

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.

Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения

Содержание

СОДЕРЖАНИЕ

Введение ...4

Глава 1 Обзор литературы...8

Глава 2 Особенности напорных трубопроводных систем водоотведения... 23

2.1 Напорные трубопроводы в системах водоотведения...23

2.2 Особенности перекачиваемой в водоотведении жидкости ...26

2.3 Основные показатели потока сточных вод...32

2.4 Выводы по главе 2 ...41

Глава 3 Гидравлический удар в напорных трубопроводах водоотведения.. 42

3.1 Скорость распространения волны гидравлического удара при транспортировании сточных вод...42

3.1.1 Определение скорости распространения волны гидравлического удара в многофазном напорном потоке...42

3.1.2 Расчет скорости распространения ударного импульса в напорном потоке сточных вод...51

3.1.3 Исследование уравнений ...54

3.2 Определение давления гидравлического удара в напорных трубопроводах, перекачивающих сточные воды...61

3.2.1 Дифференциальные уравнения неустановившегося напорного течения жидкости...61

3.2.2 Начальные и граничные условия для проведения расчетов.. .68

3.2.3 Учет разрывов сплошности потока...71

3.2.4 Проведение расчета на ЭВМ ...74

3.2.5 Результаты расчетов ...78

3.3 Выводы по главе 3 ...83

Глава 4 Защита напорных трубопроводов водоотведения от гидравлических ударов ...85

4.1 Основные способы уменьшения резких повышений давления в напорных системах водоотведения ...86

4.2 Гашение гидравлических ударов с помощью демпфирующих элементов...90

3

4.3 Впуск воздуха как способ противоударной защиты напорных водоотводящих трубопроводов ...97

4.4 Использование гасителей гидравлических ударов дифференциального действия...102

4.4.1 Конструкция и принцип работы усовершенствованного гасителя гидравлических ударов для загрязненных жидкостей ...102

4.4.2 Расчет основных элементов гасителя...106

4.5 Экономическая эффективность использования противоударных устройств

в системах водоотведения...115
4.6 Выводы по главе 4 ...123
Общие выводы ...125
Список литературы...127
Приложение! ...140
Приложение II ...148
Приложение III ...151

Введение

ВВЕДЕНИЕ

Рост городов и развитие промышленности постоянно требуют решения вопроса об отводе и очистке стоков, образующихся в процессе производства и жизнедеятельности людей. Водоотводящие сети имеют большую протяженность и обычно устраиваются самотечными. Но отвести стоки к очистным сооружениям, обеспечить их подачу на требуемую высоту, большие расстояния или выпуск в водоем самотеком в системах водоотведения населенных пунктов и промышленных предприятий удается не всегда. Поэтому часто возникает необходимость перекачки сточных вод насосными станциями, которые по напорным линиям транспортируют стоки в заданные места и на требуемые высоты.

Таким образом, напорные трубопроводы являются важным рабочим звеном в обеспечении эффективной работы всей водоотводящей системы. От надежного функционирования этих линейных участков во многом зависит состояние окружающей среды, развитие промышленности и инфраструктуры населенных пунктов.

Резкие повышения давления в таких системах могут приводить к авариям, которые усугубляются возможностью загрязнения окружающей среды сточными водами. Чтобы обеспечить надежную работу данных сооружений, как на стадии проектирования, так и в процессе эксплуатации необходимо проведение соответствующих расчетов трубопровода на гидравлический удар. От точности проведения таких расчетов во многом зависит выбор наиболее эффективных средств противоударной защиты и материала труб.

В настоящее время нашими и зарубежными исследователями накоплен большой объем знаний по расчету гидравлического удара и методам защиты от него напорных трубопроводных систем водоснабжения, гидроэнергетики, мелиорации, горнодобывающей промышленности, для систем транспортирования нефти, различных гидросмесей, для трубопроводов химической промышленности. Однако исследования гидравлических ударов в напорных потоках сточных вод по нашим данным до сего времени вообще не

5

проводились, поскольку полагалось, что процессы, происходящие в сточной жидкости, аналогичны тем, что возникают в обычной водопроводной воде. Между тем защита напорных систем водоотведения от гидравлических ударов имеет ряд особенностей, а расчет систем водоотведения особенно промышленных стоков существенно отличается от аналогичных расчетов при

перекачке обычной чистой воды. Поэтому исследование гидродинамических параметров напорного потока сточных вод при возникновении в трубопроводе нестационарных режимов, а также выработка рекомендаций по защите таких систем от гидравлических ударов являются достаточно актуальными.

