131 | 212,4 / 183,13 | 29,27 | 10 | | |
| 3 | 10.11.1966 | | 3-4 | 167,8 / 172,4 | 1,375 / 1,225 | 0,001937 | 0,0303 | | 967100 | 17088 | 0,0152 | 213,2 / 180,1 | 33,1 | 5 | | |
| 4 | 10.11.1966 | | 3-4 | 167,8 / 172,4 | 1,48 / 1,318 | 0,002253 | 0,0304 | | 1040526 | 17088 | 0,0152 | 219,1 / 180,6 | 38,5 | 5 | | |
| 5 | 11.11.1966 | | 3-4 | 167,8 / 172,4 | 1,625 / 1,447 | 0,002674 | 0,030 | | 1142360 | 17088 | 0,0152 | 228,0 / 182,3 | 45,7 | 5 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 12.04.1965 | 2 г.10 мес. – 3 г. 1 мес. | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,263 / 1,125 | 0,001799 | 0,0334 | 0,0327 | 943356 | 7521 | 0,0143 | 234,825 / 221,29 | 13,535 | 7 | 0,006 | 7,2 |
| 2 | 19.04.1965 | | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,272 / 1,133 | 0,001786 | 0,0327 | | 999700 | 7521 | 0,0136 | 231,325 / 217,89 | 13,435 | 9 | | |
| 3 | 19.06.1965 | | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,373 / 1,223 | 0,002025 | 0,0318 | | 1322160 | 7521 | 0,0111 | 242,125 / 226,89 | 15,235 | 16 | | |
| 4 | 20.07.1965 | | 1 | 166,325 / 153,69 | 1,407 / 1,253 | 0,002198 | 0,0329 | | 1478810 | 7521 | 0,0101 | 243,525 / 226,99 | 16,535 | 20 | | |
| 1 | 8.04.1967 | 3 г. 3 мес. – 3 г. 8 мес. | 3-4 | 167,8 / 172,4 | 1,533 / 1,362 | 0,002441 | 0,0309 | 0,0312 | 1142930 | 17083 | 0,0143 | 223,1 / 181,4 | 41,7 | 7 | 0,0053 | 6,3 |
| 2 | 2.05.1967 | | 3-4 | 176,27 / 172,4 | 1,425 / 1,269 | 0,0021318 | 0,0311 | | 1324170 | 10615 | 0,0115 | 205,63 / 183,0 | 22,63 | 15 | | |
| 3 | 3.05.1967 | | 4 | 176,27 / 172,4 | 1,36 / 1,211 | 0,002003 | 0,0320 | | 1263650 | 10615 | 0,0115 | 210,47 / 189,2 | 21,27 | 15 | | |
| 4 | 3.05.1967 | | 4 | 176,27 / 172,4 | 1,486 / 1,324 | 0,002295 | 0,0307 | | 1381560 | 10615 | 0,0115 | 210,57 / 186,2 | 24,37 | 15 | | |
| 5 | 3.05.1967 | | 4 | 176,27 / 172,4 | 1,58 / 1,407 | 0,002569 | 0,0305 | | 1468100 | 10615 | 0,0115 | 210,87 / 183,6 | 27,27 | 15 | | |
| 6 | 3.05.1967 | | 4 | 176,27 / 172,4 | 1,541 / 1,373 | 0,002503 | 0,0312 | | 1482600 | 10615 | 0,0115 | 209,27 / 182,7 | 26,57 | 15 | | |
| 7 | 3.05.1967 | | 4 | 176,27 / 172,4 | 1,697 / 1,512 | 0,002936 | 0,0301 | | 1577700 | 10615 | 0,0115 | 213,97 / 182,8 | 31,17 | 15 | | |
| 8 | 2.07.1967 | | 3 | 167,8 / 175,27 | 2,118 / 1,881 | 0,0045291 | 0,030 | | 2401277 | 6255 | 0,0094 | 226,4 / 197,67 | 28,33 | 23 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 9 | 16.09.1967 | 3 г. 3 мес. – 3 г. 8 мес | 3-4 | $\frac{167,8}{172,4}$ | $\frac{1,2361}{1,098}$ | 0,001621 | 0,0316 | 0,0312 | 1187020 | 17083 | 0,0111 | $\frac{216,5}{188,8}$ | 27,7 | 17 | 0,0053 | 6,3 |
| 10 | 16.09.1967 | | 3-4 | $\frac{167,8}{172,4}$ | $\frac{1,194}{1,06}$ | 0,001551 | 0,0324 | | 1145940 | 17083 | 0,0111 | $\frac{216,9}{190,4}$ | 26,5 | 17 | | |
| 11 | 16.09.1967 | | 3-4 | $\frac{167,8}{172,4}$ | $\frac{1,152}{1,023}$ | 0,00144 | 0,0323 | | 1105940 | 17083 | 0,0111 | $\frac{214,7}{190,1}$ | 24,6 | 17 | | |
| 1 | 16.09.1967 | 4 г. 2 мес. | 1-2 – 3-4 | $\frac{170,28}{172,4}$ | $\frac{1,2361}{1,098}$ | 0,0017348 | 0,0338 | 0,0337 | 1187020 | 32268 | 0,0111 | $\frac{243,78}{188,8}$ | 55,98 | 17 | 0,0065 | 7,8 |
| 2 | 16.09.1967 | | 1-2 – 3-4 | $\frac{170,28}{172,4}$ | $\frac{1,194}{1,06}$ | 0,00161 | 0,0336 | | 1145940 | 32268 | 0,0111 | $\frac{242,38}{190,4}$ | 51,98 | 17 | | |
| 3 | 16.09.1967 | | 1-2 – 3-4 | $\frac{170,28}{172,4}$ | $\frac{1,152}{1,023}$ | 0,001502 | 0,0337 | | 1105940 | 32268 | 0,0111 | $\frac{238,58}{190,1}$ | 48,48 | 17 | | |
| 1 | 4.02.1970 | 5 лет 2 мес. | 17 | $\frac{134,72}{162,13}$ | $\frac{1,52}{1,354}$ | 0,00278 | 0,0356 | 0,0364 | 927630 | 4024 | 0,0173 | $\frac{180,12}{168,93}$ | 11,19 | 1 | 0,0087 | 10,4 |
| 2 | 4.02.1970 | | 17 | $\frac{134,72}{162,13}$ | $\frac{1,35}{1,2}$ | 0,00219 | 0,0357 | | 832369 | 4024 | 0,0173 | $\frac{180,71}{171,9}$ | 8,81 | 1 | | |
| 3 | 4.02.1970 | | 17 | $\frac{134,72}{162,13}$ | $\frac{1,27}{1,13}$ | 0,002 | 0,0367 | | 783810 | 4024 | 0,0173 | $\frac{181,46}{173,41}$ | 8,05 | 1 | | |
| 4 | 5.02.1970 | | 17 | $\frac{134,72}{162,13}$ | $\frac{1,16}{1,03}$ | 0,0017 | 0,0376 | | 714450 | 4024 | 0,0173 | $\frac{181,52}{174,68}$ | 6,84 | 1 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 16.09.1967 | 5 лет 3 мес. | 1 | 170,28 / 153,69 | 1,2361 / 1,098 | 0,0018754 | 0,0365 | 0,0371 | 1187020 | 7886 | 0,0111 | 243,78 / 228,99 | 14,79 | 17 | 0,0082 | 9,8 |
| 2 | 16.09.1967 | | 1 | 170,28 / 153,69 | 1,194 / 1,06 | 0,001786 | 0,0373 | | 1145940 | 7886 | 0,0111 | 242,38 / 228,29 | 14,09 | 17 | | |
| 3 | 16.09.1967 | | 1 | 170,28 / 153,69 | 1,152 / 1,023 | 0,001672 | 0,0375 | | 1105940 | 7886 | 0,0111 | 238,58 / 225,39 | 13,19 | 17 | | |
| 1 | 6.12.1970 | 7 лет 1 мес. | 1-2-3 | 166,325 / 153,78 | 1,319 / 1,171 | 0,00214258 | 0,0367 | 0,0372 | 812254 | 21075 | 0,0173 | 251,025 / 205,87 | 45,155 | 1 | 0,009 | 10,8 |
| 2 | 6.12.1970 | | 1-2-3 | 166,325 / 153,78 | 1,266 / 1,124 | 0,00199549 | 0,0371 | | 779650 | 21075 | 0,0173 | 245,825 / 203,77 | 42,055 | 1 | | |
| 3 | 6.12.1970 | | 1-2-3 | 166,325 / 153,78 | 0,96 / 0,852 | 0,0011698 | 0,0378 | | 590980 | 21075 | 0,0173 | 224,825 / 200,17 | 24,055 | 1 | | |
| 4 | 6.12.1970 | | 1-2-3 | 166,325 / 153,78 | 1,158 / 1,028 | 0,0016704 | 0,0371 | | 713060 | 21075 | 0,0173 | 238,575 / 203,37 | 35,205 | 1 | | |
| 1 | 6.12.1970 | 7 лет 6 мес. | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,319 / 1,171 | 0,002134 | 0,0365 | 0,037 | 812254 | 7299 | 0,0173 | 234,38 / 218,8 | 15,58 | 1 | 0,009 | 10,7 |
| 2 | 6.12.1970 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,266 / 1,124 | 0,001983 | 0,0368 | | 779650 | 7299 | 0,0173 | 230,28 / 215,8 | 14,48 | 1 | | |
| 3 | 6.12.1970 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 0,96 / 0,852 | 0,0011618 | 0,0376 | | 590980 | 7299 | 0,0173 | 215,78 / 207,3 | 8,48 | 1 | | |
| 4 | 6.12.1970 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,158 / 1,028 | 0,001668 | 0,037 | | 713060 | 7299 | 0,0173 | 225,68 / 213,5 | 12,18 | 1 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 7.06.1971 | 9 лет | 1 | 166,32 / 153,69 | 1,2317 / 1,09 | 0,0021705 | 0,0428 | 0,043 | 1385691 | 7521 | 0,0094 | 251,325 / 235,10 | 16,225 | 23 | 0,0112133 | 13,3 – 13,4 |
| 2 | 7.06.1971 | | 1 | 166,32 / 153,69 | 1,017 / 0,91 | 0,001518 | 0,0429 | | 1156862 | 7521 | 0,0094 | 225,32 / 213,9 | 11,42 | 23 | | |
| 3 | 7.06.1971 | | 1 | 166,32 / 153,69 | 1,32 / 1,17 | 0,0025428 | 0,04355 | | 1487394 | 7521 | 0,0094 | 254,325 / 235,2 | 19,125 | 23 | | |
| 1 | 2.11.1976 | 12 лет | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,74 / 1,54 | 0,004836 | 0,0472 | 0,0484 | 1162466 | 7299 | 0,015834 | 207,7 / 172,4 | 35,3 | 3,6 | 0,0127196 | 15,0 – 15,2 |
| 2 | 2.11.1976 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,5 / 1,327 | 0,003781 | 0,0503 | | 1001495 | 7299 | 0,015834 | 200,1 / 172,5 | 27,6 | 3,6 | | |
| 3 | 2.11.1976 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,61 / 1,427 | 0,00415 | 0,04778 | | 1076964 | 7299 | 0,015834 | 202,6 / 172,3 | 30,3 | 3,6 | | |
| 4 | 2.11.1976 | | 2 | 153,78 / 167,8 | 1,66 / 1,47 | 0,004466 | 0,04846 | | 1109416 | 7299 | 0,015834 | 205,3 / 172,7 | 32,6 | 3,6 | | |
| 1 | 12.05.1984 | 19 лет 7 мес. | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,69 / 1,5 | 0,00523 | 0,0545 | 0,0549 | 1598590 | 14820 | 0,011213 | 250,125 / 172,6 | 77,525 | 15,8 | 0,0127196 | 15,0 – 15,2 |
| 2 | 12.05.1984 | | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,53 / 1,35 | 0,00426 | 0,0548 | | 14387318 | 14820 | 0,011213 | 235,56 / 172,4 | 63,16 | 15,8 | | |
| 3 | 12.05.1984 | | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,41 / 1,248 | 0,0036936 | 0,0556 | | | 14820 | 0,011213 | 226,64 / 171,9 | 54,74 | 15,8 | | |
| 1 | 15.12.1991 | 28 лет | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,73 / 1,53 | 0,005784 | 0,0578 | 0,0573 | 10725976 | 14820 | 0,017046 | 257,825 / 172,1 | 85,725 | 1,3 | 0,0153138 | 18,3 |
| 2 | 15.12.1991 | | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,41 / 1,25 | 0,003785 | 0,05688 | | | 14820 | | 228,7 / 172,6 | 56,1 | 1,3 | | |

Продолжение табл. А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.06.1996 | 32 года | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,63 / 1,44 | 0,005413 | 0,0612 | 0,0608 | 1837087 | 14820 | 0,009367 | 252,925 / 172,7 | 80,225 | 23,2 | 0,015648536 | 18,7 |
| 2 | 6.06.1996 | | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,53 / 1,35 | 0,004687 | 0,0607 | | 1722269 | 14820 | | 242,56 / 173,1 | 69,46 | 23,2 | | |
| 3 | 6.06.1996 | | 1-2 | 166,325 / 167,8 | 1,57 / 1,39 | 0,004989 | 0,0605 | | 1773299 | 14820 | | 246,35 / 172,4 | 73,95 | 23,2 | | |
| 1 | 03.10.2000 | 37 лет | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,615 / 1,43 | 0,005479 | 0,06278 | 0,0634 | 1444736 | 14902 | 0,011906 | 251,28 / 169,63 | 81,65 | 13,5 | 0,0159 | 19 |
| 2 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,525 / 1,35 | 0,005506 | 0,07074 | | 1364354 | 14902 | 0,011906 | 251,68 / 169,63 | 82,05 | 13,5 | | |
| 3 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,537 / 1,36 | 0,005345 | 0,06763 | | 1374853 | 14902 | 0,011906 | 249,28 / 169,63 | 79,65 | 13,5 | | |
| 4 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,660 / 1,47 | 0,005586 | 0,06059 | | 1484994 | 14902 | 0,011906 | 252,88 / 169,63 | 83,25 | 13,5 | | |
| 5 | 03.10.2000 | | 1-2 | 167,80 / 176,47 | 1,844 / 1,64 | 0,006794 | 0,05972 | | 1649555 | 14902 | 0,011906 | 270,88 / 169,63 | 101,25 | 13,5 | | |
| 6 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,834 / 1,63 | 0,006848 | 0,06086 | | 1640374 | 14902 | 0,011906 | 271,68 / 169,63 | 102,05 | 13,5 | | |
| 7 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,722 / 1,53 | 0,006392 | 0,06442 | | 1540400 | 14902 | 0,011906 | 264,88 / 169,63 | 95,25 | 13,5 | | |
| 8 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,007 / 0,89 | 0,003305 | 0,09743 | | 900722 | 14902 | 0,011906 | 218,88 / 169,63 | 49,25 | 13,5 | | |
| 9 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,884 / 0,78 | 0,002151 | 0,08222 | | 790962 | 14902 | 0,011906 | 201,68 / 169,63 | 32,05 | 13,5 | | |
| 10 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,564 / 0,50 | 0,00095 | 0,08927 | | 504367 | 14902 | 0,011906 | 183,68 / 169,53 | 14,15 | 13,5 | | |
| 11 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,555 / 0,49 | 0,000956 | 0,09269 | | 496724 | 14902 | 0,011906 | 183,68 / 169,43 | 14,25 | 13,5 | | |

Окончание табл.А.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 12 | 03.10.2000 | 37 лет | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,399 / 0,35 | 0,000554 | 0,10352 | 0,0634 | 357634 | 14902 | 0,011906 | 177,68 / 169,43 | 8,25 | 13,5 | 0,0159 | 19 |
| 13 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,365 / 0,32 | 0,000473 | 0,10610 | | 326558 | 14902 | 0,011906 | 176,48 / 169,43 | 7,05 | 13,5 | | |
| 14 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,226 / 0,20 | 0,000232 | 0,13559 | | 202083 | 14902 | 0,011906 | 172,88 / 169,43 | 3,45 | 13,5 | | |
| 15 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,130 / 0,12 | 0,000158 | 0,27649 | | 116795 | 14902 | 0,011906 | 171,68 / 169,33 | 2,35 | 13,5 | | |
| 16 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,159 / 0,14 | 0,000164 | 0,19378 | | 142449 | 14902 | 0,011906 | 171,68 / 169,23 | 2,45 | 13,5 | | |
| 17 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,354 / 0,31 | 0,000299 | 0,07104 | | 317067 | 14902 | 0,011906 | 173,68 / 169,23 | 4,45 | 13,5 | | |
| 18 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,602 / 0,53 | 0,001043 | 0,08599 | | 538720 | 14902 | 0,011906 | 184,88 / 169,33 | 15,55 | 13,5 | | |
| 19 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 0,999 / 0,89 | 0,002788 | 0,08353 | | 893499 | 14902 | 0,011906 | 210,88 / 169,33 | 41,55 | 13,5 | | |
| 20 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,068 / 0,95 | 0,002708 | 0,07096 | | 955316 | 14902 | 0,011906 | 209,68 / 169,33 | 40,35 | 13,5 | | |
| 21 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,308 / 1,16 | 0,003802 | 0,06643 | | 1169830 | 14902 | 0,011906 | 226,08 / 169,43 | 56,65 | 13,5 | | |
| 22 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,365 / 1,21 | 0,003748 | 0,06010 | | 1221233 | 14902 | 0,011906 | 225,28 / 169,43 | 55,85 | 13,5 | | |
| 23 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,500 / 1,33 | 0,00466 | 0,06191 | | 1341761 | 14902 | 0,011906 | 238,88 / 169,43 | 69,45 | 13,5 | | |
| 24 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,592 / 1,41 | 0,00517 | 0,06097 | | 1424156 | 14902 | 0,011906 | 246,48 / 169,43 | 77,05 | 13,5 | | |
| 25 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,621 / 1,44 | 0,005063 | 0,05763 | | 1449521 | 14902 | 0,011906 | 244,88 / 169,43 | 75,45 | 13,5 | | |
| 26 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,763 / 1,54 | 0,00568 | 0,05639 | | 1552159 | 14902 | 0,011906 | 254,08 / 169,43 | 84,65 | 13,5 | | |
| 27 | 03.10.2000 | | 1-2 | 166,88 / 167,43 | 1,068 / 0,95 | 0,002665 | 0,06952 | | 957500 | 14902 | 0,011906 | 209,14 / 169,43 | 39,71 | 13,5 | | |

Таблица А.2

Гидравлическое сопротивление стального водовода диаметром 1400 (1396) мм в течение времени его эксплуатации по данным натурных исследований (источник – река Северский Донец)

| Номер опыта | Дата | $T_{экс}$ | Номер измеряемого участка | Ось манометра, $\frac{O_1}{O_2}$ | $\frac{q, м^3/с}{V, м/с}$ | $i_ф$ | $\lambda_ф$ | $\lambda_{KB_{ф.ср.}}$, $Re >$ 950000 | $Re$ | $l$, м | $\nu$, $см^2/с$ | Пьезометры, $\frac{П_1}{П_2}$ | Потери напора $H$, м | $t$ воды, °С | $\bar{\Delta}=\delta/d_ф$ | $\delta$, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1 | 16.09.1967 | 10 месяцев | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,75}{1,143}$ | 0,001552 | 0,0325 | 0,0319 | 1454720 | 7303,5 | 0,0011 | $\frac{228,03}{216,69}$ | 11,34 | 17 | 0,000644699 | 0,9 |
| 2 | 16.09.1967 | | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,861}{1,216}$ | 0,001703 | 0,0315 | | 1547636 | 7303,5 | | $\frac{223,73}{211,29}$ | 12,44 | 17 | | |
| 3 | 16.09.1967 | | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,792}{1,171}$ | 0,001634 | 0,0326 | | 1490300 | 7303,5 | | $\frac{221,63}{209,69}$ | 11,94 | 17 | | |
| 4 | 16.09.1967 | | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,916}{1,252}$ | 0,001771 | 0,0309 | | 1593450 | 7303,5 | | $\frac{225,33}{212,39}$ | 12,94 | 17 | | |
| 1 | 03.08.1968 | 1 год 9 мес. (21 мес.) | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,86}{1,215}$ | 0,001867 | 0,0346 | 0,035 | 1726900 | 7303,5 | 0,00985 | $\frac{230,03}{216,39}$ | 13,64 | 21 | 0,001862464 | 2,6 |
| 2 | 03.08.1968 | | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,79}{1,17}$ | 0,001771 | 0,0354 | | 1662900 | 7303,5 | | $\frac{228,73}{215,79}$ | 12,94 | 21 | | |
| 3 | 03.08.1968 | | 6 | $\frac{151,83}{167,89}$ | $\frac{1,76}{1,15}$ | 0,001634 | 0,0338 | | 1634500 | 7303,5 | | $\frac{227,53}{215,59}$ | 11,94 | 21 | | |
| 4 | 03.08.1968 | | 6 | $\frac{151,83}{167,69}$ | $\frac{1,71}{1,117}$ | 0,001648 | 0,0362 | | 1587600 | 7303,5 | | $\frac{226,73}{214,69}$ | 12,04 | 21 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 06.12.1970 | 4 года 1 мес. (49 месяцев) | 6 | 151,83 / 167,69 | 2,044 / 1,336 | 0,002552 | 0,0392 | 0,0397 | 1081150 | 7303,5 | 0,0173 | 226,63 / 207,99 | 18,64 | 1 | 0,004297994 | 6 |
| 2 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,69 | 1,965 / 1,284 | 0,00227 | 0,0377 | | 1039070 | 7303,5 | | 223,13 / 206,69 | 16,64 | 1 | | |
| 3 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,69 | 1,915 / 1,251 | 0,002278 | 0,0399 | | 1012300 | 7303,5 | | 221,93 / 205,29 | 16,64 | 1 | | |
| 4 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,69 | 2,147 / 1,399 | 0,002771 | 0,0388 | | 1132138 | 7303,5 | | 229,83 / 209,59 | 20,24 | 1 | | |
| 5 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,69 | 1,581 / 1,033 | 0,001538 | 0,0395 | | 835900 | 7303,5 | | 226,33 / 215,09 | 11,24 | 1 | | |
| 6 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,69 | 1,486 / 0,971 | 0,001429 | 0,0415 | | 785700 | 7303,5 | | 222,13 / 211,69 | 10,44 | 1 | | |
| 1 | 06.12.1970 | 4 года 1 мес. (49 мес.) | 6 | 151,83 / 167,89 | 1,422 / 0,929 | 0,001278 | 0,0406 | | 751700 | 7303,5 | 0,0173 | 219,73 / 210,19 | 9,34 | 1 | 0,00422636 | 5,9 |
| 2 | 06.12.1970 | | 6 | 151,83 / 167,89 | 1,458 / 0,953 | 0,001333 | 0,0402 | | 771210 | 7303,5 | | 217,43 / 207,69 | 9,74 | 1 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 06.12.1970 | 2 года 9 мес. (33 мес.) | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,25 / 0,817 | 0,000105 | 0,0431 | | 611500 | 7669,5 | 0,0173 | 234,69 / 226,63 | 8,06 | 1 | 0,002936963 | 4,1 |
| 2 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,277 / 0,8347 | 0,0010769 | 0,0423 | | 675479 | 7669,5 | | 231,39 / 223,13 | 8,26 | 1 | | |
| 3 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,3055 / 0,853 | 0,001103 | 0,0415 | | 690280 | 7669,5 | | 230,39 / 221,93 | 8,46 | 1 | | |
| 4 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,388 / 0,907 | 0,001233 | 0,0411 | | 733980 | 7669,5 | | 239,29 / 229,83 | 9,46 | 1 | | |
| 5 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,581 / 1,033 | 0,001533 | 0,0393 | | 835900 | 7669,5 | | 238,09 / 226,33 | 11,76 | 1 | | |
| 6 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,486 / 0,971 | 0,00135 | 0,0392 | | 785780 | 7669,5 | | 232,49 / 222,13 | 10,36 | 1 | | |
| 7 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,422 / 0,929 | 0,001285 | 0,0408 | | 751700 | 7669,5 | | 229,39 / 219,53 | 9,86 | 1 | | |
| 8 | 06.12.1970 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,458 / 0,953 | 0,001324 | 0,0399 | | 771210 | 7669,5 | | 227,59 / 217,13 | 10,16 | 1 | | |
| 1 | 03.03.1968 | 2 года 9 мес. (33 мес.) | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,86 / 1,215 | 0,001989 | 0,0369 | 0,0372 | 1726900 | 7669,5 | 0,00985 | 245,29 / 230,03 | 15,26 | 21 | 0,002793696 | 3,9 |
| 2 | 03.03.1968 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,79 / 1,17 | 0,001872 | 0,0375 | | 1662900 | 7669,5 | | 243,09 / 228,73 | 14,36 | 21 | | |
| 3 | 03.03.1968 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,76 / 1,15 | 0,001741 | 0,0361 | | 1634500 | 7669,5 | | 240,89 / 227,53 | 13,36 | 21 | | |
| 4 | 03.03.1968 | | 5 | 169,69 / 151,83 | 1,71 / 1,117 | 0,001741 | 0,0382 | | 1587600 | 7669,5 | | 240,09 / 226,73 | 13,36 | 21 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 24.06.1972 | 5 лет 7 мес. (67 мес.) | 6 | 151,83 / 167,89 | 1,9708 / 1,288 | 0,002615185 | 0,04329 | 0,04329 | 1872454 | 7303,5 | 0,009630138 | 227.79 / 208.69 | 19,1 | 22 | 0,00530086 | 7,4 |
| 1 | 12.03.1978 | 12 лет 4 мес. (148 мес.) | 5-6 | 151,83 / 167,42 | 1,875 / 1,225 | 0,00284165 | 0,05201 | 0,05201 | 1042636 | 16786 | 0,01644869 | 217.66 / 169.96 | 47,7 | 2,4 | 0,0085243 | 11,9 |
| 1 | 15.10.1985 | 19 лет (228 мес.) | 5-6 | 169,6 / 167,42 | 2,0077 / 1,31227 | 0,00332226 | 0,053 | 0,053 | 1543263 | 14973 | 0,0119045 | 219.55 / 169.8 | 49,75 | 13,5 | 0,0100286 5 | 14 |
| 1 | 20.04.1990 | 24 года (288 мес.) | 5-6 | 169,6 / 167,42 | 1,9583 / 1,279 | 0,003479597 | 0,0583 | 0,0583 | 1367288 | 14973 | 0,013096 | 222.3 / 170.2 | 52,1 | 10 | 0,01031518 | 14,4 |
| 1 | 24.06.1995 | 29 лет (348 мес.) | 5-6 | 169,6 / 167,42 | 1,7583 / 1,149 | 0,002905229 | 0,06044 | 0,06044 | 1710003 | 14973 | 0,009407 | 211.75 / 168.25 | 43,5 | 23 | 0,0108166 | 15,1 |
| 1 | 12.07.1995 | 29 лет 1 мес. (349 мес.) | 5-6 | 169,6 / 167,42 | 1,666 / 1,0893 | 0,002611367 | 0,06045 | 0,06045 | 1662554 | 14973 | 0,00917275 | 208.3 / 169.2 | 39,1 | 24,1 | 0,0108882 | 15,2 |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 6.08.2000 | 35 лет (420 мес.) | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,679 / 1,10 | 0,002673 | 0,060804 | | 1684863 | 14973 | 0,009092 | 209,6 / 169,575 | 40,025 | 24,5 | 0,0111747 | 15,6 |
| 2 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,617 / 1,11 | 0,002676 | 0,059498 | | 1704311 | 14973 | | 209,6 / 169,525 | 40,075 | 24,5 | | |
| 3 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,653 / 1,08 | 0,002673 | 0,062739 | | 1658675 | 14973 | | 209,6 / 169,575 | 40,025 | 24,5 | | |
| 4 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,515 / 0,94 | 0,002005 | 0,062159 | | 1443291 | 14973 | | 199,6 / 169,575 | 30,025 | 24,5 | | |
| 5 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,424 / 0,93 | 0,002009 | 0,063517 | | 1428960 | 14973 | | 199,6 / 169,525 | 30,075 | 24,5 | | |
| 6 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 0,870 / 0,57 | 0,00082 | 0,069354 | | 873651,7 | 14973 | | 181,7 / 169,425 | 12,275 | 24,5 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 6.08.2000 | 35 лет (420 мес.) | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 0,771 / 0,50 | 0,00066 | 0,071137 | | 773721,6 | 14973 | 0,009092 | 179,3 / 169,425 | 9,875 | 24,5 | 0,0111747 | 15,6 |
| 8 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 0,872 / 0,57 | 0,000833 | 0,070187 | | 875499,7 | 14973 | | 181,9 / 169,425 | 12,475 | 24,5 | | |
| 9 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 0,000 / 0,34 | 0,000346 | 0,081889 | | 522041,4 | 14973 | | 174,6 / 169,425 | 5,175 | 24,5 | | |
| 10 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,311 / 0,86 | 0,001748 | 0,065231 | | 1315467 | 14973 | | 195,6 / 169,425 | 26,175 | 24,5 | | |
| 11 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,316 / 0,86 | 0,001748 | 0,064689 | | 1320969 | 14973 | | 195,6 / 169,425 | 26,175 | 24,5 | | |
| 12 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,324 / 0,87 | 0,001782 | 0,065148 | | 1328817 | 14973 | | 196,1 / 169,425 | 26,675 | 24,5 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 13 | 6.08.2000 | 35 лет (420 мес.) | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,335 / 0,87 | 0,001778 | 0,063992 | | 1339504 | 14973 | 0,009092 | 196,1 / 169,475 | 26,625 | 24,5 | 0,0111747 | 15,6 |
| 14 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,561 / 1,02 | 0,002349 | 0,061846 | | 1566124 | 14973 | | 204,6 / 169,425 | 35,175 | 24,5 | | |
| 15 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,956 / 1,28 | 0,003612 | 0,0605 | | 1963285 | 14973 | | 223,6 / 169,525 | 54,075 | 24,5 | | |
| 16 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,000 / 1,31 | 0,003742 | 0,059948 | | 2007556 | 14973 | | 225,6 / 169,575 | 56,025 | 24,5 | | |
| 17 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,987 / 1,30 | 0,003875 | 0,062903 | | 1994505 | 14973 | | 227,6 / 169,575 | 58,025 | 24,5 | | |
| 18 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 1,992 / 1,30 | 0,003862 | 0,062417 | | 1998804 | 14973 | | 227,4 / 169,575 | 57,825 | 24,5 | | |

Продолжение табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 19 | 6.08.2000 | 35 лет (420 мес.) | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,024 / 1,32 | 0,003942 | 0,061718 | | 2030843 | 14973 | 0,009092 | 228,6 / 169,575 | 59,025 | 24,5 | 0,0111747 | 15,6 |
| 20 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,077 / 1,36 | 0,004209 | 0,062616 | | 2083431 | 14973 | | 232,6 / 169,575 | 63,025 | 24,5 | | |
| 21 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,120 / 1,39 | 0,004309 | 0,061448 | | 2128009 | 14973 | | 234,1 / 169,575 | 64,525 | 24,5 | | |
| 22 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,059 / 1,35 | 0,004142 | 0,062626 | | 2066670 | 14973 | | 231,6 / 169,575 | 62,025 | 24,5 | | |
| 23 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,026 / 1,32 | 0,003942 | 0,061609 | | 2032634 | 14973 | | 228,6 / 169,575 | 59,025 | 24,5 | | |
| 24 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,070 / 1,35 | 0,004142 | 0,062002 | | 2077034 | 14973 | | 231,6 / 169,575 | 62,025 | 24,5 | | |

Окончание табл. А.2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 6.08.2000 | 35 лет (420 мес.) | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,005 / 1,31 | 0,003742 | 0,059651 | | 2012546 | 14973 | 0,009092 | 225,6 / 169,575 | 56,025 | 24,5 | 0,0111747 | 15,6 |
| 26 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,036 / 1,33 | 0,003942 | 0,060963 | | 2043382 | 14973 | | 228,6 / 169,575 | 59,025 | 24,5 | | |
| 27 | 6.08.2000 | | 1–3 | 169,6 / 167,425 | 2,156 / 1,41 | 0,004343 | 0,059886 | | 2163913 | 14973 | | 234,6 / 169,575 | 65,025 | 24,5 | | |

Таблица А.3

Гидравлическое сопротивление стального водовода диаметром 1600 (1590) мм в течение времени его эксплуатации по данным натурных исследований (источник – река Северский Донец)

| Номер опыта | Дата | $T_{экс}$ | Номер измеряемого участка | Ось манометра, $\frac{O_1}{O_2}$ | $\frac{q, м^3/с}{V, м/с}$ | $i_ф$ | $\lambda_ф$ | $\lambda_{KB_{ф.ср.}}$, $Re >$ 950000 | $Re$ | $l$, м | $\nu$, $см^2/с$ | Пьезометры, $\frac{П_1}{П_2}$ | Потери напора $H$, м | $t$ воды, °С | $\bar{\Delta}=\delta/d_ф$ | $\delta$, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1 | 16.09.1967 | 2 месяца | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,75}{0,8817}$ | 0,000725 | 0,029 | 0,0297 | 1282472 | 6834 | 0,011 | $\frac{208,1}{203,14}$ | 4,96 | 17 | 0,0003135 | 0,5 |
| 2 | 16.09.1967 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,861}{0,9377}$ | 0,000901 | 0,0319 | | 1363920 | 6834 | | $\frac{202,0}{196,34}$ | 6,16 | 17 | | |
| 3 | 16.09.1967 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,792}{0,903}$ | 0,0007404 | 0,0283 | | 1313450 | 6834 | | $\frac{201,1}{195,94}$ | 5,06 | 17 | | |
| 4 | 16.09.1967 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,916}{0,9654}$ | 0,0008867 | 0,0297 | | 1404210 | 6834 | | $\frac{202,5}{196,44}$ | 6,06 | 17 | | |
| 1 | 03.08.1968 | 1 год 1 месяц | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,86}{0,937}$ | 0,000901 | 0,032 | 0,0327 | 1522030 | 6834 | 0,00985 | $\frac{206,10}{199,94}$ | 6,16 | 21 | 0,0025625 | 4,1 |
| 2 | 03.08.1968 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,79}{0,901}$ | 0,0008867 | 0,0341 | | 1463500 | 6834 | | $\frac{206,40}{200,34}$ | 6,06 | 21 | | |
| 3 | 03.08.1968 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,76}{0,886}$ | 0,000798 | 0,0317 | | 1439180 | 6834 | | $\frac{206,20}{200,74}$ | 5,46 | 21 | | |
| 4 | 03.08.1968 | | 8 | $\frac{176,40}{163,94}$ | $\frac{1,71}{0,861}$ | 0,000784 | 0,033 | | 1398500 | 6834 | | $\frac{205,6}{200,24}$ | 5,36 | 21 | | |

Продолжение табл. А.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 06.12.1970 | 3 года 5 мес. | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,9 / 1,461 | 0,00248 | 0,0362 | 0,0363 | 1351210 | 6773 | 0,0173 | 205,2 / 188,4 | 16,8 | 1 | 0,0057 | 9 |
| 2 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,752 / 1,39 | 0,002225 | 0,0360 | | 1285540 | 6773 | | 203,00 / 187,93 | 15,07 | 1 | | |
| 3 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,674 / 1,347 | 0,002126 | 0,0366 | | 1245780 | 6773 | | 202,00 / 187,6 | 14,4 | 1 | | |
| 4 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,343 / 1,2264 | 0,001683 | 0,0349 | | 1134240 | 6773 | | 199,10 / 187,7 | 11,4 | 1 | | |
| 5 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,044 / 1,0299 | 0,001195 | 0,0351 | | 952508 | 6773 | | 193,6 / 185,5 | 8,1 | 1 | | |
| 6 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 1,965 / 0,99 | 0,0011516 | 0,0367 | | 915600 | 6773 | | 193,1 / 185,3 | 7,8 | 1 | | |
| 7 | 06.12.1970 | 3 года 5 мес. | 8 | 176,40 / 174,20 | 1,915 / 0,965 | 0,001122 | 0,0376 | | 892480 | 6773 | | 192,6 / 185,0 | 7,6 | 1 | 0,057 | 9 |
| 8 | 06.12.1970 | | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,147 / 1,081 | 0,001299 | 0,0347 | | 999760 | 6773 | | 194,0 / 185,2 | 8,8 | 1 | | |
| 1 | 24.04.1973 | 7 лет (84 мес.) | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,6 / 1,3 | 0,002362 | 0,0438 | 0,0438 | 1649358 | 6773 | 0,013096 | 205,2 / 189,2 | 16 | 10 | 0,0078125 | 12,5 |
| 1 | 12.03.1978 | 12 лет (144 мес.) | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,84 / 1,42 | 0,003071017 | 0,0478 | 0,0478 | 1381323 | 6773 | 0,016448 | 211,2 / 190,4 | 20,8 | 2,4 | 0,009375 | 15 |

Продолжение табл. А.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 15.10.1985 | 19 лет (228 мес.) | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,34 / 1,17 | 0,00228849 | 0,05248 | 0,05248 | 1572514 | 6773 | 0,0119045 | 204,7 / 189,2 | 15,5 | 13,5 | 0,01 | 16,0 |
| 1 | 20.04.1990 | 24 года (288 мес.) | 8 | 176,40 / 174,20 | 2,56 / 1,28 | 0,00282002 | 0,05436 | 0,05436 | 1563836 | 6773 | 0,013096 | 209,3 / 190,2 | 19,1 | 10 | 0,010625 | 17 |
| 1 | 08.09.2000 | 33 года (396 мес.) | | 176,7 / 174,24 | 3,001 / 1,50 | 0,004126 | 0,056884 | 0,056884 | 2310719 | 6558 | 0,010351 | 41 / 16,4 | 27,06 | 19 | 0,011321 | 18 |
| 2 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 3,023 / 1,52 | 0,004218 | 0,057312 | 0,056884 | 2327450 | 6558 | 0,010351 | 42 / 16,8 | 27,66 | 19 | | |
| 3 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 3,004 / 1,51 | 0,004218 | 0,05802 | 0,05802 | 2313213 | 6558 | 0,010351 | 42 / 16,8 | 27,66 | 19 | | |
| 4 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 2,800 / 1,40 | 0,003532 | 0,055889 | 0,055889 | 2156662 | 6558 | 0,010351 | 37,5 / 16,8 | 23,16 | 19 | | |
| 5 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 2,713 / 1,36 | 0,003516 | 0,059322 | 0,059322 | 2088818 | 6558 | 0,010351 | 35 / 14,4 | 23,06 | 19 | | |
| 6 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 2,908 / 1,46 | 0,004035 | 0,059211 | 0,059211 | 2239610 | 6558 | 0,010351 | 40 / 16 | 26,46 | 19 | | |

Продолжение табл. А.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 7 | 08.09.2000 | 33 года (396 мес.) | | 176,7 / 174,24 | 2,942 / 1,47 | 0,004111 | 0,058982 | 0,058982 | 2265041 | 6558 | 0,010351 | 40,5 / 16 | 26,96 | 19 | 0,011321 | 18 |
| 8 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 2,939 / 1,47 | 0,004111 | 0,059067 | 0,059067 | 2263419 | 6558 | 0,010351 | 40,5 / 16 | 26,96 | 19 | | |
| 9 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 3,027 / 1,52 | 0,004218 | 0,057137 | 0,057137 | 2331006 | 6558 | 0,010351 | 42 / 16,8 | 27,66 | 19 | | |
| 10 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 3,063 / 1,54 | 0,004309 | 0,057004 | 0,057004 | 2358912 | 6558 | 0,010351 | 43 / 17,2 | 28,26 | 19 | | |
| 11 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 2,931 / 1,47 | 0,004157 | 0,06005 | 0,06005 | 2257275 | 6558 | 0,010351 | 42 / 17,2 | 27,26 | 19 | | |
| 12 | 08.09.2000 | 33 года (396 мес.) | | 176,7 / 174,24 | 2,304 / 1,16 | 0,00251 | 0,058677 | 0,058677 | 1774432 | 6558 | 0,010351 | 28 / 14 | 16,46 | 19 | | 18 |
| 13 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 1,625 / 0,81 | 0,00126 | 0,059203 | 0,059203 | 1251396 | 6558 | 0,010351 | 17 / 11,2 | 8,26 | 19 | | |
| 14 | 08.09.2000 | | | 176,7 / 174,24 | 1,614 / 0,81 | 0,001351 | 0,064264 | 0,064264 | 1243972 | 6558 | 0,010351 | 17 / 10,6 | 8,86 | 19 | | |

Окончание табл. А.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15 | 08.09.2000 | 33 года (396 мес.) | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{1,619}{0,81}$ | 0,001351 | 0,063843 | 0,063843 | 1248068 | 6558 | 0,010351 | $\frac{17}{10,6}$ | 8,86 | 19 | | 18 |
| 16 | 08.09.2000 | | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,341}{1,17}$ | 0,002449 | 0,055413 | 0,055413 | 1803618 | 6558 | 0,010351 | $\frac{28}{14,4}$ | 16,06 | 19 | | |
| 17 | 08.09.2000 | | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,638}{1,32}$ | 0,003211 | 0,057322 | 0,057322 | 2030703 | 6558 | 0,010351 | $\frac{33}{14,4}$ | 21,06 | 19 | | |
| 18 | 08.09.2000 | | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,663}{1,33}$ | 0,003303 | 0,057832 | 0,057832 | 2050319 | 6558 | 0,010351 | $\frac{34}{14,8}$ | 21,66 | 19 | | |
| 19 | 08.09.2000 | 33 года (396 мес.) | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,619}{1,31}$ | 0,003242 | 0,058707 | 0,058707 | 2016109 | 6558 | 0,010351 | $\frac{34}{15,2}$ | 21,26 | 19 | 0,011321 | 18 |
| 20 | 08.09.2000 | | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,810}{1,41}$ | 0,003837 | 0,060307 | 0,060307 | 2163957 | 6558 | 0,010351 | $\frac{37,5}{14,8}$ | 25,16 | 19 | | |
| 21 | 08.09.2000 | | | $\frac{176,7}{174,24}$ | $\frac{2,996}{1,50}$ | 0,004126 | 0,057108 | 0,057108 | 2306172 | 6558 | 0,010351 | $\frac{41}{16,4}$ | 27,06 | 19 | | |