В связи с этим целью данной диссертационной работы является теоретическое исследование явления гидравлического удара в сточных водах, разработка методики расчета параметров такого потока при возникновении нестационарных режимов течения, а также выработка основных рекомендаций по противоударной защите рассматриваемых напорных систем.

Для достижения указанной цели были поставлены и решены следующие основные задачи:

- Проанализировать накопленный объем знаний по расчету гидравлического удара и методам защиты от него для различных трубопроводных систем.
- Выявить и описать особенности напорных систем водоотведения, которые могут влиять на величину колебания давления при гидравлическом ударе.
- Предложить методику и разработать алгоритм расчета параметров неустановившегося напорного течения сточной жидкости по напорным трубопроводам с учетом особенностей рассматриваемых напорных систем.
- Дать рекомендации по выбору и использованию противоударных мер и средств для защиты напорных трубопроводных систем водоотведения от гидравлических ударов.

6 Решение указанных задач в работе осуществлялось путем теоретического исследования явления гидравлического удара в загрязненных жидкостях, опираясь на обширный теоретический и экспериментальный материал, накопленный по данному вопросу для других напорных трубопроводных систем. В процессе исследования аналитическими методами проводилось сравнение, где это было возможно, полученных результатов расчета с опытными данными, приводимыми в материалах экспериментальных исследований.

Научная новизна работы состоит в том, что ввиду отсутствия исследований нестационарных режимов течения сточной жидкости в данной работе изложены основные принципы расчета гидравлического удара в напорных трубопроводах водоотведения с учетом особенностей как самих трубопроводных систем, так и характеристик транспортируемой по ним жидкости.

На основе проведенных исследований в работе даны рекомендации по организации противоударной защиты напорных трубопроводов водоотведения, а также предложена конструкция гасителя гидравлического удара, адаптированная к условиям работы на загрязненных жидкостях.

Практическая ценность и реализация результатов исследований. Предлагаемая методика расчета гидравлического удара в напорных трубопроводах водоотведения позволяет определять гидродинамические параметры потока сточных вод с учетом его неонородности и особенностей продольного профиля магистрали, что в свою очередь дает возможность более правильно подбирать и рассчитывать противоударные устройства для таких систем, а, следовательно, способствует предупреждению случаев возникновения нестационарных режимов течения в трубопроводах и тем самым увеличивает надежность их работы.

Результаты исследований были использованы при проведении расчетов нестационарных течений и назначении противоударных мероприятий для канализационной напорной линии ст.Кузнецкое Октябрьской железной дороги. Разработанная программа расчета, кроме практических расчетов,

7

также используется в учебном процессе на кафедре «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» Петербургского государственного университета путей сообщения.

В соответствии с поставленными задачами была определена структура данной диссертационной работы, которая включает в себя введение, четыре главы, общие выводы и перечень использованной литературы.

В первой главе приводится краткий обзор наиболее важных работ, посвященных исследованию явления гидравлического удара в различных напорных потоках и противоударных мер и средств, используемых для защиты таких трубопроводов.

Вторая глава посвящена описанию особенностей напорных систем водоотведения, которые могут влиять на величину колебания давления при гидравлическом ударе, с целью их учета при составлении математической модели, описывающей рассматриваемый нестационарный процесс. В третьей главе даны основные принципы и алгоритм расчета гидравлического удара с учетом особенностей как самих трубопроводных систем водоотведения, так и транспортируемой по ним жидкости.

Четвертая глава диссертации посвящена основным средствам защиты, которые можно использовать с целью предотвращения возникновения резких повышений давления в напорных системах водоотведения. Здесь же приводится конструкция и принципы расчета гасителя гидравлических ударов, предлагаемого к использованию в системах водоотведения. Такое устройство может снижать гидравлические удары, начинающиеся как с волны повышения, так и понижения давления в системе, а его конструкция адаптирована к условиям работы на загрязненных жидкостях. В диссертации также выполнены расчеты экономической эффективности использования противоударной защиты.

ГЛАВА 1 ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

На сегодняшний день для напорных водоотводящих систем наиболее изученными являются стационарные режимы течения стоков. Но с точки зрения обеспечения надежности их работы, важно не только правильно рассчитать и назначить размеры таких трубопроводов, но и уметь просчитать параметры системы при возникновении нестационарных режимов течения.