Таблица А.4

Гидравлическое сопротивление стального водовода диаметром 1400 (1396) мм в течение времени его эксплуатации по данным натурных исследований (источник – река Днепр)

| Номер опыта | Дата | $T_{экс}$ | Номер измеряемого участка | Ось манометра, $\frac{O_1}{O_2}$ | $\frac{q, м^3/с}{V, м/с}$ | $i_ф$ | $\lambda_ф$ | $\lambda_{KB_{ф.ср}}$, $Re >$ 950000 | $Re$ | $l$, м | ν, $см^2/с$ | Пьезометры, $\frac{П_1}{П_2}$ | Потери напора $H$, м | $t$ воды, °С | $\bar{\Delta}=\delta/d_ф$ | δ, мм |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| 1 | 13.12.1983 | Промывка водовода перед вводом в эксплуатацию | 1 | 134,77 / 183,15 | 4,1666 / 2,7233 | 0,00674747 | 0,02499 | 0,02503 | 2288181 | 18000 | 0,01666223 | 404,7 / 283,25 | 121,45 | 2 | 0,000358 | 0,5 |
| 2 | 13.12.1983 | | 1 | 134,77 / 183,15 | 2,7222 / 1,779 | 0,00289 | 0,02508 | | 1494757 | 18000 | | 291,77 / 239,75 | 52,02 | 2 | | |
| 1 | 12.01.1984 | Пуск водовода 2 месяца | 2 | 198,80 / 187,10 | 1,16666 / 0,7625 | 0,0006056 | 0,02861 | | 640670 | 52180 | 0,01666223 | 236,7 / 205,1 | 31,6 | 2 | 0,002148997 | 3 |
| 2 | 4.02.1984 | | 1-2 | 134,77 / 187,10 | 1,89166 / 1,23638 | 0,001487128 | 0,02687 | | 1038835 | 99050 | | 359,4 / 212,1 | 147,3 | 2 | | |
| 1 | 15.07.1985 | 1 год 7 мес. (19 мес.) | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,7166 / 1,122 | 0,001465756 | 0,03198 | 0,032 | 1408227 | 46870 | 0,011154448 | 267,8 / 199,1 | 68,7 | 16 | 0,008524 | 11,9 |
| 1 | 7.05.1987 | 3 года 2 месяца (38 мес.) | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,666 / 1,089 | 0,001726051 | 0,03997 | 0,04011 | 1067845 | 46870 | 0,01427736 | 278,0 / 197,1 | 80,9 | 7 | 0,011461318 | 16,0 |
| 2 | 7.05.1987 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,25 / 0,81699 | 0,001107318 | 0,0455 | | 801118,6 | 46870 | | 250,7 / 198,8 | 51,9 | 7 | | |
| 3 | 7.05.1987 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 0,9722 / 0,635 | 0,00070834 | 0,0482 | | 622664 | 46870 | | 232,1 / 198,9 | 33,2 | 7 | | |
| 4 | 7.05.1987 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,1111 / 0,7262 | 0,000898229 | 0,0468 | | 712092 | 46870 | | 239,2 / 197,10 | 42,1 | 7 | | |
| 5 | 7.05.1987 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,5277 / 0,9985 | 0,001461489 | 0,04025 | | 979102,5 | 46870 | | 265,65 / 197,15 | 68,5 | 7 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2.10.1988 | 4 года 8 мес. (56 мес.) | 1 | 134,77 / 194,10 | 0,8388 / 0,548 | 0,000578195 | 0,0528 | 0,042199176 | 653036 | 46870 | 0,0117482 | 225,7 / 198,6 | 27,1 | 14 | 0,012249284 | 17,1 |
| 2 | 2.10.1988 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 0,99444 / 0,64996 | 0,000793 | 0,05091 | | 774539 | 46870 | | 235,4 / 198,7 | 36,7 | 14 | | |
| 3 | 2.10.1988 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,125 / 0,73529 | 0,000985705 | 0,05007 | | 876224 | 46870 | | 245,0 / 198,8 | 46,2 | 14 | | |
| 4 | 2.10.1988 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,48611 / 0,9713 | 0,001459356 | 0,042489 | | 1157470 | 46870 | | 267,7 / 199,3 | 68,4 | 14 | | |
| 5 | 2.10.1988 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,6527 / 1,08 | 0,001783657 | 0,042 | | 1287005 | 46870 | | 283,4 / 199,8 | 83,6 | 14 | | |
| 6 | 2.10.1988 | | 1 | 134,77 / 194,10 | 1,777 / 1,1619 | 0,00206955 | 0,042108 | | 1384503 | 46870 | | 297,2 / 200,2 | 97,0 | 14 | | |
| 1 | 14.08.1990 | 6 лет 6 мес. (78 мес.) | 2 | 198,80 / 187,10 | 1,7616 / 1,1514 | 0,002220199 | 0,046 | 0,046 | 1634746 | 52180 | 0,009860616 | 353,95 / 238,1 | 115,85 | 21 | 0,013180516 | 18,4 |
| 1 | 31.01.1996 | 12 лет (144 мес.) | 2 | 198,8 / 187,10 | 0,97 / 0,6339 | 0,000864316 | 0,059 | | 537800 | 52180 | 0,016501664 | 257,7 / 212,6 | 45,1 | 2,3 | 0,01418 | 19,8 |
| 2 | 31.01.1996 | | 2 | 198,8 / 187,10 | 1,52666 / 0,99781 | 0,001993101 | 0,0549 | | 846541 | 52180 | | 342,1 / 238,1 | 104 | 2,3 | | |
| 3 | 31.01.1996 | | 2 | 198,8 / 187,10 | 1,9302 / 1,2616 | 0,003085473 | 0,0532 | 0,0532 | 1070341 | 52180 | | 399,4 / 238,4 | 161 | 2,3 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 05.07.1998 | 9 лет (108 мес.) | 1 | 134,77 / 194,13 | 2,0344 / 1,3297 | 0,00308988 | 0,048 | 0,048 | 1647663 | 47197 | 0,0112983 | 345,66 / 199,83 | 145,83 | 15,5 | 0,0133237 | 18,6 |
| 1 | 22.07.1998 | 14 лет 6 мес. (174 мес.) | 1 | 134,77 / 194,10 | 0,6944 / 0,4538 | 0,000497913 | 0,0664 | | 576860 | 47197 | 0,01101342 | 220,7 / 197,2 | 23,5 | 16,5 | 0,013825215 | 19,3 |
| 2 | 22.07.1998 | 10 лет 1 мес. (121 мес.) | 3 | 134,77 / 194,13 | 1,8472 / 1,2073 | 0,002653135 | 0,04999 | 0,04999 | 1534691 | 47197 | | 325,15 / 199,93 | 125,22 | 16,5 | 0,0136103 | 19,0 |
| 1 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,201 / 0,94 | 0,001791 | 0,054966 | 0,056889 | 1107239 | 47197 | 0,01191 | 281,13 / 196,61 | 84,52 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 2 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,180 / 0,94 | 0,001823 | 0,056462 | | 1102123 | 47197 | 0,01191 | 282,73 / 196,71 | 86,02 | 13,5 | | |
| 3 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,212 / 0,95 | 0,001820 | 0,055625 | | 1109742 | 47197 | 0,01191 | 282,73 / 196,81 | 85,92 | 13,5 | | |
| 4 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,139 / 0,93 | 0,001818 | 0,057179 | | 1093917 | 47197 | 0,01191 | 282,73 / 196,91 | 85,82 | 13,5 | | |
| 5 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,267 / 0,96 | 0,001806 | 0,054084 | | 1120844 | 47197 | 0,01191 | 282,03 / 196,81 | 85,22 | 13,5 | | |
| 6 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,793 / 1,05 | 0,002221 | 0,055008 | | 1232586 | 47197 | 0,01191 | 301,63 / 196,81 | 104,82 | 13,5 | | |
| 7 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,770 / 1,05 | 0,002431 | 0,060674 | | 1227800 | 47197 | 0,01191 | 311,53 / 196,81 | 114,72 | 13,5 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,036 / 1,10 | 0,002465 | 0,056281 | 0,056889 | 1283671 | 47197 | 0,01191 | 313,13 / 196,81 | 116,32 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 9 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 5,880 / 1,07 | 0,002482 | 0,059588 | | 1251829 | 47197 | 0,01191 | 313,93 / 196,81 | 117,12 | 13,5 | | |
| 10 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,344 / 1,15 | 0,002742 | 0,056659 | | 1349506 | 47197 | 0,01191 | 326,23 / 196,81 | 129,42 | 13,5 | | |
| 11 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,397 / 1,16 | 0,002740 | 0,05566 | | 1361031 | 47197 | 0,01191 | 326,23 / 196,91 | 129,32 | 13,5 | | |
| 12 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,381 / 1,16 | 0,002704 | 0,055208 | | 1357589 | 47197 | 0,01191 | 324,63 / 197,01 | 127,62 | 13,5 | | |
| 13 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,590 / 1,20 | 0,002982 | 0,057043 | | 1402447 | 47197 | 0,01191 | 337,73 / 197,01 | 140,72 | 13,5 | | |
| 14 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,628 / 1,20 | 0,003051 | 0,057687 | | 1410847 | 47197 | 0,01191 | 341,03 / 197,01 | 144,02 | 13,5 | | |
| 15 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,765 / 1,23 | 0,003049 | 0,055355 | | 1439761 | 47197 | 0,01191 | 341,03 / 197,11 | 143,92 | 13,5 | | |
| 16 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,207 / 0,58 | 0,000757 | 0,061093 | | 682762,4 | 47197 | 0,01191 | 232,83 / 197,11 | 35,72 | 13,5 | | |
| 17 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,173 / 0,58 | 0,000759 | 0,062672 | | 675045,7 | 47197 | 0,01191 | 232,83 / 197,01 | 35,82 | 13,5 | | |
| 18 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 6,693 / 1,21 | 0,003085 | 0,057339 | | 1422959 | 47197 | 0,01191 | 342,63 / 197,01 | 145,62 | 13,5 | | |
| 19 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,346 / 1,33 | 0,003537 | 0,054488 | | 1562832 | 47197 | 0,01191 | 363,93 / 197,01 | 166,92 | 13,5 | | |
| 20 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,358 / 1,34 | 0,003880 | 0,059538 | | 1565958 | 47197 | 0,01191 | 380,33 / 197,21 | 183,12 | 13,5 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,737 / 1,40 | 0,004037 | 0,056036 | 0,056889 | 1646444 | 47197 | 0,01191 | 387,73 / 197,21 | 190,52 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 22 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,831 / 1,42 | 0,004092 | 0,05545 | | 1666370 | 47197 | 0,01191 | 390,43 / 197,31 | 193,12 | 13,5 | | |
| 23 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,934 / 1,44 | 0,004276 | 0,056443 | | 1688444 | 47197 | 0,01191 | 399,13 / 197,31 | 201,82 | 13,5 | | |
| 24 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,884 / 1,43 | 0,004274 | 0,05716 | | 1677407 | 47197 | 0,01191 | 399,13 / 197,41 | 201,72 | 13,5 | | |
| 25 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,888 / 1,43 | 0,004257 | 0,056867 | | 1678384 | 47197 | 0,01191 | 398,33 / 197,41 | 200,92 | 13,5 | | |
| 26 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,888 / 1,43 | 0,004272 | 0,057071 | | 1678286 | 47197 | 0,01191 | 399,13 / 197,51 | 201,62 | 13,5 | | |
| 27 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 7,927 / 1,44 | 0,004270 | 0,056476 | | 1686687 | 47197 | 0,01191 | 399,13 / 197,61 | 201,52 | 13,5 | | |
| 28 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,889 / 0,52 | 0,000676 | 0,067421 | | 614388,7 | 47197 | 0,01191 | 227,03 / 195,11 | 31,92 | 13,5 | | |
| 29 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,247 / 0,41 | 0,000416 | 0,068374 | | 478313 | 47197 | 0,01191 | 214,73 / 195,11 | 19,62 | 13,5 | | |
| 30 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,244 / 0,41 | 0,000414 | 0,068329 | | 477249,9 | 47197 | 0,01191 | 214,73 / 195,21 | 19,52 | 13,5 | | |
| 31 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,258 / 0,41 | 0,000428 | 0,069805 | | 480570,9 | 47197 | 0,01191 | 215,43 / 195,21 | 20,22 | 13,5 | | |
| 32 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,350 / 0,43 | 0,000414 | 0,062129 | | 500497 | 47197 | 0,01191 | 214,73 / 195,21 | 19,52 | 13,5 | | |
| 33 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,836 / 0,52 | 0,000604 | 0,062371 | | 603800,4 | 47197 | 0,01191 | 223,73 / 195,21 | 28,52 | 13,5 | | |
| 34 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,820 / 0,51 | 0,000602 | 0,062888 | | 600257,9 | 47197 | 0,01191 | 223,73 / 195,31 | 28,42 | 13,5 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,832 / 0,51 | 0,000621 | 0,064337 | 0,056889 | 602784,2 | 47197 | 0,01191 | 224,63 / 195,31 | 29,32 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 36 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,807 / 0,51 | 0,000619 | 0,065365 | | 597002 | 47197 | 0,01191 | 224,63 / 195,41 | 29,22 | 13,5 | | |
| 37 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,101 / 0,56 | 0,000791 | 0,068247 | | 660296,7 | 47197 | 0,01191 | 232,73 / 195,41 | 37,32 | 13,5 | | |
| 38 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,372 / 0,61 | 0,000863 | 0,063075 | | 717437,6 | 47197 | 0,01191 | 236,13 / 195,41 | 40,72 | 13,5 | | |
| 39 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,388 / 0,62 | 0,000861 | 0,062257 | | 721247,4 | 47197 | 0,01191 | 236,13 / 195,51 | 40,62 | 13,5 | | |
| 40 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,434 / 0,62 | 0,000859 | 0,060462 | | 730975,5 | 47197 | 0,01191 | 236,13 / 195,61 | 40,52 | 13,5 | | |
| 41 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,468 / 0,63 | 0,000856 | 0,059194 | | 737852,2 | 47197 | 0,01191 | 236,13 / 195,71 | 40,42 | 13,5 | | |
| 42 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,000 / 0,73 | 0,001134 | 0,058873 | | 851353 | 47197 | 0,01191 | 249,23 / 195,71 | 53,52 | 13,5 | | |
| 43 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,005 / 0,73 | 0,001132 | 0,058628 | | 852329,7 | 47197 | 0,01191 | 249,23 / 195,81 | 53,42 | 13,5 | | |
| 44 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,938 / 0,72 | 0,001130 | 0,060485 | | 838362,1 | 47197 | 0,01191 | 249,23 / 195,91 | 53,32 | 13,5 | | |
| 45 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,007 / 0,73 | 0,001128 | 0,058337 | | 852850,7 | 47197 | 0,01191 | 249,23 / 196,01 | 53,22 | 13,5 | | |
| 46 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 3,918 / 0,71 | 0,001125 | 0,060966 | | 833478,1 | 47197 | 0,01191 | 249,23 / 196,11 | 53,12 | 13,5 | | |
| 47 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,036 / 0,73 | 0,001142 | 0,058239 | | 859167,3 | 47197 | 0,01191 | 250,03 / 196,11 | 53,92 | 13,5 | | |
| 48 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,017 / 0,73 | 0,001193 | 0,061416 | | 855064,9 | 47197 | 0,01191 | 252,43 / 196,11 | 56,32 | 13,5 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,538 / 0,82 | 0,001418 | 0,057174 | 0,056889 | 966025,7 | 47197 | 0,01191 | 263,13 / 196,21 | 66,92 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 50 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,563 / 0,83 | 0,001443 | 0,057626 | | 970811,8 | 47197 | 0,01191 | 264,33 / 196,21 | 68,12 | 13,5 | | |
| 51 | 12.10.200ё0 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,564 / 0,83 | 0,001441 | 0,057453 | | 971560,9 | 47197 | 0,01191 | 264,33 / 196,31 | 68,021 | 13,5 | | |
| 52 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,581 / 0,83 | 0,001439 | 0,05694 | | 975207,2 | 47197 | 0,01191 | 264,33 / 196,41 | 67,92 | 13,5 | | |
| 53 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,551 / 0,83 | 0,001437 | 0,057616 | | 968760,4 | 47197 | 0,01191 | 264,33 / 196,51 | 67,82 | 13,5 | | |
| 54 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,512 / 0,82 | 0,001443 | 0,058864 | | 960555,7 | 47197 | 0,01191 | 264,73 / 196,61 | 68,12 | 13,5 | | |
| 55 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 4,486 / 0,81 | 0,001462 | 0,060425 | | 954304,6 | 47197 | 0,01191 | 265,63 / 196,61 | 69,02 | 13,5 | | |
| 56 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,688 / 0,31 | 0,000278 | 0,080811 | | 359783,7 | 47197 | 0,01191 | 208,23 / 195,11 | 13,12 | 13,5 | | |
| 57 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,687 / 0,31 | 0,000282 | 0,082194 | | 359451,5 | 47197 | 0,01191 | 208,23 / 194,91 | 13,32 | 13,5 | | |
| 58 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 2,563 / 0,47 | 0,000693 | 0,087628 | | 545623,9 | 47197 | 0,01191 | 227,83 / 195,11 | 32,72 | 13,5 | | |
| 59 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,355 / 0,25 | 0,000195 | 0,08782 | | 289319,3 | 47197 | 0,01191 | 204,13 / 194,91 | 9,22 | 13,5 | | |
| 60 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,598 / 0,29 | 0,000299 | 0,097098 | | 340502,2 | 47197 | 0,01191 | 209,03 / 194,91 | 14,12 | 13,5 | | |
| 61 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,317 / 0,24 | 0,000212 | 0,101527 | | 280512,2 | 47197 | 0,01191 | 204,93 / 194,91 | 10,02 | 13,5 | | |
| 62 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,865 / 0,34 | 0,000428 | 0,102006 | | 397545,5 | 47197 | 0,01191 | 215,43 / 195,21 | 20,22 | 13,5 | | |

Продолжение табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 63 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,378 / 0,25 | 0,000250 | 0,109023 | 0,056889 | 294007,8 | 47197 | 0,01191 | 206,63 / 194,81 | 11,82 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 64 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,177 / 0,21 | 0,000191 | 0,114242 | | 250899,5 | 47197 | 0,01191 | 203,63 / 194,61 | 9,02 | 13,5 | | |
| 65 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,118 / 0,20 | 0,000178 | 0,118048 | | 238471,4 | 47197 | 0,01191 | 203,23 / 194,81 | 8,42 | 13,5 | | |
| 66 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,148 / 0,21 | 0,000189 | 0,118507 | | 244973,9 | 47197 | 0,01191 | 203,63 / 194,71 | 8,92 | 13,5 | | |
| 67 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 1,119 / 0,20 | 0,000181 | 0,119394 | | 238527,2 | 47197 | 0,01191 | 203,23 / 194,71 | 8,52 | 13,5 | | |
| 68 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,764 / 0,14 | 0,000132 | 0,187341 | | 162699,8 | 47197 | 0,01191 | 200,83 / 194,61 | 6,22 | 13,5 | | |
| 69 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,934 / 0,17 | 0,000219 | 0,206824 | | 199456,5 | 47197 | 0,01191 | 204,93 / 194,61 | 10,32 | 13,5 | | |
| 70 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,529 / 0,10 | 0,000111 | 0,327559 | | 112719,4 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 194,71 | 5,22 | 13,5 | | |
| 71 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,526 / 0,10 | 0,000113 | 0,334221 | | 112654,2 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 194,61 | 5,32 | 13,5 | | |
| 72 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,516 / 0,09 | 0,000108 | 0,336028 | | 110218,9 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 194,81 | 5,12 | 13,5 | | |
| 73 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,378 / 0,07 | 0,000081 | 0,463383 | | 81071,9 | 47197 | 0,01191 | 199,23 / 195,41 | 3,82 | 13,5 | | |
| 74 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,414 / 0,07 | 0,000098 | 0,476639 | | 87909,28 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 195,31 | 4,62 | 13,5 | | |
| 75 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,403 / 0,07 | 0,000102 | 0,514272 | | 86444,19 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 195,11 | 4,82 | 13,5 | | |
| 76 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,394 / 0,07 | 0,000100 | 0,531657 | | 84132,48 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 195,21 | 4,72 | 13,5 | | |

Окончание табл. А.4

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 77 | 12.10.2000 | 16 лет (192 мес.) | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,385 / 0,07 | 0,000096 | 0,535319 | 0,056889 | 82048,66 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 195,41 | 4,52 | 13,5 | 0,0146848 | 20,5 |
| 78 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,396 / 0,07 | 0,000106 | 0,552544 | | 85109,26 | 47197 | 0,01191 | 199,93 / 194,91 | 5,02 | 13,5 | | |
| 79 | 12.10.2000 | | 50-51 | 193,11 / 137,73 | 0,389 / 0,07 | 0,000106 | 0,576551 | | 83318,55 | 47197 | 0,01191 | 200,33 / 195,31 | 5,02 | 13,5 | | |

# ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Исходные данные для регрессионного анализа зависимости удельного среднесуточного водопотребления городов от различных природно-климатических, градостроительных и других факторов

Таблица Б.1

## Исходные данные для расчета удельного среднесуточного водопотребления в городах с учетом природно-климатических условий и других факторов, влияющих на водопотребление

| № п/п | Город | Удельное среднесуточное фактическое водопотребление (1984 г.), $q$, м³/чел/сут | Численность населения, $N$, млн чел. | Геодезическая высота над уровнем моря, $H$, м | Общая жилая площадь на одного жителя, $F_1$, м² | Площадь застройки города, $F_2$, км² | Ореол загрязнения, $O$, км² | Среднемесячная температура за январь, $t_1$, °С | Среднемесячная температура за июль, $t_7$, °С | Среднегодовая температура, $t$, °С | Среднегодовая относительная влажность, $Fl$, % | Среднегодовое кол-во осадков, $HM$, мм | Среднегодовое альбедо, $A$, % | Сумма среднесуточных температур выше 0 °С, $T$, °С | Продолжительность периода с температурой ниже 0 °С, $DM$, дней | Среднегодовая упругость водяного пара, $E$, мб | Упругость водяного пара за январь, $E_1$, мб | Упругость водяного пара за июль, $E_7$, мб | Среднегодовая сумма солнечной радиации, $S$, ккал/см² | Сумма солнечной радиации за январь, $S_1$, ккал/см² | Сумма солнечной радиации за июль, $S_7$, ккал/см² | Географическая широта, $SH$, град. | Географическая долгота, $DO$, град. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
| 1 | Ашгабад | 0,770 | 0,356 | 218 | 10,7 | 40,0 | 550 | 1,0 | 29,3 | 16,3 | 54 | 257 | 26 | 5829 | 0 | 9,3 | 5,7 | 13,8 | 148,3 | 5,5 | 19,7 | 38,0 | 58 |
| 2 | Ташкент | 0,942 | 2,030 | 478 | 12,7 | 180,0 | 8000 | -0,9 | 26,9 | 13,3 | 58 | 437 | 22 | 5078 | 36 | 8,9 | 4,8 | 13,7 | 139,4 | 4,6 | 19,1 | 41,3 | 69 |
| 3 | Самарканд | 0,665 | 0,371 | 671 | 9,4 | 40,0 | 800 | 0,3 | 26,0 | 12,9 | 59 | 357 | 26 | 4896 | 27 | 8,8 | 5,0 | 13,2 | 143,9 | 5,3 | 20,4 | 39,7 | 66 |
| 4 | Фрунзе | 0,653 | 0,604 | 756 | 12,1 | 133,0 | 3149 | -5,4 | 24,4 | 9,8 | 57 | 486 | 25 | 4005 | 98 | 7,9 | 3,4 | 11,7 | 132,7 | 5,6 | 18,0 | 42,7 | 74 |
| 5 | Ереван | 1,008 | 1,133 | 996 | 12,1 | 90,0 | 2400 | -3,7 | 25,1 | 11,6 | 69 | 433 | 25 | 4464 | 74 | 8,2 | 3,8 | 13,8 | 148,2 | 4,7 | 20,0 | 40,2 | 44 |
| 6 | Тбилиси | 1,005 | 1,158 | 409 | 14,3 | 100,0 | 3000 | 0,9 | 24,0 | 12,7 | 66 | 559 | 17 | 4502 | 0 | 10,5 | 5,0 | 16,8 | 120,7 | 4,3 | 16,6 | 41,7 | 44 |
| 7 | Улан-Удэ | 0,436 | 0,321 | 498 | 11,9 | 60,0 | 660 | -25,4 | 19,4 | -1,7 | 66 | 287 | 26 | 2222 | 179 | 5,4 | 0,8 | 14,2 | 106,1 | 3 | 14,4 | 52,0 | 108 |
| 8 | Нижневартовск | 0,397 | 0,200 | 45 | 10,4 | 20,0 | 660 | -19,4 | 16,9 | 6,6 | 75 | 615 | 27 | 1750 | 199 | 6,5 | 1,2 | 13,6 | 85,0 | 2,2 | 14,5 | 61,1 | 76 |
| 9 | Чита | 0,184 | 0,330 | 670 | 6,9 | 80,0 | 1540 | -25,4 | 18,8 | -2,7 | 65 | 378 | 27 | 2104 | 186 | 5,4 | 0,6 | 14,6 | 106,9 | 3 | 13,8 | 52,0 | 52 |
| 10 | Б. Ялта | 0,618 | 0,155 | 1 | 11,0 | 10,0 | 130 | 2,9 | 23,7 | 13 | 70 | 708 | 20 | 4760 | 0 | 11,4 | 6,4 | 18,3 | 116,1 | 3,1 | 17,2 | 44,5 | 34 |
| 11 | Волгоград | 0,695 | 0,974 | 42 | 14,7 | 184,0 | 1982 | -9,5 | 24,3 | 6,6 | 68 | 403 | 21 | 3665 | 129 | 8 | 3,0 | 13,8 | 113,4 | 2,6 | 16,9 | 48,7 | 44 |
| 12 | Алматы | 0,772 | 1,070 | 841 | 13,4 | 150,0 | 840 | -8,6 | 22,3 | 8,7 | 69 | 629 | 25 | 3484 | 113 | 8,1 | 2,7 | 14,8 | 125,2 | 4,7 | 17,5 | 43,5 | 76 |
| 13 | Оренбург | 0,472 | 0,519 | 109 | 8,8 | 70,0 | 610 | -14,8 | 21,9 | 3,9 | 69 | 462 | 30 | 3038 | 157 | 6,9 | 2,0 | 14,1 | 102,6 | 2,4 | 15,3 | 51,6 | 55 |
| 14 | Кисловодск | 0,623 | 0,113 | 900 | 13,5 | 20,0 | 20 | -3,7 | 19,0 | 7,9 | 70 | 620 | 22 | 3132 | 98 | 8,3 | 3,6 | 14,8 | 111,6 | 3,8 | 16,1 | 44,0 | 42 |
| 15 | Баку | 0,658 | 1,693 | 13 | 11,2 | 100,0 | 8000 | -0,4 | 26,5 | 14,4 | 70 | 247 | 21 | 5449 | 0 | 11,5 | 6,6 | 19,0 | 119,0 | 3,2 | 17,3 | 40,3 | 49 |
| 16 | Ростов-на-Дону | 0,638 | 1,200 | 80 | 14,0 | 100,0 | 1000 | -5,8 | 22,8 | 8,7 | 72 | 593 | 23 | 3642 | 110 | 9,2 | 4,3 | 16,3 | 111,3 | 2,7 | 16,1 | 47,3 | 39 |
| 17 | Алушта | 0,699 | 0,032 | 40 | 12,4 | 10,0 | 20 | 3 | 23,3 | 12,3 | 71 | 476 | 22 | 4500 | 0 | 11,4 | 6,1 | 17,9 | 113,4 | 3,4 | 18,2 | 44,5 | 34 |
| 18 | Днепропетровск | 0,503 | 1,153 | 140 | 14,9 | 70,0 | 6302 | -4,9 | 22,3 | 8,5 | 71 | 558 | 23 | 3570 | 109 | 9,3 | 4,2 | 15,5 | 104,5 | 2,5 | 17,2 | 48,5 | 34 |
| 19 | Луганск | 0,568 | 0,503 | 59 | 14,0 | 90,0 | 7112 | -6,6 | 22,3 | 8 | 71 | 506 | 23 | 3465 | 117 | 8,3 | 3,7 | 15,0 | 109,3 | 2,6 | 16,3 | 48,5 | 38 |
| 20 | Запорожье | 0,687 | 0,877 | 59 | 14,3 | 140,0 | 12372 | -4,9 | 22,8 | 9 | 72 | 516 | 20 | 3655 | 102 | 9,1 | 4,3 | 15,6 | 110,1 | 2,5 | 17,2 | 48,0 | 35 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21 | Кишинев | 0,588 | 0,624 | 90 | 12,5 | 50,0 | 950 | -3,5 | 21,5 | 9,4 | 72 | 533 | 20 | 3620 | 86 | 9,3 | 4,3 | 15,6 | 112,9 | 3 | 17,5 | 47,0 | 29 |
| 22 | Туапсе | 0,635 | 0,063 | 50 | 14,0 | 20,0 | 160 | 4,4 | 23,0 | 13,4 | 72 | 1424 | 22 | 4500 | 0 | 12,4 | 6,5 | 21,0 | 118,0 | 3,2 | 17,8 | 44,1 | 39 |
| 23 | Никополь | 0,478 | 0,152 | 53 | 16,9 | 50,0 | 2149 | -4,9 | 22,9 | 9,8 | 72 | 494 | 20 | 3705 | 109 | 9,1 | 4,4 | 15,8 | 110,0 | 2,5 | 17,2 | 47,8 | 34 |
| 24 | Ужгород | 0,492 | 0,108 | 110 | 15,7 | 20,0 | 250 | -2,8 | 20,0 | 9,6 | 72 | 841 | 23 | 3570 | 70 | 9,6 | 4,5 | 15,8 | 104,3 | 2,6 | 15,1 | 48,5 | 22 |
| 25 | Самара | 0,595 | 1,257 | 136 | 13,4 | 166,0 | 3494 | -13,8 | 20,7 | 3,8 | 72 | 493 | 25 | 2900 | 154 | 7,1 | 2,2 | 14,6 | 101,0 | 2,1 | 15,6 | 53,2 | 50 |
| 26 | Феодосия | 0,484 | 0,093 | 1 | 13,2 | 20,0 | 140 | -0,3 | 24,0 | 11,7 | 72 | 545 | 17 | 4290 | 16 | 11,2 | 5,8 | 17,0 | 115,0 | 3,4 | 17,0 | 45,0 | 35 |
| 27 | Кривой Рог | 0,645 | 0,667 | 123 | 16,8 | 190,0 | 9431 | -5,1 | 22,4 | 8,5 | 72 | 495 | 20 | 3590 | 109 | 8,9 | 4,2 | 15,0 | 110,1 | 2,5 | 17,2 | 48,0 | 33 |
| 28 | Омск | 0,568 | 1,108 | 91 | 13,6 | 210,0 | 4580 | -19,4 | 18,2 | 0 | 73 | 369 | 27 | 2445 | 175 | 6,5 | 1,4 | 14,7 | 97,8 | 2,2 | 14,8 | 55,0 | 73 |
| 29 | Москва | 0,720 | 8,642 | 160 | 16,7 | 821,0 | 13200 | -9,4 | 19,3 | 3,8 | 73 | 696 | 27 | 2485 | 151 | 7,6 | 2,8 | 15,0 | 87,2 | 1,4 | 14,2 | 55,8 | 37 |
| 30 | Лозовая | 0,482 | 0,064 | 165 | 11,6 | 30,0 | 90,5 | -7,2 | 20,5 | 6,9 | 73 | 582 | 27 | 3275 | 126 | 8,5 | 3,7 | 16,0 | 103,0 | 2,3 | 15,2 | 49,2 | 36 |
| 31 | Чугуев | 0,471 | 0,037 | 143 | 11,3 | 12,7 | 45,2 | -7,3 | 20,5 | 6,9 | 74 | 609 | 27 | 3165 | 126 | 8,5 | 3,7 | 15,2 | 103,0 | 2,3 | 15,2 | 50,0 | 36 |
| 32 | Краснодар | 0,524 | 0,609 | 34 | 15,3 | 60,0 | 1500 | -1,8 | 23,2 | 10,8 | 74 | 741 | 22 | 4071 | 67 | 10,6 | 5,0 | 18,0 | 118,0 | 3,2 | 17,8 | 45,0 | 38 |
| 33 | Николаев | 0,443 | 0,500 | 51 | 13,3 | 70,0 | 1100 | -2,5 | 23,3 | 9,8 | 74 | 499 | 19 | 3905 | 31 | 10,3 | 4,6 | 16,1 | 117,2 | 2,8 | 18,1 | 47,0 | 32 |
| 34 | Пермь | 0,397 | 1,056 | 170 | 12,7 | 200,0 | 4320 | -15,1 | 18,1 | 1,5 | 74 | 821 | 29 | 2264 | 167 | 6,5 | 2,0 | 13,7 | 80,2 | 0,9 | 14,1 | 58,0 | 56 |
| 35 | Полтава | 0,410 | 0,305 | 160 | 13,2 | 50,0 | 330 | -7,3 | 20,6 | 7 | 74 | 540 | 24 | 3195 | 124 | 8,5 | 3,0 | 15,0 | 95,1 | 2,3 | 15,2 | 49,5 | 34 |
| 36 | Харьков | 0,560 | 1,554 | 140 | 14,6 | 220,0 | 6220 | -7,3 | 20,5 | 6,9 | 74 | 609 | 27 | 3165 | 126 | 8,5 | 3,7 | 15,4 | 103,2 | 2,3 | 15,2 | 50,0 | 36 |
| 37 | Новосибирск | 0,611 | 1,393 | 114 | 13,2 | 245,0 | 11816 | -19 | 18,7 | -0,1 | 75 | 514 | 28 | 2290 | 178 | 6,6 | 1,4 | 16,0 | 96,4 | 2,1 | 14,5 | 55,0 | 82 |
| 38 | Киев | 0,612 | 2,448 | 183 | 15,2 | 240,0 | 6180 | -5,9 | 19,8 | 7,2 | 76 | 685 | 22 | 3120 | 118 | 8,8 | 3,8 | 15,5 | 98,9 | 2,3 | 15,2 | 50,5 | 30 |
| 39 | Сочи | 0,945 | 0,272 | 78 | 13,9 | 30,0 | 500 | 5,8 | 22,5 | 14,1 | 76 | 1664 | 22 | 5000 | 0 | 12,5 | 6,8 | 21,8 | 118,0 | 3,9 | 17,8 | 43,6 | 39 |
| 40 | Н. Новгород | 0,674 | 1,399 | 152 | 14,5 | 130,0 | 14399 | -11,6 | 18,4 | 3,1 | 76 | 677 | 26 | 2496 | 158 | 7,6 | 2,6 | 15,0 | 86,9 | 1,2 | 14,8 | 56,3 | 44 |
| 41 | Одесса | 0,655 | 1,116 | 43 | 13,0 | 130,0 | 6000 | -2,5 | 22,8 | 10,3 | 76 | 456 | 19 | 3715 | 78 | 10,3 | 4,9 | 17,0 | 117,2 | 2,8 | 18,1 | 46,4 | 30 |
| 42 | Сухуми | 0,685 | 0,125 | 52 | 11,0 | 10,0 | 100 | 5,8 | 24,1 | 14,1 | 70 | 1440 | 23 | 5496 | 0 | 12,5 | 6,2 | 21,6 | 121,9 | 3,9 | 16,6 | 43,0 | 41 |
| 43 | Евпатория | 0,699 | 0,104 | 40 | 12,5 | 20,0 | 150 | -0,3 | 23,2 | 11 | 77 | 427 | 20 | 4070 | 38 | 11,2 | 5,6 | 17,3 | 118,6 | 3,4 | 18,2 | 45,3 | 33 |
| 44 | Луцк | 0,399 | 0,170 | 233 | 13,2 | 50,0 | 120 | -4,9 | 18,6 | 7,2 | 78 | 666 | 24 | 2875 | 105 | 9 | 4,0 | 15,2 | 92,7 | 2,2 | 13,7 | 50,8 | 25 |
| 45 | Нальчик | 0,572 | 0,244 | 600 | 11,3 | 30,0 | 500 | -4,1 | 21,1 | 8,8 | 78 | 656 | 22 | 3553 | 102 | 9,9 | 4,2 | 17,4 | 111,6 | 3,8 | 16,1 | 42,7 | 43 |
| 46 | С.-Петербург | 0,680 | 4,867 | 10 | 16,5 | 400,0 | 5270 | -7,7 | 17,8 | 4,3 | 79 | 673 | 19 | 2250 | 143 | 7,8 | 3,4 | 14,7 | 72,4 | 0,5 | 13,4 | 59,9 | 30 |
| 47 | Ярославль | 0,537 | 0,610 | 99 | 14,5 | 50,0 | 1970 | -10,6 | 18,0 | 2,7 | 79 | 712 | 31 | 2300 | 158 | 7,5 | 2,6 | 15,0 | 87,8 | 1,3 | 14,6 | 57,6 | 39 |
| 48 | Вильнюс | 0,487 | 0,554 | 199 | 14,2 | 50,0 | 250 | -5,5 | 17,3 | 6,2 | 81 | 724 | 25 | 2580 | 116 | 8,5 | 4,0 | 14,8 | 87,3 | 1,4 | 14,3 | 54,7 | 25 |
| 49 | Ровно | 0,432 | 0,215 | 227 | 12,1 | 40,0 | 490 | -5,4 | 18,5 | 6,9 | 79 | 683 | 23 | 2945 | 112 | 9 | 4,0 | 15,2 | 92,7 | 2,2 | 13,7 | 50,7 | 26 |
| 50 | Минск | 0,507 | 1,472 | 225 | 13,9 | 120,0 | 5000 | -6,9 | 17,8 | 5,4 | 79 | 801 | 25 | 2625 | 134 | 8,2 | 3,6 | 14,4 | 90,5 | 1,6 | 14,5 | 53,9 | 27 |
| 51 | Львов | 0,589 | 0,767 | 319 | 13,1 | 90,0 | 830 | -3,9 | 18,8 | 6,7 | 80 | 940 | 23 | 3100 | 106 | 9 | 3,9 | 15,1 | 114,3 | 2,6 | 15,1 | 49,9 | 24 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 52 | Рига | 0,476 | 0,883 | 10 | 16,5 | 140,0 | 960 | -4,5 | 18,0 | 6,2 | 79 | 678 | 23 | 2350 | 116 | 8,4 | 4,1 | 14,3 | 82,7 | 0,9 | 14,3 | 57,0 | 24 |
| 53 | Каунас | 0,519 | 0,408 | 36 | 13,8 | 90,0 | 400 | -5,5 | 17,5 | 6,5 | 81 | 720 | 25 | 2700 | 116 | 8,5 | 4,2 | 14,7 | 87,3 | 1,4 | 14,3 | 54,9 | 23 |
| 54 | Новгород | 0,470 | 0,236 | 24 | 13,6 | 30,0 | 90 | -8,6 | 17,3 | 3,9 | 81 | 766 | 29 | 2300 | 146 | 8 | 3,3 | 15,3 | 79,8 | 0,8 | 12,4 | 58,5 | 31 |
| 55 | Батуми | 0,760 | 0,127 | 10 | 13,2 | 10,0 | 250 | 7,1 | 22,8 | 14,3 | 81 | 2718 | 23 | 5293 | 0 | 13,9 | 7,3 | 22,3 | 121,0 | 3,9 | 17,0 | 41,7 | 41 |
| 56 | Таллинн | 0,456 | 0,464 | 30 | 17,3 | 100,0 | 420 | -5,3 | 16,6 | 5 | 81 | 710 | 30 | 2296 | 130 | 8 | 4,0 | 13,9 | 85,7 | 1 | 13,9 | 59,4 | 24 |
| 57 | Махачкала | 0,672 | 0,310 | 10 | 10,1 | 30,0 | 1000 | -0,4 | 24,7 | 11,8 | 75 | 524 | 20 | 4341 | 38 | 11,5 | 5,4 | 19,5 | 116,8 | 3,2 | 16,9 | 43,0 | 47 |
| 58 | Кострома | 0,474 | 0,272 | 124 | 12,0 | 20,0 | 470 | -0,4 | 17,6 | 2,7 | 79 | 684 | 30 | 2276 | 160 | 7,6 | 2,6 | 15,1 | 82,6 | 3,2 | 14,1 | 57,6 | 41 |
| 59 | Каспийск | 0,689 | 0,560 | 10 | 12,0 | 10,0 | 120 | -0,4 | 24,7 | 11,8 | 75 | 524 | 20 | 4341 | 38 | 11,5 | 5,4 | 19,5 | 113,1 | 3,2 | 16,9 | 43,0 | 48 |
| 60 | Комс.-на-Амуре | 0,375 | 0,309 | 24 | 14,0 | 84,0 | 4120 | -25,6 | 19,9 | -0,7 | 76 | 577 | 28 | 2300 | 169 | 7,7 | 0,7 | 18,4 | 117,8 | 4,5 | 14,7 | 50,7 | 137 |
| 61 | Курган | 0,319 | 0,344 | 88 | 12,9 | 50,0 | 6970 | -16 | 19,4 | 0,8 | 73 | 472 | 31 | 2400 | 169 | 6,6 | 1,6 | 14,3 | 99,8 | 0,9 | 15,3 | 55,5 | 65 |
| 62 | Архангельск | 0,637 | 0,408 | 1 | 15,0 | 36,0 | 1263 | -9,7 | 15,6 | 0 | 82 | 675 | 28 | 1700 | 179 | 6,9 | 2,5 | 13,3 | 70,3 | 0,6 | 13,3 | 64,6 | 40 |
| 63 | Находка | 0,508 | 0,150 | 1 | 12,0 | 40,0 | 250 | -12,8 | 17,8 | 6,5 | 71 | 788 | 27 | 2707 | 136 | 8,4 | 1,5 | 18,5 | 111,6 | 6,3 | 10,7 | 43,1 | 133 |
| 64 | Магадан | 0,760 | 0,158 | 48 | 11,9 | 10,0 | 120 | -25,6 | 12,6 | -51 | 73 | 535 | 26 | 1300 | 210 | 7,7 | 1,1 | 11,7 | 96,1 | 4,5 | 14,1 | 59,5 | 152 |
| 65 | Норильск | 0,850 | 0,200 | 20 | 13,8 | 10,0 | 7520 | -17,8 | 13,4 | -3,5 | 77 | 238 | 42 | 1000 | 249 | 6,2 | 0,7 | 10,7 | 75,0 | 0,1 | 14,0 | 69,0 | 88 |
| 66 | Мурманск | 0,578 | 0,415 | 22 | 13,7 | 44,0 | 632 | -9,7 | 12,9 | 0 | 87 | 575 | 31 | 925 | 190 | 6,9 | 2,5 | 10,3 | 75,1 | 0,6 | 13,5 | 69,0 | 33 |
| 67 | Владивосток | 0,555 | 0,609 | 1 | 13,3 | 160,0 | 900 | -14,4 | 17,5 | 4 | 73 | 813 | 27 | 2830 | 138 | 8,6 | 1,5 | 18,6 | 111,6 | 6,3 | 10,7 | 43,1 | 131 |
| 68 | Томск | 0,600 | 0,500 | 121 | 12,3 | 30,0 | 2020 | -19 | 18,1 | -0,6 | 75 | 637 | 37 | 2120 | 181 | 6,6 | 1,4 | 15,3 | 83,3 | 2,1 | 14,1 | 56,5 | 85 |
| 69 | Тюмень | 0,422 | 0,486 | 49 | 13,0 | 30,0 | 4430 | -16,6 | 18,6 | 1,3 | 74 | 524 | 37 | 2369 | 168 | 6,5 | 1,6 | 15,3 | 82,3 | 0,2 | 14,5 | 57,1 | 65 |
| 70 | Уссурийск | 0,302 | 0,156 | 32 | 12,4 | 30,0 | 680 | -14,4 | 20,0 | 2,6 | 75 | 666 | 26 | 2954 | 147 | 8,6 | 1,1 | 19,6 | 119,7 | 6,3 | 13,6 | 43,9 | 132 |
| 71 | Абакан | 0,411 | 0,146 | 248 | 12,6 | 27,0 | 25707 | -19 | 19,7 | -0,2 | 72 | 451 | 26 | 2250 | 172 | 6,6 | 1,2 | 15,5 | 87,2 | 2,1 | 15,9 | 53,6 | 91 |
| 72 | Якутск | 0,490 | 0,165 | 108 | 11,2 | 20,0 | 510 | -43,2 | 18,7 | -10,2 | 67 | 247 | 34 | 1866 | 210 | 4,4 | 0,1 | 13,5 | 88,6 | 0,9 | 14,4 | 62,0 | 129 |
| 73 | Благовещенск | 0,382 | 0,183 | 150 | 13,1 | 20,0 | 1800 | -22,3 | 21,4 | 0 | 69 | 575 | 30 | 2500 | 170 | 7,7 | 0,8 | 19,4 | 117,8 | 4,5 | 15,1 | 51,0 | 127 |
| 74 | Иркутск | 0,601 | 0,590 | 467 | 13,7 | 45,0 | 17000 | -21,2 | 17,4 | -1,1 | 74 | 489 | 19 | 2004 | 176 | 6 | 1,1 | 14,9 | 101,8 | 2,4 | 14,2 | 52,3 | 104 |
| 75 | Южно-Сахалинск | 0,360 | 0,167 | 24 | 13,1 | 20,0 | 880 | -13,8 | 15,5 | 2,1 | 81 | 909 | 32 | 2250 | 153 | 7,5 | 1,9 | 16,0 | 109,5 | 4,4 | 12,6 | 46,9 | 142 |
| 76 | Биробиджан | 0,280 | 0,078 | 75 | 14,0 | 40,0 | 310 | -22,3 | 20,3 | -0,1 | 74 | 704 | 27 | 2600 | 167 | 7,7 | 0,7 | 20,1 | 114,4 | 4,5 | 13,8 | 48,8 | 133 |
| 77 | Караганда | 0,587 | 0,510 | 555 | 12,8 | 59,0 | 3259 | -15,1 | 20,3 | 2,3 | 68 | 370 | 28 | 2654 | 165 | 5,9 | 1,7 | 10,1 | 130,7 | 4,5 | 17,6 | 49,7 | 73 |
| 78 | Хабаровск | 0,412 | 0,570 | 75 | 14,7 | 120,0 | 2530 | -22,3 | 21,1 | 1,4 | 71 | 672 | 28 | 2819 | 162 | 7,7 | 0,9 | 19,6 | 117,8 | 4,5 | 14,7 | 48,5 | 135 |
| 79 | Братск | 0,612 | 0,251 | 410 | 13,7 | 50,0 | 3000 | -23,6 | 18,2 | -2,3 | 74 | 406 | 20 | 1900 | 189 | 5,8 | 1,0 | 15,0 | 87,2 | 2,4 | 14,2 | 56,2 | 102 |
| 80 | Астрахань | 0,433 | 0,503 | 14 | 12,8 | 90,0 | 650 | -9,5 | 25,0 | 9,4 | 69 | 216 | 19 | 3863 | 113 | 8 | 3,8 | 17,2 | 118,4 | 2,6 | 16,3 | 46,3 | 48 |
| 81 | Кочеток | 0,341 | 0,004 | 157 | 10,8 | 1,5 | 5 | -7,3 | 20,5 | 6,9 | 74 | 609 | 27 | 3165 | 126 | 8,5 | 3,7 | 15,2 | 103,2 | 2,3 | 15,2 | 50,0 | 36 |
| 82 | Душанбе | 0,686 | 0,552 | 803 | 11,1 | 30,0 | 800 | 0,6 | 27,1 | 14,2 | 61 | 660 | 23 | 5205 | 0 | 9,6 | 5,3 | 14,6 | 151,3 | 5,6 | 21,1 | 38,5 | 68 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 83 | Владимир | 0,490 | 0,330 | 144 | 14,3 | 20,0 | 3107 | -11,4 | 18,1 | 3,4 | 78 | 691 | 29 | 2430 | 154,0 | 7,6 | 2,7 | 14,9 | 85,5 | 1,4 | 14,2 | 56,1 | 40 |
| 84 | Красноярск | 0,498 | 0,896 | 156 | 13,9 | 70,0 | 10720 | -17,8 | 19,6 | 0,6 | 69 | 429 | 35 | 2367 | 181 | 6,2 | 1,4 | 4,8 | 87,2 | 0,1 | 15,9 | 56,0 | 92 |
| 85 | Воронеж | 0,538 | 0,840 | 100 | 14,1 | 100,0 | 1500 | -9,3 | 20,2 | 5,4 | 74 | 660 | 27 | 2959 | 141 | 7,9 | 3,0 | 14,9 | 90,3 | 2 | 14,1 | 51,6 | 39 |
| 86 | Мары | 0,723 | 0,089 | 240 | 11,6 | 20,0 | 250 | 1,3 | 29,6 | 16,1 | 48 | 160 | 26 | 5909 | 0 | 8,7 | 5,4 | 13,0 | 160,0 | 5,7 | 21,5 | 37,7 | 62 |
| 87 | Тверь | 0,278 | 0,437 | 100 | 14,2 | 80,0 | 4500 | -9,4 | 18,2 | 3,3 | 80 | 783 | 29 | 2300 | 154 | 7,6 | 3,0 | 14,9 | 85,5 | 1,4 | 14,4 | 56,9 | 36 |
| 88 | Курск | 0,351 | 0,420 | 246 | 13,4 | 70,0 | 770 | -9,3 | 19,3 | 5,4 | 77 | 764 | 27 | 2850 | 137 | 7,9 | 3,3 | 15,0 | 89,1 | 2 | 14,3 | 52,9 | 36 |
| 89 | Казань | 0,466 | 1,047 | 120 | 13,3 | 158,0 | 998 | -12,8 | 20,0 | 3,6 | 76 | 562 | 29 | 2529 | 160 | 7,2 | 2,2 | 14,9 | 97,7 | 1,6 | 16,4 | 55,7 | 49 |
| 90 | Калуга | 0,485 | 0,297 | 200 | 14,3 | 30,0 | 3057 | -10 | 17,6 | 4,2 | 80 | 738 | 27 | 2500 | 150 | 7,9 | 2,9 | 15,3 | 90,0 | 1,4 | 14,2 | 54,5 | 36 |
| 91 | Петрозаводск | 0,461 | 0,253 | 110 | 12,0 | 30,0 | 700 | -9,7 | 16,6 | 2,6 | 80 | 708 | 30 | 2002 | 159 | 6,9 | 2,8 | 13,5 | 73,6 | 0,6 | 13,4 | 61,6 | 34 |
| 92 | Вологда | 0,364 | 0,263 | 122 | 9,6 | 40,0 | 1320 | -11,6 | 17,2 | 2,2 | 80 | 706 | 31 | 2168 | 169 | 7,2 | 2,5 | 14,4 | 80,0 | 0,9 | 13,9 | 59,1 | 34 |
| 93 | Тернополь | 0,613 | 0,130 | 334 | 12,0 | 20,0 | 250 | -3,9 | 18,4 | 6,7 | 79 | 678 | 24 | 2940 | 112 | 9 | 3,8 | 15,0 | 106,9 | 2,6 | 13,7 | 49,5 | 25 |
| 94 | Екатеринбург | 0,322 | 1,340 | 281 | 12,0 | 215,0 | 2005 | -15,1 | 17,4 | 1,2 | 74 | 582 | 29 | 2210 | 169 | 6,5 | 1,7 | 13,9 | 91,9 | 0,9 | 14,1 | 56,8 | 32 |
| 95 | Херсон | 0,342 | 0,366 | 15 | 12,0 | 40,0 | 1500 | -2,5 | 23,3 | 9,8 | 80 | 438 | 20 | 3895 | 87 | 10,3 | 4,8 | 16,0 | 114,8 | 2,8 | 17,5 | 47,0 | 32 |
| 96 | Симферополь | 0,419 | 0,340 | 223 | 12,0 | 50,0 | 510 | -1 | 21,2 | 10,2 | 73 | 576 | 20 | 3795 | 56 | 9,8 | 5,3 | 15,9 | 117,2 | 3,4 | 18,2 | 45,0 | 34 |
| 97 | Кировоград | 0,309 | 0,267 | 170 | 12,0 | 40,0 | 3775 | -5,1 | 21,1 | 8 | 75 | 561 | 21 | 3350 | 116 | 8,9 | 4,0 | 15,3 | 107,0 | 2,5 | 15,9 | 48,4 | 32 |
| 98 | Чарджоу | 0,786 | 0,140 | 167 | 12,0 | 20,0 | 250 | 0,6 | 29,2 | 15,2 | 54 | 148 | 23 | 5577 | 0 | 9,1 | 5,3 | 14,0 | 162,9 | 5,7 | 21,5 | 39,1 | 63 |
| 99 | Актюбинск | 0,559 | 0,230 | 229 | 12,0 | 40,0 | 500 | -15,6 | 22,3 | 4 | 67 | 315 | 29 | 3140 | 157 | 6,5 | 2,0 | 12,9 | 128,6 | 3,7 | 18,1 | 50,3 | 57 |
| 100 | Барнаул | 0,387 | 0,562 | 160 | 12,0 | 90,0 | 1602 | -17,7 | 19,7 | 1,1 | 72 | 613 | 28 | 2500 | 169 | 6,7 | 1,5 | 15,7 | 103,0 | 2,7 | 17,1 | 53,3 | 83 |
| 101 | Гродно | 0,443 | 0,239 | 152 | 12,0 | 20,0 | 500 | -5,5 | 18,0 | 6,5 | 80 | 655 | 26 | 2815 | 117 | 8,5 | 4,2 | 14,6 | 90,5 | 1,4 | 14,9 | 53,7 | 24 |
| 102 | Брест | 0,285 | 0,218 | 140 | 12,0 | 20,0 | 400 | -5,4 | 18,8 | 7,4 | 78 | 661 | 26 | 3044 | 105 | 9 | 4,2 | 14,9 | 96,9 | 2,2 | 14,9 | 52,3 | 24 |
| 103 | Калининград | 0,396 | 0,370 | 10 | 12,0 | 100,0 | 540 | -3 | 17,7 | 7,2 | 81 | 856 | 23 | 2840 | 104 | 9 | 4,6 | 15,0 | 120,0 | 1,4 | 14,3 | 54,7 | 20 |
| 104 | Кустанай | 0,485 | 0,200 | 138 | 12,0 | 26,0 | 5105 | -17,7 | 20,2 | 1,6 | 70 | 373 | 23 | 2665 | 169 | 6,4 | 1,6 | 13,8 | 105,3 | 2,7 | 14,9 | 53,2 | 63 |
| 105 | Семипалатинск | 0,317 | 0,390 | 195 | 12,0 | 60,0 | 2350 | -15,1 | 22,2 | 2,3 | 67 | 364 | 27 | 3026 | 161 | 5,9 | 1,5 | 14,0 | 123,9 | 4,5 | 16,9 | 50,4 | 80 |
| 106 | Уральск | 0,260 | 0,215 | 38 | 12,0 | 30,0 | 1090 | -14,8 | 22,9 | 4,4 | 69 | 374 | 28 | 3220 | 152 | 6,9 | 2,2 | 13,4 | 112,6 | 2,4 | 16,7 | 51,2 | 51 |
| 107 | Гурьев | 0,457 | 0,145 | 18 | 12,0 | 30,0 | 700 | -9,5 | 25,5 | 7,6 | 66 | 236 | 24 | 3820 | 129 | 8 | 3,0 | 15,5 | 135,2 | 2,6 | 18,9 | 47,1 | 51 |
| 108 | Саратов | 0,683 | 0,907 | 135 | 12,0 | 169,0 | 1138 | -11,1 | 22,9 | 5,3 | 69 | 536 | 23 | 3322 | 147 | 7,2 | 2,5 | 13,7 | 106,9 | 2,4 | 15,9 | 51,6 | 46 |
| 109 | Кзыл-Орда | 0,201 | 0,186 | 336 | 12,0 | 10,0 | 180 | -4,6 | 25,7 | 9 | 56 | 151 | 36 | 4079 | 121 | 7,8 | 3,0 | 11,9 | 140,0 | 4,7 | 18,8 | 44,8 | 65 |
| 110 | Ставрополь | 0,544 | 0,293 | 577 | 12,0 | 50,0 | 450 | -3,7 | 21,9 | 9,1 | 71 | 715 | 22 | 3599 | 93 | 8,9 | 4,2 | 15,0 | 111,6 | 3,8 | 16,1 | 45,0 | 42 |
| 111 | Владикавказ | 0,679 | 0,326 | 649 | 12,0 | 30,0 | 800 | -3,7 | 19,7 | 7,9 | 80 | 895 | 22 | 3256 | 103 | 9,7 | 3,9 | 17,5 | 111,6 | 3,8 | 16,1 | 43,0 | 44 |
| 112 | Грозный | 0,694 | 0,392 | 649 | 12,0 | 40,0 | 2000 | -3,6 | 23,7 | 10,1 | 78 | 502 | 22 | 3936 | 89 | 10,7 | 4,6 | 18,9 | 111,6 | 3,8 | 16,1 | 43,3 | 45 |
| 113 | Шевченко | 0,717 | 0,165 | 10 | 12,0 | 30,0 | 650 | -3,2 | 25,6 | 11,1 | 67 | 214 | 36 | 4061 | 85 | 10,3 | 4,3 | 20,3 | 124,0 | 3,1 | 17,1 | 43,7 | 51 |

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 114 | Нукус | 0,900 | 0,155 | 85 | 12,0 | 10,0 | 300 | -0,9 | 27,1 | 10,8 | 59 | 115 | 20 | 4369 | 104 | 8,9 | 3,8 | 15,4 | 147,1 | 5,5 | 20,8 | 42,5 | 59 |
| 115 | Петропавловск-Камчатский | 0,442 | 0,245 | 10 | 12,0 | 10,0 | 1480 | -8,4 | 10,8 | 1,9 | 72 | 1617 | 31 | 1645 | 169 | 6,1 | 2,5 | 12,0 | 94,6 | 2,6 | 12,4 | 52,9 | 158 |
| 116 | Красноводск | 0,646 | 0,065 | 14 | 12,0 | 10,0 | 250 | 2,9 | 28,8 | 15,8 | 58 | 127 | 28 | 5777 | 0 | 10,8 | 6,0 | 17,6 | 150,0 | 5,7 | 19,8 | 40,0 | 53 |
| 117 | Челябинск | 0,527 | 1,139 | 229 | 12,0 | 262,0 | 8169 | -16 | 18,8 | 1,5 | 72 | 521 | 29 | 2372 | 167 | 6,6 | 1,6 | 14,3 | 100,0 | 0,9 | 14,1 | 55,2 | 61 |
| 118 | Фергана | 0,833 | 0,195 | 378 | 12,0 | 20,0 | 400 | -3,2 | 26,8 | 13 | 63 | 192 | 28 | 4887 | 60 | 9,7 | 4,5 | 15,7 | 144,7 | 5 | 19,8 | 40,4 | 72 |
| 119 | Джамбул | 0,645 | 0,215 | 620 | 12,0 | 60,0 | 1000 | -4,6 | 23,8 | 9 | 64 | 353 | 25 | 3492 | 105 | 7,8 | 3,7 | 12,9 | 145,0 | 4,7 | 17,5 | 42,9 | 71 |
| 120 | Керчь | 0,474 | 0,166 | 10 | 12,0 | 70,0 | 800 | -1 | 23,3 | 0,6 | 78 | 496 | 22 | 4115 | 16 | 9,8 | 5,6 | 19,1 | 115,0 | 3,4 | 18,2 | 45,7 | 36 |
| 121 | Пенза | 0,400 | 0,527 | 170 | 12,0 | 60,0 | 540 | -11,1 | 19,8 | 3,9 | 75 | 666 | 29 | 2739 | 154 | 7,2 | 2,5 | 14,9 | 91,0 | 2,4 | 15,6 | 53,0 | 43 |
| 122 | Уфа | 0,497 | 1,100 | 173 | 12,0 | 90,0 | 1070 | -16 | 19,3 | 2,8 | 75 | 515 | 27 | 2637 | 164 | 6,6 | 2,1 | 15,1 | 97,6 | 0,9 | 15,6 | 54,0 | 56 |
| 123 | Сыктывкар | 0,487 | 0,145 | 110 | 12,0 | 20,0 | 1180 | -15,1 | 16,6 | 0,4 | 80 | 670 | 30 | 1913 | 172 | 6,5 | 2,0 | 13,6 | 82,0 | 0,9 | 14,8 | 61,7 | 50 |
| 124 | Киров | 0,520 | 0,411 | 164 | 12,0 | 58,0 | 3646 | -15,1 | 17,8 | 1,5 | 78 | 694 | 30 | 2197 | 170 | 6,5 | 2,2 | 14,0 | 89,7 | 0,9 | 14,9 | 58,6 | 49 |
| 125 | Павлодар | 0,372 | 0,350 | 120 | 12,0 | 40,0 | 10840 | -15,1 | 21,2 | 2,3 | 71 | 352 | 27 | 2795 | 165 | 5,9 | 1,6 | 14,3 | 110,0 | 4,5 | 17,6 | 52,0 | 76 |
| 126 | Севастополь | 0,410 | 0,376 | 23 | 12,0 | 60,0 | 550 | 2,9 | 22,4 | 2,7 | 74 | 395 | 19 | 4100 | 2 | 11,4 | 6,3 | 19,1 | 120,0 | 3,1 | 18,2 | 44,6 | 33 |

# СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ


1. Абрамов Н.Н. Водоснабжение. — М.: Стройиздат, 1982. — 440 с.
2. Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения. 2-е изд. — М.: Стройиздат, 1984. — 216 с.
3. Абрамов Н.Н. Расчет водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1976. — 503 с.
4. Абрамов Н.Н. Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. — М.: Стройиздат, 1972. — 287 с.
5. Абрамов Н.Н., Гениев Н.Н., Павлов В.И. Водоснабжение. — М.: Госстройиздат, 1958. — 250 с.
6. Абрамов Н.Н., Малов В.И. О надежности систем водоснабжения и путях ее обеспечения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1976. — №1. — С. 161–170.
7. Абрамов Н.Н., Поспелова М.М. Расчет водопроводных сетей. — М.: Госстройиздат, 1962. — 228 с.
8. Абрамов Н.Н., Поспелова М.М. Расчет водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1983. — 278 с.
9. Авакян А.Б. О важности культуры, воспитания и нравственности в решении водных проблем // Тез. докл. IV Междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М., 2000. — С. 11.
10. Автоматизированные системы управления городским хозяйством / Кузьмин И.В., Петров Э.Г., Алферов И.А., Евсеев В.В., Мигунова Л.В. / Под ред. В.М. Глушкова. — К.: Будівельник, 1978. — 138 с.
11. Агаджанов Г.К. Економіка водопровідно-каналізаційних підприємств. – Харків: Основа, 2000. — 304 с.
12. Адаменко В.Н. Климат и озера. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. – 263 с.
13. Айвазян С.А. Статистическое исследование зависимостей. — М.: Металлургия, 1969. — 227 с.
14. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах. — М. — Л.: Госэнергоиздат, 1963. — 256 с.
15. Альтшуль А.Д. Закон сопротивления трубопроводов // ДАН СССР, новая серия. – 1951. — Т. LXXVI, №6. — С. 809–812.
16. Андерсон К., Минаси М. Локальные сети. Полное руководство: Пер. с англ. — К.: ВЕК+; М.: ЭНТРОП; СПб.: КОРОНА-принт, 1999. — 624 с.
17. Андрияшев М.М. Гидравлические расчеты водоводов и водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1964. — 107 с.
18. Андрияшев М.М. Гидравлические расчеты оборудования водоводов. — М.: Стройиздат, 1979. — 104 с.
19. Аронов С.Н. Проектирование водоводов. — М.: Госиздат лит. по строительству и архитектуре, 1953. — 228 с.
20. Арутюнян К.Г., Колискор Т.М., Петросов В.А. Совершенствование расчета подачи и распределения воды и методы ее очистки // Науч. тр. АКХ им. К.Д. Памфилова. Экспериментальные гидравлические исследования макрошероховатости труб. — М., 1976. – С. 57–66.
21. Архангельский А.Я. Программирование в Delphi 5. — М.: ЗАО «Изд-во БИНОМ», 2000. — 1072 с.
22. Астапенко П.Д. Вопросы о погоде. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 240 с.