В настоящее время работы, посвященные как экспериментальному, так и теоретическому исследованию неустановившегося напорного течения сточной жидкости, практически отсутствуют. Поэтому в данной главе даны краткие сведения о тех основных публикациях, которые затрагивают принципиальные моменты теории гидравлического удара и могут быть использованы для исследования резких колебаний давления в канализационных напорных трубопроводах.

Впервые задача гидравлического удара в идеальной жидкости была решена выдающимся русским ученым Н.Е. Жуковским [48]. Им в 1898 году было выполнено классическое исследование этого явления и разработана теория

напорного неустановившегося движения идеальной упругой жидкости в трубопроводе, являющейся до сих пор основой всех других исследований гидравлического удара.

Одной из основных характеристик гидравлического удара является скорость распространения волны изменения давления C . Для определения этой величины часто используют формулу Д.Кортевега, предложенную для расчетов ещё Н.Е.Жуковским, которая учитывает как упругие свойства воды, так и упругость материала стенок труб.

В реальной жидкости почти всегда присутствуют нерастворенные газы, и поскольку скорость звука зависит от модуля объемной деформации жидкости, то скорость C может сильно отличаться от вычисленной по формуле Кортевега. На это впервые указал еще сам Н.Е. Жуковский [48], он

9

даже рассматривал впуск воздуха в трубопровод, как возможное противоударное средство.

По данным более поздних исследований [44, 50, 124] скорость звука, например, в реальных водоводах может быть в 1,5 - 2,5 раза меньше вычисленной по формуле Кортевега-Жуковского. А между тем, при определении мест разрывов сплошности потока [124] и размеров противоударных средств исключительно важно иметь данные не только о максимальной, но также о минимальной величине скорости распространения ударной волны.

Имеется целый ряд работ непосредственно посвященных определению скорости распространения волны гидравлического удара в газожидкостных смесях. Этому вопросу посвятили свои исследования Ю.С.Девдариани и Т.Б.Лунякина, Б.Л.Буниатян и З.А.Зорян, Г.Блинд, В.Н.Дектярев и другие. Но формулы для определения C , предложенные этими авторами, плохо подтверждаются опытами [37], по-видимому, в них не учтено влияние изменения давления в процессе гидравлического удара на объемную концентрацию воздуха в жидкости.

В этом плане исследования, проведенные В.С.Дикаревским и А.А.Маркиным [44] свидетельствуют о том, что наиболее значительное влияние на скорость распространения волны гидравлического удара оказывают газосодержание потока и статическое давление в стационарном режиме.

По данным этих исследований [37] даже при небольшом газосодержании скорость C резко уменьшается, особенно при небольших значениях давления. Такое влияние объясняется тем, что объем, занимаемый газами, существенно изменяется в зависимости от давления, а, следовательно, изменяется и масса в том или ином рассматриваемом отсеке. Влияние изменения скорости потока на величину C в газожидкостной смеси, как правило, небольшое, особенно при больших газосодержаниях. При увеличении изменения скорости течения жидкости скорость распространения ударной волны незначительно увеличивается. Изменение отношения диаметра

10

трубопровода к толщине его стенки оказывает меньшее влияние на скорость распространения волны гидравлического удара по сравнению с влиянием газосодержания и статического давления. При увеличении этого отношения скорость C уменьшается.

На основании проведенных опытов В.С.Дикаревским предложена формула для определения величины С с учетом газосодержания и сжатия газа при гидравлическом ударе по адиабатическому закону, а также с учетом упругого отпора грунта [37]. Влияние продольных напряжений в закрепленных трубах на скорость С по данным его исследований не велико и не имеет практического значения.

Факт зависимости величины С от параметров установившегося режима (давления, скорости и газосодержания) также был подтвержден исследованиями Н.Г.Зубковой [50, 51]. Ей же отмечен факт изменения скорости распространения ударного импульса для газожидкостного потока по длине трубопровода.

В работах В.М.Алышева [1, 2] рассматривается вопрос о величине скорости распространения волны гидравлического удара в многофазных системах, т.е. с учетом наличия в жидкости газообразной и твердой фаз. Им предложена формула для определения скорости С для трехфазного потока с учетом процессов выделения растворенного в жидкости газа.