23. Баббит Г., Доланд Дж. Водоснабжение: Пер. с англ. — М.: Стройиздат, 1958. — 345 с.

24. Белан А.Е. Технология водоснабжения. — К.: Наук. думка, 1985. — 264 с.

25. Белан А.Е., Хоружий П.Д. Проектирование и расчет устройств водоснабжения. — К.: Будівельник, 1981. — 185 с.

26. Бер А.М., Белов Е.Н., Поляк Б.Т. О некоторых задачах оптимизации // Вычислительные методы и программирование. — 1966. — Т. 5. — С. 115–123.

27. Беседы по автоматике / Голубничий Н.И., Зайцев Г.Ф., Иващенко М.А., Чинаев Ф.И., Чумаков Н.М. — К.: Техніка, 1973. — 236 с.

28. Биргер И.А., Пановко Я.Г. Прочность, устойчивость, колебания: Справочник. Т. 1. – М.: Машиностроение, 1968. — 831 с.

29. Білявський Г.О., Падун М.М., Фурдуй Р.С. Основи загальної екології. — 2-е вид., зі змінами. — К.: Либідь, 1995.– 368 с.

30. Боровиков В.П., Ивченко Г.И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows. — М.: Финансы и статистика, 1999. — 384 с.

31. Вайсберг Дж. Погода на Земле. Метеорология: Пер. с англ. — Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 247 с.

32. Ващенко П.П., Шипович Е.И. География. — К.: Вища шк., 1966. — 499 с.

33. Вербицкий А.С. Расчетный режим водопотребления и его использование при проектировании // Сб. науч. тр. АКХ. — 1978. — №155. — С. 38–40.

34. Вербицкий П.Ф. Определение экономических диаметров трубопроводов // Общие вопросы строительства (отечественный опыт). — М.: ЦИНИС, Вып. 10. — 1974. — С. 72–74.

35. Водопроводные и канализационные насосы и насосные станции / Малишевский Н.Г., Кондратьев Н.И., Алешков П.И., Малова Н.М. — Харьков: Изд-во ХГУ, 1960. — 394 с.

36. Воронец Д., Козич Д. Влажный воздух, термодинамические свойства и применения. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 136 с.

37. Галактионов С.Г., Юрин В.М. Водоросль сигнализирует об опасности. — Минск: Вышэшая шк., 1980. — 144 с.

38. Гальперин Е.М. Надежность проектируемых кольцевых СПРВ и пути ее повышения // Матер. Всес. семин. «Обеспечение надежности систем хозяйственно-питьевого водоснабжения». — М.: МДНТП, 1989. — С. 22–29.

39. Гальперин Е.М. О терминах и определениях в водоснабжении // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — №12.– С. 23–24.

40. Гидравлика и гидротехника: Респ. межвед. науч.-техн. сб. Вып. 10. — К.: Техніка, 1970. — 110 с.

41. Гидравлика, водоснабжение и канализация / Калицун В.И., Кедров В.С., Ласков Ю.М., Сафонов П.В.. — 3-е изд. — М.: Стройиздат, 1980. — 359 с.

42. Гидравлика, водоснабжение и канализация городов: Учебник для вузов / Прозоров И.В. и др. — М.: Высш. шк., 1975. — 422 с.

43. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 624 с.

44. Гидравлические расчеты систем водоснабжения и водоотведения: Справочник. 3-е изд. / Под ред. А.М. Курганова. – М.: Стройиздат, 1986. — 440 с.

45. Гидравлический расчет и устройство водопроводов и железобетонных труб / Дикаревский В.С., Якубчик П.П., Продоус О.А., Константинов Ю.М. — К.: Будівельник, 1984. — 112 с.

46. Глуховский И.И. Совершенствование работы операторов диспетчерских служб на основе оперативной оценки устойчивости и экономичности функционирования инженерных систем (на примере городской системы водоснабжения) // Тез. докл. IV Междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М.: 2000. — С. 787–788.

47. Глушков В.М. Введение в автоматизированные системы управления. — К.: Техніка, 1972. — 310 с.

48. Голяченко О.М., Сердюк А.М., Приходский О.О. Социальная медицина, организация и экономика здравоохранения. — Тернополь; Киев; Винница, 1997. – 328 с.

49. Григоровский Е.П., Койда Н.У. Автоматизация расчета многоконтурных сетевых систем. — К.: Вища шк., 1977. — 192 с.

50. Григоровский Е.П., Койда Н.У. Моделирование технологических процессов и автоматизированное управление потокораспределением в инженерных сетях (1, 2 части). — К.: КГТУСА, 1994. — Деп. в ГНТБ Украины 4.08.95. №1453. УК 94.

51. Григоровський Є.П. Моделі та методи автоматизованого управління потокорозподілом у трубопровідних системах: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.13.07 / КДТУБА. — К., 1995. — 32 с.

52. Григорьев В.И., Мякишев Г.Я. Силы в природе. — М.: Наука, 1988. — 448 с.

53. Гриценко А.В., Сухоруков Г.О. Програма екологічного оздоровлення р. Сіверський Донець // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. – С. 326–329.

54. Гриценко Ю.Н., Волков Л.А. Комплексное использование водных ресурсов и охрана окружающей среды. — К.: УМК ВО, 1989. — 216 с.

55. Гузынин А.И., Курганов А.М. Некоторые вопросы оптимизации водопроводных сетей. Полтавский инж.-строит. ин-т. — Полтава, 1981. — Деп. в ВИНИТИ №2698. — 24 с.

56. ДБН-Б. 1-3-97. Состав, содержание, порядок разработки, согласования и утверждения генеральных планов городских населенных пунктов. — Введ. 01.12.97. — К.: Госстрой Украины, 1997. — 34 с.

57. Додж М., Стинсон К. Эффективная работа с Microsoft Excel 2000: Пер. с англ. – СПб: Питер, 2000. — 1056 с.

58. Душкин С.С., Краев И.О. Эксплуатация сетей водоснабжения и водоотведения. – К.: ИСИО, 1993. — 164 с.

59. Евдокимов А.Г. Оптимальные задачи на инженерных сетях. — Харьков: Вища шк., 1976. — 153 с.

60. Евдокимов А.Г., Дубровский В.В., Тевяшев А.Д. Потокораспределение в инженерных сетях. — М.: Стройиздат, 1972. — 199 с.

61. Евдокимов А.Г., Петросов В.А. Информационно-аналитические системы управления инженерными сетями жизнеобеспечения населения. — Харьков: ХТУРЭ, 1998. — 412 с.

62. Евдокимов А.Г., Петросов В.А., Губарев С.И. Проектирование автоматизированной системы управления водоснабжением современного города //Наука и техника в городском хозяйстве. — 1976. — Вып. XXXII. — С. 44–49.

63. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д. Оперативное управление потокораспределением в инженерных сетях. — Харьков: Вища шк., 1980. — 144 с.

64. Евдокимов А.Г., Тевяшев А.Д., Дубровский В.В. Моделирование и оптимизация потокораспределения в инженерных сетях. — М: Стройиздат, 1990. –368 с.

65. Евилевич А.З. Ошибки в эксплуатации водопроводов и канализаций. — Л.: Стройиздат, 1972. — 120 с.

66. Епанешников А.М., Епанешников В.А. Delphi 5. Язык Object Pascal. — М.: Диалог–МИФИ, 2000. — 363 с.

67. Железнова Г.Л., Кожинов И.В. Неучтенные расходы воды в системах водоснабжения //Водоснабжение и санитарная техника. — 1997. — №11. – С. 5–8.

68. Жуков Н.Н., Железнова Г.Л., Орлов Г.А. Снижение потерь питьевой воды в системах коммунального водоснабжения //Водоснабжение и санитарная техника. — 2000. — №8. — С. 14–17.

69. Замкова О.И., Замков Ю.В., Головенко С.К. Автоматизация предприятий водоснабжения и водоотведения //Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — № 6. — С. 34–35.

70. Зарубин Г.П., Новиков Ю.В. Гигиена города. — М.: Медицина, 1986. — 271 с.

71. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник. В 2 т. / Под ред. А.А. Герасименко. – М.: Машиностроение, 1987. – Т.1. — 688 с.

72. Защита от коррозии, старения и биоповреждений машин, оборудования и сооружений: Справочник. В 2 т. / Под ред. А.А. Герасименко. — М.: Машиностроение, 1987. – Т.2. — 784 с.

73. Зегжда А.П. Гидравлические потери на трение в каналах и трубопроводах. – М.: Госиздат лит. по строительству и архитектуре, 1957. — 274 с.

74. Зоны загрязнения снежного покрова вокруг городов на территории СССР: Каталог ореолов для городов с населением более 50 тыс. человек / Прокачева В.Г., Чмутова Н.П., Абакуменко В.П., Усачев В.Ф. — Л.: ФОЛ ВФ ГТИ, 1988. — 125 с.

75. Ивахненко А.Г. Самообучающиеся системы. — К.: АН УССР, 1963. — 328 с.

76. Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. — Л.: Гидрометеоиздат, 1984. — 560 с.

77. Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. –М.: Стройиздат, 1985. — 241 с.

78. Интегрированная диалоговая система рациональной эксплуатации и развития систем подачи и распределения воды / Рябченко И.Н., Маслак В.Н., Гречухин А.В. и др. – Донецк: РИП «Лебедь», 1994. — 192 с.

79. Интегрированные компьютерные технологии управления системами водоснабжения / Богомазов О.А., Иваненко Б.Н., Пфафенрот В.А., Самойленко Н.И. / Под общ. ред. Н.И. Самойленко. — Харьков: Основа, 1998. — 272 с.

80. Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов / Под ред. Н.И. Самойленко. — Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. — 232 с.

81. Исаев В.Н., Мхитарян М.Г. Структура водопотребления в хозяйственно-питьевом водоснабжении // Водоснабжение и санитарная техника. — 1991.– №6. — С. 16–17.

82. Исаченко А.Г. Оптимизация природной среды. – М.: Мысль, 1980. — 264 с.

83. Кайгородов А.И. Естественная зональная классификация климатов земного шара. – М.: АН СССР, 1955. — 120 с.

84. Калабро С.Р. Принципы и практические вопросы надежности. — М.: Машиностроение, 1966. — 368 с.

85. Камерштейн А.Г. Мероприятия по сохранению пропускной способности водопроводных труб. — М.: Госстройиздат, 1950. — 98 с.

86. Каримов Р.Х. Программное обеспечение расчетов систем водоподачи // Водоснабжение и санитарная техника. — 1995. — №11. — С. 26–27.

87. Карюхина Т.А., Чурбанова И.Н. Химия воды и микробиология. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1983. – 168 с.

88. Каталог продукции корпорации «Триол». — М.; СПб; Харьков, 1999. – 51 с.

89. Кикачейшвили Г.Е. Расчет оптимальных параметров систем подачи и распределения воды. — Тбилиси: Сабчато сакартвело, 1980. — 256 с.

90. Кикачейшвили Г.Е. Технико-экономический расчет разветвленных водопроводных сетей методом линейного программирования // Водоснабжение и санитарная техника. — 1969. — №6. — С. 7–8.

91. Кирсанов М.В. Экономический расчет водопроводных сетей. — Л.: МКХ РСФСР, 1949. — 198 с.

92. Климат Киева / Под ред. Л.И. Сакали. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. — 287 с.

93. Климат Полтавы / Под ред. В.Н. Бабиченко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 208 с.

94. Климат Украины / Под ред. Г.Ф. Прихотько. — Л.: Гидрометеоиздат, 1967. – 413 с.

95. Климат Харькова / Под ред. В.Н. Бабиченко. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 216 с.

96. Клячко В.А., Апельцин И.Э. Подготовка воды для промышленного и городского водоснабжения. — М.: Гос. изд. лит. по строительству, архитектуре и стройматериалам, 1962. — 819 с.

97. Коган А.С. Интенсификация работы городских водопроводов. — М.: Изд-во МКХ РСФСР, 1955. –200 с.

98. Кожинов И.В., Добровольский Р.Г. Метод оценки скрытых утечек воды из водопроводных сетей // Водоснабжение и санитарная техника. — 1981. — №10. – С. 3–5.

99. Кожинов И.В., Добровольский Р.Г. Устранение потерь воды при эксплуатации систем водоснабжения. — М.: Стройиздат, 1988. — 344 с.

100. Кожушко С.Г. Исследование устройств по защите трубопроводов и оборудования водопроводных насосных станций от гидравлического удара: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.483.– К.: КИСИ, 1971. — 20 с.

101. Койда Н.У., Казимиров Е.Я. Расчет гидравлических сетей на ЭЦВМ. — Минск: Высш. шк., 1964. — 59 с.

102. Колотило В.Д. Динаміка процесу транспортування води по магістральних водоводах з використанням електроприводу, що регулюється: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.16. — Харків: ХДТУБА, 2001. — 20 с.

103. Контаутас Р.К. Исследование и разработка методов регулирования систем городского водоснабжения: Дис. … канд. техн. наук. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1982. — 228 с.

104. Корчинский И.Л., Беченева Г.В. Прочность строительных материалов при динамических нагружениях: Пособие для проектировщиков. — М.: Стройиздат, 1966. — 212 с.

105. Котляков В.М. Глобальные изменения климата: антропогенное влияние или естественные вариации // Экология и жизнь. — 2001. — №1(18). — С. 44–47.

106. Красовский Г.Я., Петросов В.А. Введение в методы космического мониторинга окружающей среды. — Харьков: Гос. Аэрокосмический ун-т «Харьк. авиац. ин-т», 1999. — 206 с.

107. Кривченко Г.И. Гидравлический удар и рациональные режимы регулирования турбин гидроэлектростанций. — М.–Л.: Госэнергоиздат, 1951. — 199 с.

108. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход: Пер. с англ. — М.: Мир, 1978. – 432 с.

109. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. – 350 с.

110. Кузнецов Ю.В., Щебетковский В.Н., Трусов А.Г. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений. — М.: Атомиздат, 1974. — 360 с.

111. Кульский Л.А. Теоретические основы и технология кондиционирования воды. 4-е изд., перераб. и доп. — К.: Наук. думка, 1983. — 528 с.

112. Кульский Л.А., Накорчевская В.Ф. Химия воды: Физико-химические процессы обработки природных и сточных вод. — К.: Вища шк., 1983. — 240 с.

113. Кульский Л.А., Строкач П.П. Технология очистки природных вод. — К.: Вища шк., 1986. — 336 с.

114. Кундо Ю.А., Воскресенский О.Е. Опыт разработки и применения регулируемого электропривода на базе тиристорных преобразователей частоты в системе водоснабжения и водоотведения городов и промышленных предприятий // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы в жилищно-коммунальном хозяйстве». – Харьков, 1995. — С. 92.

115. Куранда В.М. Проблеми автоматизації та інформатизації систем водозабезпечення / Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта. — 2001. — С. 46–48.

116. Кяндлер Н., Коппель Т., Васильев А. Разработка модели водопроводной сети / Тез. докл. Междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М.: 2000. — С. 369–370.

117. Леві Л.І. Ієрархічна декомпозиція в задачах оперативного управління інженерними мережними системами: Автореф. дис. … д-ра техн. наук: 05.13.07. — К.: КНУБА, 2000. — 33 с.

118. Лезнов Б.С. Экономия электроэнергии в насосных установках. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 141 с.

119. Лезнов Б.С. Экономия энергии в приводе центробежного насоса, регулируемого электромагнитной муфтой скольжения // Сб. техн. информ. ЦВП МО СССР, 1964. — №11.

120. Лезнов Б.С. Энергосбережение и регулируемый привод в насосных установках. — М.: ИК «Ягорба – Биоинформсервис», 1988. — 180 с.

121. Ливчак И.В., Воронов Ю.В. Охрана окружающей среды. — М.: Стройиздат, 1988. — 191 с.

122. Литинецкий И.Б. Предвестники подземных бурь. — М.: Просвещение, 1988. – 191 с.

123. Лобачев В.Г. Вопросы рационализации расчетов водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1950. — 144 с.

124. Лобачев В.Г. Примеры расчета водопроводных сетей. — М.: Изд. МКХ РСФСР, 1950. — 156 с.

125. Лобачев П.В., Шевелев Ф.А. Измерение расхода жидкостей и газов в системах водоснабжения и канализации. — М.: Стройиздат, 1985. — 424 с.

126. Логвинов К.Т., Барабаш М.Б. Климат и опасные гидрометеорологические явления Крыма. — Л.: Гидрометеоиздат, 1982. — 311 с.

127. Лосев К.С. Климат: вчера, сегодня ... и завтра? — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 176 с.

128. Львович М.И. Вода и жизнь. — М.: Мысль, 1986. — 237 с.

129. Львовский Е.Н. Статистические методы построения эмпирических формул. — М.: Высш. шк., 1982. — 224 с.

130. Маркус Т.А., Маррио Э.Н. Здания, климат и энергия. — Л.: Гидрометеоиздат, 1985. — 544 с.

131. Математическое моделирование систем водоснабжения / Кульский Л.А., Иванов В.Вас., Иванов В.Вл., Рогов В.М. — К.: Наук. думка, 1986. — 117 с.

132. Медико-социальные последствия ядерных катастроф (Семипалатинск — Алтай, Южный Урал, полигон «Северный — Новая Земля», Чернобыль) / Васильев Н.В., Мальцев В.И., Коваленко В.Н., Шубик В.М., Москаленко В.Ф., Волянский Ю.Л., Коляда Т.И., Пономаренко В.М., Парамонов З.М. — К.: Здоровье, 1999. — 296 с.

133. Меренкова Н.Н. Математические модели для оптимизации трассировки и структуры трубопроводных систем. — Иркутск, 1978. — С. 145–158.

134. Месарович М., Макс Д., Танахара И. Теория иерархических многоуровневых систем. — М.: Мир, 1973. — 344 с.

135. Методические рекомендации по изучению системы коммунально-промышленного водоснабжения в условиях автоматизации / Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Кашпур А.Д., Ходак И.М. — Харьков: ХИИКС, 1988. – 34 с.

136. Михеев Н.Н., Порядин А.Ф., Герт Соер, Кунахович А.И. Водные ресурсы и пути решения проблемы водоснабжения в России //Водоснабжение и санитарная техника. — 2000. — №4. — С. 5–9.

137. Міжгалуз. наук.-практ. конф. «Захист підземних металевих споруд від електрохімічної корозії». 8–10 грудня: Зб. доп. – Харків, 1999. — 88 с.

138. Моцкус И.Б., Леонас В.Л., Шальтянис В.Л. О нахождении оптимальной конфигурации распределительных сетей //Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1963. – №2. — С. 176–182.

139. Мошнин Л.Ф. Выбор диаметров водопроводных линий //Водоснабжение и санитарная техника. — 1940. — №2–3. — С. 48–55.

140. Мошнин Л.Ф. Методы технико-экономического расчета водопроводных сетей. — М.: Стройиздат, 1950. — 144 с.

141. Мошнин Л.Ф. Повышение эффективности систем подачи и распределения воды //Водоснабжение и санитарная техника. — 1995. — №11. — С. 23–26.

142. Мошнин Л.Ф., Гальперин Е.М., Глазунов Е.М. Расчет систем водоснабжения с использованием вычислительной техники //Водоснабжение и санитарная техника. — 1966. — №4. — С. 22–27.

143. Мошнин Л.Ф., Каримов Р.Х. Вычислительную технику — на службу управлению системами водоподачи //Водоснабжение и санитарная техника. — 1994. — №4. — С. 5–7.

144. Муслимов Э.Н., Пстыга Н.И. О практике применения автоматизированной системы управления водоснабжением города //Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы водоснабжения и водоотведения» (Вода–99). — Одесса, 1999. — С. 165–173.

145. Наладка и интенсификация работы городских систем подачи и распределения воды / И.В. Кожинов, В.В. Колесов, М.П. Майзельс, И.С. Эгильский. – М.: Стройиздат, 1978. — 112 с.

146. Насосна установка: Пат. 22021А України, МКВ 5 F 04 D 13/08 / Петросов В.А., Чорний А.П. (Україна). — №96031019; Заявл. 15.03.96; Опубл. 30.04.98, Бюл. №2. — 4 с.

147. Насосний агрегат: Пат. 20257А України, МКВ 6 F 04 D 13/08 / Чорний А.П., Петросов В.А., Вишнєвський В.В., Кулік А.Б (Україна). — №96041277; Заявл. 02.04.96; Опубл. 15.07.97, Бюл. № 1.98. — 4 с.

148. Некрасова О.А., Сумароков С.В., Хасилев В.Я. Выбор наивыгоднейшей трассировки трубопроводных сетей: Алгоритмы и программы / Сибирский энергетич. ин-т. — Иркутск, 1970. Деп. в ВИНИТИ, №1488-708.

149. Некрасова О.А., Хасилев В.Я. Оптимальное дерево трубопроводной системы // Экономика и математические методы. — 1970. — Т.4, №3. — С. 426–432.

150. Никитин И.К. Сложные турбулентные течения и процессы тепломассопереноса.– К.: Наук. думка, 1980. — 240 с.

151. Новиков Ю.В. Охрана окружающей среды. — М.: Высш. шк., 1987. — 287 с.

152. Новохатний В.Г. Топологическая методика оценки надежности водопроводных сетей // Матер. Всес. семин. «Обеспечение надежности систем хозяйственного питьевого водоснабжения». — М. — 1989. — С. 10–16.

153. Нутенко Л.Я. Использование проблемы Штейнера и ее обобщений для постановки и решения некоторых задач пространственной экономики. Обзор литературы. — М., 1968. — 82 с.

154. Окружающая среда: энциклопедический словарь-справочник: Пер. с нем. – М.: Прогресс, 1993. — 640 с.

155. Олейник А.Я. Теория и методы фильтрационного расчета несовершенных дренажей и водозаборов в различных гидрогеологических условиях: Автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.486 / ВНИИ ВОДГЕО. — М., 1971. — 40 с.

156. Онищук Г.І. Шляхи реформування водопровідно-каналізаційного господарства України // Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы водоснабжения и водоотведения» (Вода-99). — Одесса, 1999. — С. 2–4.

157. Осипов П.Е. Гидравлика и гидравлические машины. — М.: Лесная промышленность, 1965. — 362 с.

158. Охрана и оптимизация окружающей среды / Лаптев А.А., Приемов С.И., Родичкин И.Д., Шемшученко Ю.С. / Под ред. А.А. Лаптева. — К.: Лыбидь, 1990. — 256 с.

159. Панов М.Я., Курганов А.М. Многоконтурные гидравлические сети: теория и методы расчета. — Воронеж: ВГУ, 1989. — 192 с.

160. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы. — Харьков: ХГУ, 1964. – 202 с.

161. Петросов В.А. АСУ ТП фильтровальных блоков водоочистных станций // Коммунальное хозяйство городов. — 2001. — Вып. 27. — С. 25–28.

162. Петросов В.А. В «Харьковкоммунпромвод» сочетают ускорение НТП и активизацию человеческого фактора // Городское хозяйство Украины. — 1987. – №4. — С. 20–21.

163. Петросов В.А. В основе — экономические методы // Городское хозяйство Украины. — 1974. — №4. — С. 19–20.

164. Петросов В.А. Влияние АСУ водоснабжением на экономию водных и энергетических ресурсов // Тез. докл. Всес. науч.-техн. семин. «Рациональное использование воды и топливно-энергетических ресурсов в коммунальном водном хозяйстве». — Алма-Ата, 1985. – С. 34–50.

165. Петросов В.А. Влияние глобального изменения климата на водопотребление населенных мест. Резервы водообеспечения //Коммунальное хозяйство городов. – 2001. — Вып. 30. — С. 3–13.

166. Петросов В.А. Во имя дальнейшего подъема //Городское хозяйство Украины. — 1985. — №1. — С. 18–23.

167. Петросов В.А. Вода — жизнь, берегите ее. — Харьков: РИП «Оригинал», 1994. — 17 с.

168. Петросов В.А. Водосн абжение и вопросы экономики //Городское хозяйство Украины. — 1976. — №2. — С. 21–22.

169. Петросов В.А. Водоснабжение Харькова. — Харьков: Основа, 1999. — 56 с.

170. Петросов В.А. Главное направление — повышение эффективности // Городское хозяйство Украины. — 1978. — №3. — С. 21–22.

171. Петросов В.А. Это нужно человеку… на опыте Германии, США. – Харьков: РИП «Оригинал», 1994. — 256 с.

172. Петросов В.А. Изменение величины коэффициента гидравлического сопротивления λ в магистральных водоводах с течением времени их эксплуатации //Сб. докл. Междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации». — Ялта, 1997. — С. 124–131.

173. Петросов В.А. Изменение гидравлических сопротивлений магистральных водоводов с течением времени: Автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.23.04 / ХИИТ. — Харьков, 1971. – 19 с.

174. Петросов В.А. Интенсификация водоснабжения промцентра на базе интегрированной АСУ // Тез. докл. Всес. науч.-техн. конф. «Автоматизированные системы управления водоснабжением». — Харьков, 1986. — С. 9–12.

175. Петросов В.А. К вопросу об инкрустации водопроводных труб с течением времени // Вопросы технологии обработки воды промышленного и питьевого водоснабжения. Вып. 1. — 1969. — С. 34–37.

176. Петросов В.А. Контролировать качество водоподготовки современными методами // Городское хозяйство Украины. — 1989. – №1. – С. 26–27.

177. Петросов В.А. О совершенствовании систем управления ПРВ // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 99–104.

178. Петросов В.А. О совершенствовании систем управления ПРВ // Коммунальное хозяйство городов. — 2001. – Вып. 29. — С. 46–50.

179. Петросов В.А. Определение сопротивлений заросших трубопроводов // Городское хозяйство Украины. — 1974. — №2. — С. 18–19.

180. Петросов В.А. Питьевая вода и население // Міське господарство України. – 1999. — № 3. — С. 54–55.

181. Петросов В.А. Проблема водных ресурсов и начальный этап оптимизации городской системы подачи и распределения воды / Деп. сб. науч. тр., вып. 6, №5970, ВНИИИС. — М., 1985. — 4 с.

182. Петросов В.А. Проблемы водообеспечения городов // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы ресурсосбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве». — Харьков: ХГАГХ, 1995. — С. 70.

183. Петросов В.А. Прогноз интенсивности отказов водосети – один из путей сокращения потерь и неучтенных расходов воды // Наук. вісн. будівництва. — 2001. — Вип. 12 . — С. 42–51.

184. Петросов В.А. Прогноз непроизводительных потерь в жилом фонде города, оценка их влияния на экономику водоснабжения // Вісн. Донбаської держ. академії будівництва і архітектури. — 2001. — №2(27). — С. 33–36.

185. Петросов В.А. Прогноз рационального водопотребления промышленных центров // Охрана и рациональное использование водных ресурсов. — К.: УМК ВО, 1990. — С. 3–17.

186. Петросов В.А. Прогнозирование водопотребления промцентра // Тез. докл. науч.-техн. семин. «Перспективы развития водоснабжения и канализации». – Тбилиси: Грузинский политехн. ин-т, 1985. — С. 89–91.

187. Петросов В.А. Прогнозирование изменения коэффициента гидравлического сопротивления λ на магистральных водоводах с течением времени их эксплуатации // Коммунальное хозяйство городов. — 2001. — Вып. 29. — С. 40–43.

188. Петросов В.А. Прогнозирование изменения коэффициента гидравлического сопротивления λ на магистральных водоводах с течением времени эксплуатации // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 104–108.

189. Петросов В.А. Прогнозирование среднесуточного водопотребления в городах СНГ в зависимости от природно-климатических условий и других факторов // Тез. докл. Третьего Междунар. конгр. «Вода, экология и технология» (ЭКВАТЭК-98). — М., 1998. — С. 294.

190. Петросов В.А. Пути повышения надежности и безопасности водоснабжения // Наук. вісн. будівництва — 2000. — Вип. 9. — С. 59–63.

191. Петросов В.А. Пути ресурсосбережения в водопроводном хозяйстве // Тез. доп. наук.-практ. конф. «Проблеми і шляхи енергозбереження в будівельній індустрії і житлово-комунальному господарстві». – К., 2000. — С. 37–39.

192. Петросов В.А. Радиация. Экология. Вода. — Харьков: Основа, 1996. — 192 с.

193. Петросов В.А. Управление региональными системами водоснабжения. — Харьков: Основа, 1999. — 320 с.

194. Петросов В.А., Агаджанов Г.К. Интенсификация и повышение надежности водоснабжения городов // Наука и техника в городском хозяйстве. — 1986. – Вып. 62. — С. 6–9.

195. Петросов В.А., Агаджанов Г.К. Новые подходы к автоматизации и информатизации водопроводно-канализационного хозяйства // Сб. докл. Междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водопровода и канализации» (ЭТЭВК-99). — Ялта, 1999. — С. 42–44.

196. Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Григорчук Ю.Н. Разработка комплексной целевой программы создания и развития АСУ водоснабжением городов республики // Тез. докл. науч.-техн. семин. «Перспективы развития водоснабжения и канализации». — Тбилиси: Грузинский политехн. ин-т, 1985. — С. 93–95.

197. Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Кобылянский В.Я. Биотестирование в системе процесса биоочистки воды // Микробиология и биотехнология очистки воды. — 1989. — С. 36–37.

198. Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Назарьян Г.В. Выявление технически изношенных участков водопроводных сетей на основе анализа многолетней статистики повреждений // Тр. 52-го Междунар. коллокв. — Ильменау: Технический ун-т, 1997. — С. 54.

199. Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Стулов В.В. Ресурсосбережение в водопроводно-канализационном хозяйстве, опыт и практика для водоканалов Украины // Тез. докл. IV Междунар. конгр. «Вода, экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М., 2000. — С. 794–797.

200. Петросов В.А., Григорчук Ю.Н., Скрипец В.В. Использование метода рентгеноспектрального флуоресцентного анализа для контроля динамики элементного состава вод источников питьевого назначения // Тез. докл. XXIX Всес. гидрохим. совещ. «Состояние и перспектива развития методологических основ химического и биологического мониторинга поверхностных вод суши». — Ростов-на-Дону, 1987. — С. 63–64.

201. Петросов В.А., Кашпур А.Д., Василенко С.Л. Инвестиционная политика в водопроводно-канализационном хозяйстве // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы водоснабжения и водоотведения» (Вода-99). — Одесса, 1999. — С. 13–16.

202. Петросов В.А., Кобилянський В.Я., Панасенко О.О. Геоінформатика в управлінні якістю питної води. — Харків: Основа, 2000. — 112 с.

203. Петросов В.А., Кобылянский В.Я. О проблеме техногенного загрязнения родников г. Харькова // Сб. докл. Междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водопровода и канализации» (ЭТЭВК-99). — Ялта, 1999. — С. 41–42.

204. Петросов В.А., Кожушко С.Г. Проблема экономии воды и научно-технические решения на базе внедрения АСУ ТП водоснабжения // Наука и техника в городском хозяйстве. — 1980. — Вып. 44. — С. 9–12.

205. Петросов В.А., Колотило В.Д., Кобылянский В.Я. Адсорбция органических веществ активированным углем // Сб. докл. Междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации» (ЭТЭВК-99). — Ялта, 1999. — С. 44–46.

206. Петросов В.А., Колотило В.Д., Кобылянский В.Я. Проблемы внедрения нового СанПиН «Вода питна» // Тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. «Актуальные проблемы водоснабжения и водоотведения» (Вода-99). — Одесса, 1999. — С. 55–57.

207. Петросов В.А., Назарьян Г.В. Автоматизированная радиосистема сбора, обработки информации и оперативного управления территориально рассредоточенными объектами «АКВА-Р» // Тез. докл. III Междунар. выст.-семин. «Чистая вода Урала». — Екатеринбург, 1996. — С. 104.

208. Петросов В.А., Садыков А.С. Водоснабжению — единую техническую политику // Жилищное и коммунальное хозяйство. — 1978. — №7. — С. 17–18.

209. Петросов В.А., Садыков А.С., Агаджанов Г.К. Основы разработки метода оценки эффективности АСУ ТП водоснабжения // Наука и техника в городском хозяйстве. — 1981. — № 47– С. 7–12.

210. Петросов В.А., Чорний А.П. Насоси для комунального господарства // Міське господарство України. — 1995. — №1. — С. 29–32.

211. Петросов В.А., Щербань Н.Г., Агаджанов Г.К. Оценка показателей санитарного состояния водоемов на примере реки Северский Донец // Тез. докл. Всес. науч.-практ. конф. «Санитарная охрана водоемов». — Пермь, 1985. — С. 49–50.

212. Поляков Г.П. Расчет экономии электроэнергии в насосных установках при введении частотно-регулируемого электропривода // Водоснабжение и санитарная техника. — 2001. — №1. — С. 30–34.

213. Попов Ю.И. Определение расположения точек разветвления в сети трубопроводов // Строительство трубопроводов. — 1974. — №12. — С. 21–24.

214. Попкович Г.С. Основы автоматики и автоматизации водопроводно-канализационных сооружений, 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1975. — 359 с.

215. Поршнев В.Н. Экономический механизм рационального водопотребления // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — №9. — С. 15–16.

216. Порядин А.Ф. Водоснабжение больших городов: некоторые особенности дальнейшего развития // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — №9. — С. 6–8.

217. Постановление ЦК КПУ и Совета Министров УССР от 07.12.1979 г. «Про присудження Державних премій Української РСР в галузі науки і техніки 1979 р.»: за разработку и внедрение высокоэффективных научно-технических решений по повышению надежности водоснабжения городов и комплексной экономии водных, энергетических и материальных ресурсов / Петросов В.А. – руководитель работы, Магеря А.А., Шаповалов В.Н., Дашевский Е.В., Евдокимов А.Г., Ведерников В.В., Диденко К.И., Черепаха А.К., Таубе В.М., Шубов Г.С. // Зібрання Постанов Уряду УРСР. — 1980. – №12. — С. 6–7.

218. Правила пользования системами коммунального водоснабжения и водоотведения в городах и поселках Украины. Утв. Госжилкомхозом Украины 01.07.94. Введ. с 01.10.94 / Сост. Петросов В.А., Абрамович И.А., Кривцов А.Т., Ситницкая Э.А., Браун А.Я., Лысак В.Г., Львов В.М. — К., 1994. — 63 с.

219. Применение ЭВМ для расчета систем подачи и распределения воды / Гальперин Е.М., Зайко В.А., Поспелова М.М., Сомов М.А., Абрамов Н.Н., Болотников В.А. / Под ред. И.В. Прозорова. — М.: МИСИ, 1986. — 99 с.

220. Примин О.Г., Климиашвили Л.Д. Оценка и анализ надежности систем подачи и распределения воды // Матер. Всес. семин. «Обеспечение надежности систем хозяйственного питьевого водоснабжения». — М., 1989. — С. 4–10.

221. Приходько М.Г. Справочник инженера-синоптика. — Л.: Гидрометеоиздат, 1986. — 327 с.

222. Прогноз изменения гидрогеологических условий под влиянием водохозяйственных мероприятий / Невечеря И.К., Зеленцова Н.И. , Померанцева Л.Г. и др. — М.: Недра, 1987. — 205 с.

223. Пшеничный Б.И., Данилин Ю.М. Численные методы в экстремальных задачах.– М.: Наука, 1975. — 319 с.

224. Расчет водопроводных сетей / Абрамов Н.Н., Поспелова М.М., Варапаев В.Н., Керимова Д.Х., Сомов М.А. — М.: Стройиздат, 1976. — 298 с.

225. Рауш Э. Фундаменты машин. — М.: Стройиздат, 1965. — 420 с.

226. Рациональное использование водных ресурсов / Яковлев С.В., Прозоров И.В., Иванов Е.Н., Губий И.Г. — М.: Высш. шк., 1991. — 400 с.

227. Рейзин Б.Л., Стражевский И.В., Шевелев Ф.А. Коррозия и защита коммунальных водопроводов. — М.: Стройиздат, 1979. — 398 с.

228. Рекомендации по количественному учету радиационного теплового воздействия элементов городской среды на человека для целей градостроительного проектирования. – Ташкент: Среднеазиат. регион. науч.-исслед. ин-т (САНИИ) им. В.А. Бугаева, 1985. – 100 с.

229. Рекомендации по проектированию систем автоматического регулирования (САР) водопроводных и канализационных насосных станций и создание типовых схем элементов этих САР: Заключ. отчет о НИР. Кн. 1–4. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1984. — 310 с.

230. Роль среды и наследственности в формировании индивидуальности человека / Под ред. И.В. Равич-Щербо. — М.: Педагогика, 1988. — 336 с.

231. Рябченко И.Н. Моделирование процессов потокораспределения в системах подачи и распределения воды с использованием ПЭВМ. — Харьков: Основа, 1998. — 188 с.

232. Рябченко И.Н. Повышение эффективности эксплуатации систем водоснабжения в штатных режимах работы // Наук. вісн. будівництва. — 1999. — Вип. 7. — С. 169 — 172.

233. Рябченко І.М. Підвищення ефективності й надійності роботи систем водопостачання (проектування, реконструкція й експлуатація): Автореф. дис. … докт. техн. наук: 05.23.04.– Харків: ХДТУБА, 2001. — 33 с.

234. Сборник задач по гидравлике. 4-е изд. / Под ред. В.А. Большакова. — К.: Вища шк., 1979. — 336 с.

235. Свинцов А.П., Скотников Ю.А. Пути устранения потерь в жилых зданиях // Водоснабжение и санитарная техника. — 1988. — №1. — С. 22–23.

236. Семчук Г.М. Стан та проблеми нормативно-правового забезпечення діяльності підприємств водопровідно-каналізаційного господарства України //Зб. доп. міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 5–9.

237. Семчук Г.М. Сучасні проблеми очищення природних вод України та шляхи інтенсифікації роботи водоочисних споруд //Сб. докл. междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации» (ЭТЭВК-99). — Ялта, 1999. — С. 1–2.

238. Сидлер В.Г., Сумароков С.В., Чупин В.Р. Расчет послеаварийных гидравлических режимов // Водоснабжение и санитарная техника. — 1989. — №2. — С. 4–5.

239. Сиполс А.Э. Определение удельных потерь давления в стальных трубах / Водоснабжение и санитарная техника. — 1986. — №4. — С. 17

240. Сироткин В.П. Анализ различных методов экономического расчета диаметров водопроводных сетей / Строительство трубопроводов. — 1971. — №2. — С. 19–20.

241. Система водоснабжения: А.с. 1118754 СССР, МКИ 3 Е 03 В 7/04 / Бойко Э.Д., Евдокимов А.Г., Морозов С.В., Петросов В.А. (СССР). — №3580894/23–26; Заявлено 18.04.83; Опубл. 15.10.84, Бюл. №38. — 4 с.

242. Система управления электродвигателем насоса: А.с. 1373418 СССР, МКИ 4 В 01 Д 33/00 / Петросов В.А. (СССР). — №4010350/31–26; Заявлено 23.01.86; Опубл. 15.02.88, Бюл. № 6. — 4 с.

243. Система управления электродвигателями насоса: А.с. №1352096 СССР, МКИ 4 F04 D 15/00 / Петросов В.А., Шаталов Е.С., Коваленко В.Н., Горохов А.Г., Малишевский А.Н. (СССР). — №3916338/25–06; Заявлено 24.06.85; Опубл. 15.11.87, Бюл. №42. — 4 с.

244. Системный анализ и структуры управления / Под. ред. В.Г. Шорина. — М.: Знание, 1975. — 304 с.

245. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. 2-е изд. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 304 с.

246. Смирнов Н.В., Дунин-Барковский И.В. Краткий курс математической статистики для технических приложений. — М.: Физматгиз, 1959. — 436 с.

247. СНиП 2.01.01-82. Строительная климатология и геофизика.– М.: Стройиздат, 1983. — 136 с.

248. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 40 с.

249. СНиП 2.04.02–84. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. — М.: Стройиздат, 1985. — 136 с.

250. СНиП II-23-81, часть II, глава 23. Нормы проектирования. Стальные конструкции. — М.: Стройиздат, 1982. — 96 с.

251. Споры о будущем: Окружающая среда / Рябчиков А.М., Альтшулер И.И., Горшков С.П. и др. / Под ред. А.М. Рябчикова. — М.: Мысль, 1983. — 175 с.

252. Спосіб очищення води та пристрій для його здійснення: Пат. 28514 А України, МКИ 6 С 02 F1/22 / Петросов В.А. (Україна). — №97062579; Заявл. 03.06.97; Опубл. 16.10.2000, Бюл. №5–II. — 5 с.

253. Спосіб підвищення міцністких характеристик труб: Пат. 22960 А України, МКВ 6 F 16 L 9/18 / Петросов В.А. (Україна). — №97020590; Заявл. 11.02.97; Опубл. 30.06.98, Бюл. №3. — 3 с.

254. Спосіб визначення водопровідної характеристики мережі. Пат. 31236А України, МКИ 6 F 17 D 5/02 / Чорний А.П., Петросов В.А., Байбула В.Ф. (Україна). — №98073989; Заявл. 21.07.98; Опубл. 29.03.00, Бюл. №2, 15.12.00. Бюл. №7–II. — 4 с.

255. Способ определения концентрации хлорофилла и устройство для его осуществления: А.с. №1659797 СССР, кл. G 01 №21/64 / Хомяков Г.В., Кобылянский В.Я., Агаджанов Г.К., Веселовский В.А., Маренков В.С. (СССР). – №4461241/25; Заявлено 18.07.88; Опубл. 30.06.91, Бюл. №24. — 18 с.

256. Спосіб визначення наявності і кількості витоків в напірній мережі: Пат. 31235А України, МКИ 6 F 17 D 5/02 / Чорний А.П., Петросов В.А., Байбула В.Ф. (Україна). — №98073988; Заявл. 21.07.98; Опубл. 29.03.00, Бюл. №2, 15.12.00. Бюл. №7–II. — 5 с.

257. Спосіб визначення робочого режиму насоса: Пат. 30922А України, МКИ 6 F 04 D 15/00 / Чорний А.П., Петросов В.А., Попков В.В. (Україна). — №98063208; Заявл. 19.06.98; Опубл. 29.03.00, Бюл. №2, 15.12.00. Бюл. №7–II. — 4 с.

258. Способ получения биологически активного вещества растительного происхождения: Пат. 2001622 С Россия, МКИ 5 А 61 К 35/78 / Петросов В.А., Лапидус В.И., Корсунский Г.М. (Украина). — №5048833/14; Заявл. 17.02.92; Опубл. 30.10.93, Бюл. № 39–40. – 10 с.

259. Способ управления насосной станцией: А.с. 1435835 СССР, МКИ 4 F 04 Д 15/00 / Петросов В.А. (СССР). — №4143191/25–26; Заявлено 05.11.86; Опубл. 07.11.88, Бюл. №41. — 2 с.

260. Способ управления процессом работы системы водоснабжения: А.с. 1675507 СССР, МКИ Е 03 В 11/16 / Петросов В.А. (СССР). — №4650570; Заявлено 13.02.89; Опубл. 07.09.91, Бюл. №33. — 4 с.

261. Способ управления работой системы водоснабжения: А.с. 1260460 сССР, МКИ 4 Е 03 В1/00 / Петросов В.А. (СССР). — №3765201/23–26; Заявлено 06.08.84; Опубл. 30.09.86, Бюл. №36. — 4 с.

262. Справочник по автоматизированному электроприводу / Под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шиняковского. — М.: Энергоиздат, 1983. — 616 с.

263. Справочник по водным ресурсам / Под ред. Б.И. Стрельца. — К.: Урожай, 1987. — 304 с.

264. Справочник по гидравлике. 2-е изд. / Под ред. В.А. Большакова. — К.: Вища шк., 1984. — 343 с.

265. Справочник по гидравлическим расчетам. 5-е изд. / Под ред. П.Г. Киселева. — М.:Энергия, 1974. — 312 с.

266. Справочник по охране природы / Митрюшкин К.П., Берлянд М.Е., Беличенко Ю.П. и др. — М.: Лесная промышленность, 1980. — 352 с.

267. Сумароков С.В. Математическое моделирование систем водоснабжения. — Новосибирск: Наука, 1983. — 167 с.

268. Сухарев А.Г., Тимохов А.В., Федоров В.В. Курс методов оптимизации. — М.: Наука, 1986. — 326 с.

269. Таганян А.С. Иерархическая модель группового выбора // Экономика и математические методы. — 1980. — Т. 16. — Вып. 3. — С. 519–534.

270. Тарко А.М. Парниковый эффект и климат. Глобальное потепление и здоровье // Экология и жизнь. — 2001. — №1(18). — С. 48–49.

271. Таубе П.Р., Баранова А.Г. Химия и микробиология воды. — М.: Высш. шк., 1987. — 280 с.

272. Тевяшев А.Д., Ченчевой В.Г. Информационно-аналитическая система управления водопроводно-канализационным хозяйством региона // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 231–234.

273. Тевяшев А.Д., Ченчевой В.Г., Александров В.В. Системный подход к анализу и решению проблем развития и реконструкции региональных систем водоснабженеия и водоотведения // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Екологія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 228–231.

274. Температура воздуха на Украине / Под ред. Б.Н. Бабиченко. — Л.: Гидрометеоиздат, 1987. — 399 с.

275. Теория инвариантности и ее применение в автоматических устройствах // Тр. Первого Всес. совещ., 16–20 октября 1958 г. — М.: Изд. АН СССР, 1959. — 138 с.

276. Толлет И. Регулирование частоты вращения насосов с помощью преобразователя частоты «SAMI» фирмы «Стремберг» // Доклад на симпозиуме фирмы «Стремберг» 24 сентября 1981 г. — М., 1981. — С. 1–26.

277. Трильовська М.Р., Кузан М.В. Використання гідравлічної моделі програми

EPANET у м. Львові // Зб. доп. Міжнар. конгр. «Енергія, технологія, економіка водопостачання та каналізації» (ЕТЕВК-2001). — Ялта, 2001. — С. 23–25.

278. Тугай А.М., Терновцев В.Е. Водоснабжение: Курсовое проектирование. — К.: Вища шк., 1980. — 208 с.

279. Украинец Н.А. Оценка надежности водопроводных сетей // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 9. – Иркутск, 1976. — С. 69–75.

280. Україна з космосу. Атлас дешифрованих знімків території України з космічних апаратів. 2-е вид. / Під ред. В.І. Лялька та О.Д. Федоровського. — К.: НАН України, 1999. — 34 с.

281. Устройство для аэрации водоемов: А.с. 1561930 сССР, МКИ 5 А 01 К 63/04 / Петросов В.А. (СССР). — №4465113/30–13; Заявлено 05.05.88; Опубл. 07.05.90, Бюл. № 17. — 6 с.

282. Устройство для измерения биолюминесценции и химлюминесценции: А.с. №1549317 СССР, G 01 N 21/76 / Кобылянский В.Я., Агаджанов Г.К., Верниченко А.А. (СССР). — №4333671/24-25; Заявлено 27.11.87; Зарегистр. 08.11.89. — 6 с.

283. Устройство для отключения участка водовода: А.с. №1142606 СССР, МКИ Е 03 В 7/00 / Петросов В.А., Абрамович И.А., Невзоров М.М., Нестеров Ю.В., Ситницкая Э.А. (СССР). — 3567227/23–26; Заявлено 24.03.83; Опубл. 28.02.85, Бюл. №8. — 4 с.

284. Устройство комплектное на основе автономных инверторов мощность 500 кВт для частотно-регулируемых электроприводов в серии ПЧТ ИЖКШ 656433.003–02 ТЭО. НПО «ХЭМЗ». — Харьков, 1986. — С. 58.

285. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем. — М.: Наука, 1966. — 622 с.

286. Ферстер Э., Ренц Б. Методы корреляционного и регрессионного анализа: Пер. с англ. — М.: Финансы и статистика, 1983. — 302 с.

287. Фирсанов В.М. Архитектура гражданских зданий в условиях жаркого климата. – М.: Высш. шк., 1982. — 248 с.

288. Фихтенгольц Г.М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т.III. — М.: Наука, 1970. — 656 с.

289. Фокс Д.А. Гидравлический анализ неустановившегося течения в трубопроводах. — М.: Энергия, 1981.– 247 с.

290. Хан Г., Шапиро С. Статистические модели в инженерных задачах: Пер. с англ. — М.: Мир, 1969. — 395 с.

291. Хоружий П.Д. Интенсификация работы систем подачи и распределения воды: Автореф. дис... докт. техн. наук: 05.23.04.– Л.: ЛИСИ, 1988. — 47 с.

292. Хоружий П.Д., Ткачук А.А. Определение гидравлических характеристик действующих трубопроводов: Экспресс-информ. — М.: Изд. Минводхоза СССР. Сер. 3. Вып. 5. — С. 9–15.

293. Хоружий П.Д., Ткачук А.А., Батрак П.И. Эксплуатация систем водоснабжения и канализации: Справочник. — К.: Будівельник, 1993. — 232 с.

294. Хоружий П.Д., Шарков М.В. Реконструкция систем водоснабжения: Проектирование и расчеты. — К.: Будівельник, 1983. — 144 с.

295. Храменков С.В. Московский водопровод и канализация в XXI веке // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — №9. — С. 2–5.

296. Храменков С.В., Воронова Е.Ю. Потери воды от источника до крана // Водоснабжение и санитарная техника. — 2000. — №11. — С. 20–22.

297. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей. — М.: ТИМР, 2000. — 179 с.

298. Храменков С.В., Синицын М.И., Матвеев Ю.П. Пути повышения надежности водопроводных систем // Жилищно-коммунальное хозяйство. — 1991. — №3. — С. 26– 28.

299. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. — М.: Финансы и статистика, 1998. — 288 с.

300. Чебанов В.Б. Построение АСУ режимами работы насосных станций //Тез. докл. Четвертого междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М., 2000. — С. 444–446.

301. Червякова Т.Б., Петросов В.А., Щеглов В.А. Опыт прогнозирования азотсодержащих веществ в воде водоема // Сб. науч. тр. Харьк. мед. ин-та «Гигиена внешней и производственной среды». — Харьков: ХМИ, 1982. — С. 57–58.

302. Чимекин Я.Г., Клюев В.И., Сандор А.С. Теория автоматизированного электропривода. — М.: Энергия, 1979. — 616 с.

303. Чиняев И.А. Лопастные насосы: Справочное пособие. — Л.: Машиностроение, 1973. — 184 с.

304. Чистякова С.Б. Охрана окружающей среды. — М.: Стройиздат, 1988. — 268 с.

305. Чупин В.Р. Оптимизация развивающихся систем подачи и распределения воды: Автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.04. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1991. — 42 с.

306. Шевелев А.Ф. Исследование эксплуатационных свойств стеклянных трубопроводов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04. — М.: ВНИИ ВОДГЕО, 1977. — 23 с.

307. Шевелев А.Ф. Формулы для расчета водопроводных труб // Водоснабжение и санитарная техника. — 1983. — №3. — С. 25–26.

308. Шевелев Ф.А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. — М: Госиздат лит. по строительству и архитектуре, 1953. — 204 с.

309. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных, асбестоцементных, пластмассовых и стеклянных водопроводных труб. 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Стройиздат, 1973. — 112 с.

310. Шевелев Ф.А., Орлов Г.А. Водоснабжение больших городов зарубежных стран. – М.: Стройиздат, 1987. — 351 с.

311. Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справочное пособие. — М.: Стройиздат, 1984. — 111 с.

312. Шевченко М.А., Таран П.Н., Гончарук В.В. Очистка природных и сточных вод от пестицидов. — Л.: Химия, 1989. — 184 с.

313. Шеренков И.А. Прикладные плановые задачи гидравлики спокойных потоков. — М.: Энергия, 1978. — 240 с.

314. Шикломанов И. Глобальные изменения климата // Курьер ЮНЕСКО, июль 1993. — С. 29–31.

315. Шкроб М.С., Вихрев В.Ф. Водоподготовка. — М.: Энергия, 1973. — 416 с.

316. Шуберт С.А., Орлов Г.А., Антонова О.Я. Проблемы повышения надежности систем хозяйственно-питьевого водоснабжения // Водоснабжение и санитарная техника. — 1993. — №4. — С. 2–5.

317. Шушкевич Е.В. Повышение надежности системы водоснабжения в г. Москве // Водоснабжение и санитарная техника. — 1999. — №9. — С. 21–23.

318. Эгильский И.С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами подачи и распределения воды. — Л.: Стройиздат, 1988. – 216 с.

319. Экология города / Под ред. Ф.В. Стольберга. – К.: Либра, 2000. — 464 с.

320. Электропривод переменного типа с индукторной муфтой скольжения. ТО 08.99.04.-69. — М.: Информэлектро, 1969. — 18 с.

321. Юдин М.Ю. Опыт создания и эксплуатации модели системы подачи и распределения воды Санкт-Петербурга // Тез. докл. Четвертого Междунар. конгр. «Вода: экология и технология» (ЭКВАТЭК-2000). — М., 2000. — С. 800–801.

322. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. — Л.: Энергия, 1975. — 416 с.

323. Яковлев С.В. Технологические проблемы очистки природных и сточных вод // Сб. докл. Междунар. конгр. «Экология, технология, экономика водоснабжения и канализации» (ЭТЭВК-99). — Ялта, 1999. — С. 7–8.

324. Яншин А.Л. Потепление климата и другие глобальные экологические проблемы на пороге XXI века // Экология и жизнь. — 2001. — №1(18). — С. 42–43.

325. 21st International Water Supply Congress and Exhibition Reports. — Madrid, 1997. — 1336 p.

326. Analytical methods: Trihalomethanes. Fed. Reg. (Aug. 1993). — USEPA, 1993.

327. Arnell N. Global warming, river flows, and water resources. — Chichester, England: John Wiley & Sons, 1996. — 254 p.

328. Colebrook G.F., White C.M. Experiments with fluid friction in roughened pipes // Proc. Royal Soc. Lond ser. A. — 1937. — Vol. 161, №906.

329. Conway R.A. Enviromental risk analysis of chemicals. — New York: Van Nostrand Reinhold, 1981. — 23 p.

330. Water Treatment Handbook, Vol. 1, 2., Sixth Edition, Degremont, 1991. — 1459 p.

331. Mutschman J., Stimmlmayr F. Taschenbuch der Wasserversorgung, 1999. — 315 p.

332. Drinking water and health. — Washington, DC: National Academy Press, 1977. – Vol. 1. – P. 793–856.

333. Gleick P. Regional hydrologic consequences of increases in atmospheric carbon dioxide and other trace gases // Climatic Change. — 1987. — Vol. 10. — №2. — P. 137–148.

334. Gleick P.H. Climate change, hydrology, and water resources //Rev. Geophysics. — 1989. — Vol. 27. — №2. — P. 329 — 341.

335. Manual of British water engineering practice. — Inst. Water Engineers, 1961. — 117 p.

336. Internal corrosion of water distribution systems. — New York: AWWA, 1996. — 586 p.

337. IPCC. Climate Change 1995: Impacts, Adaptations, and Mitigation of Climate Change: Scientifical-Technical Analyses. Contribution of Working Group 2 to Intergovernmental Panel on Climate Change, Chapters 10 and 14. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1996.

338. IPCC. Climate Change 1995: The Science of Climate Change. Contribution of Working Group 1 to Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1990.

339. IPCC. Climate Change: The IPCC Scientific Assessment. Rept. of Working Group 1 to Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, England, 1990.

340. Reports of Second World Climate Conference. — Geneva, 1991. — 445 p.

341. De Zuane J. Handbook of Drinking Water Quality, 2nd edition. — New York: John Wiley & Sons, 1997. — 575 p.

342. Krascal J.B. On the shortest spanning subtree of a graph and travelling salesman problem // Proc. Amer. Soc. — 1956. — P. 48–50.

343. Lamont P.A. Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness // Journal AWWA. — 1981. — Vol. 5. — P. 39–51.

344. Lamont P.A. Formulas for Pipeline Calculations //Int. Water Supply Congress Reports. — 1983. — P. 1952–1955.

345. Mays L.W. Hydraulic Design Handbook. — New York: McGRAW-Hill, 1999. — 1320 p.

346. Lettenmaier D.P., Gan T.Y. Hydrologic sensitivities of the Sacramento–San Joaquin river basin, Calif., to global warming // Water Resources Res. — 1990. – Vol. 26, №1. — P. 69.

347. Meehl G.A., Branstator G.W., Washington W.M. Tropic pacific interannual variability and CO2 climate change // Jour. Climate. — 1993. — Vol.6. — P. 42.

348. Mimikou M.A., Kouvopoulos Y.S. Regional Climate Change Impacts. I: Impacts on Water Resources // Hydrolog. Sci. Jour. — 1991. — Vol. 36. №3. — P. 247.

349. Munn R.E. Global Environment Monitoring System //SCOPE Report. — 1973. – №3. — 130 p.

350. Nash L, Gleick P. The Colorado River Basin and Climatic Change: The Sensitivity of Stream Flow and Water Supply to Variations in Temperature and Precipitation. EPA/230/R-93/009, Washington, 1993.

351. Drinking water and health. — Washington, DC: National Academy Press, 1977. – Vol. 3. — P. 5–66.

352. National Primary Drinking Water Regulations; Radionuclides; Proposed Rule. Fed. Reg. (July 18, 1991). Notice of Correction to Proposed Rule. Fed. Reg. (Sep. 3, 1991). Notice of Extension. Fed. Reg. (Oct. 18, 1991). — USEPA, 1991.

353. Noda A., Tokioka T. The Effect of doubling the $CO_2$ concentration on convective and nonconvective precipitation in a general circulation model with a simple mixed-layer ocean // Jour. Meteorol. Soc. Japan. — 1989. — Vol. 67. — P. 1055 – 1072.

354. Proposed Guidelines for Carcinogen Risk Assessment Request Comments. Fed. Reg. – USEPA, 1984. — Vol. 4, №7.

355. Rind D. Potential evapotranspiration and the likelihood of future drought // Jour. Geophys. Rev. — 1990 . — Vol. 95. — P. 9983.

356. Harberg R.J. Planning and managing reliable urban water systems. — New York: AWWA, 1997. — 237 p.

357. Schneider S.H., Gleick P.H., Mearns L. Prospects for Climate Change. Climate Change and US Water Resources. — New York: John Wiley & Sons, 1990.

358. Steel E.W., McGhee T.J. Water Supply and Sewerage, Fifth Edition. — Formerly University of Texas, Tulane University: McGRAW-Hill, 1979. — 665 p.

359. Sucumu Kawamura. Integrated Design and Operation of Water Treatment Facilities. – New York: John Wiley & Sons, 2000. — 683 p.

360. Tokioka T. A transient $CO_2$ experiment with the MRI CGCM — Quick Report // Jour. Meteorolog. Soc. Japan. — 1995. — Vol. 74. — P. 817.

361. Васильев Н.В., Мальцев В.И., Коваленко В.Н., Шубик В.М., Москаленко В.Ф., Волянский Ю.Л., Коляда Т.И., Пономаренко В.М., Парамонов З.М. Медико-социальные последствия ядерных катастроф (Семипалатинск — Алтай, Южный Урал, полигон «Северный — Новая Земля», Чернобыль). К: «Здоровье», 1999, 296 с.

362. Water Supply and Sewerage, Fifth, Edition E.W. Steel, Formerly University of Texas, Terence J. McGhee. Tulane University, 665 p.

363. Degremont Water Treatment Handbook, Volume 1; 2; Sixth Edition, 1991, 1459 p.

364. American Water Works Association Journal, March 1994 — August 1999.

365. 21st International Water Supply Congress and Exhibition, Madrid, 20-26 September, 1997.

366. Handbook of Drinking Water Quality, 2nd Edition, John De Zuane. P.E., 1997, 575 p.

367. Петросов В.А., Агаджанов Г.К., Кобылянский В.Я., Хомяков Г.В. Биотестирование в системе процесса биоочистки воды // Микробиология и биотехнология очистки воды. К: Знание, 1989. — С. 36-37.

368. Информационно-графические компьютерные технологии управления инженерными сетями предприятий, городов и регионов / Под редакцией Н.И.Самойленко. — Златоуст: Челябинский Дом печати, 1996. — 232 с.

Валерій Альбертович Петросов

**СТІЙКІСТЬ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

*Російською мовою*

Коректори *Г. Висоцька, А. Клейменова,*
*В. Ніколаєнко, Л. Півкач*
Набір *С. Фролова*
Комп'ютерна верстка *О. Лиханський, Р. Громов, С. Северин*

Підписано до друку 30.11.2007. Формат 60x84 1/8. Умов. друк. арк. 41,85.
Друк офсетний. Тираж 1000 прим. Зам. №

Видавничий будинок «Фактор»,
вул. Сумська, 106а, Харків, 61002.
Тел.: (057) 714-37-28, 714-37-29.

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої
справи до Державного реєстру видавців, виготівників
і розповсюджувачів видавничої продукції
від 14.09.2001 р., серія ДК № 597.

Надруковано в друкарні «Фактор-Друк»,
вул. Саратовська, 51, Харків, 61030.
Тел.: (057) 717-51-85, 717-53-55.

ISBN 978-966-312-749-1

© Видавничий будинок «Фактор», 2007