В.М.Алышевым подтверждается гипотеза о политропическом изменении сжатия-расширения пузырьков газа при неустановившемся напорном движении газожидкостного потока. Последующие исследования совместно с Е.В.Гладковой [25] были посвящены изучению возможности использования адиабаты Гюгонио для описания сжатия газа при гидравлическом ударе. По результатам экспериментов определения величины С для водовоздушного потока Е.В.Гладковой предложен эмпирический коэффициент, учитывающий частичное растворение воздуха, схлопывания пузырьков или уменьшение их размеров при сжатии, что повышает точность расчетов при использовании адиабаты Гюгонио для газового компонента. Но,

как отмечается в работе [25], эти уточнения справедливы только при определенных значениях параметров установившегося режима.

Наиболее подробные исследования гидравлического удара в трехфазном напорном потоке были проведены А.Г.Джваршишвили [34, 36], Г.И.Кирмешвили [62], В.О.Токмаджяном [123] и др. Ими подтверждено значительное снижение скорости распространения волны гидравлического удара при ничтожных газосодержаниях, выведены уравнения для вычисления скорости С и зависимости, определяющие ее изменение.

Дальнейшие исследования Г.И.Кирмешвили и Л.И.Махарадзе [80, 81, 64] позволили установить качественный характер влияния на величину С таких важных факторов, как: закономерность изменения концентрации свободного воздуха по длине трубопроводной магистрали в зависимости от изменения давления при гидравлическом ударе; крупность, неоднородность твердого материала и их влияние на характер колебательного процесса; неравномерный гидроабразивный износ трубопровода по окружности и по длине; угол наклона трубопровода к горизонту и др. С учетом этого Г.И.Кирмешвили [64] для исследованных систем предложены соответствующие формулы для определения скорости распространения волны изменения давления в многофазном напорном потоке, но без учета его многокомпонентности и при наличии в нем только отдельных видов твердых сыпучих материалов.

После Н.Е. Жуковского интенсивное развитие теория гидравлического удара получила уже в нашем веке. Разрабатывались различные приемы расчета

гидравлического удара с учетом потерь напора. Это в первую очередь графические методы, разработанные и усовершенствованные Л.Бержероном [12], О.Шнидером [140], С.Ягером [138], А.А.Суриным [113], М.М.Андрияшевым [4] и многими др. Такие способы расчета в своё время, несомненно, сыграли важную роль, но в связи с широким использованием вычислительной техники при расчетах они применяются редко ввиду их сложности и громоздкости.

12

Некоторым промежуточным звеном являются разработанные графоаналитические методы расчета гидравлического удара. Главное их преимущество в простоте расчетов.

Простой способ расчета предложен в частности В.М.Папиным [95, 96]. Максимальный напор при отрицательном гидравлическом ударе определяется с учетом инерции агрегата и профиля водовода. Использование этого метода сужается из-за невозможности его применения при гидравлическом ударе с разрывом сплошности потока и трудности определения в некоторых случаях эмпирических коэффициентов, входящих в предлагаемую зависимость.

Для насосов с малой инерцией движущихся масс с достаточной точностью можно использовать «метод пересекающихся характеристик», предложенный В.С.Дикаревским [37]. В результате совместного решения уравнения (характеристики) источника возмущения потока — насоса или крана и уравнения (характеристики) неустановившегося движения жидкости можно определить напор при гидравлическом ударе, вызванный быстрым открытием крана или пуском насоса.

Наибольшее развитие в теории гидравлического удара получили аналитические способы расчета. Л.Аллиеви [137] исследовал гидравлический удар в простом трубопроводе (т.е. имеющем постоянный диаметр и постоянную скорость распространения ударных волн). Используя общий интеграл дифференциальных уравнений неустановившегося напорного движения Н.Е.Жуковского, он вывел уравнения гидравлического удара в конечных разностях, получившие в дальнейшем название цепных уравнений Л.Аллиеви, которые в последующем были использованы многими исследователями при расчетах гидравлического удара.

Позднее были разработаны такие методы интегрирования дифференциальных уравнений неустановившегося движения с учетом потерь напора, как:

- метод контурного интегрирования И.А.Чарного [130],
- метод арифметического интегрирования А.А.Сурина [113],

13

- классический метод Фурье, примененный в работах Д.Н.Смирного и Л.Б.Зубова [107],
- метод пассивных четырехполюсников в работе Гризодуба [32],
- локальный метод, использованный в работе Т.Б.Лунякиной [71],
- операционный метод Ф.М.Вуда [144], А.И.Лурье [73], Г.Л.Долидзе [46] и др.

Перечисленные методы интегрирования имеют свои плюсы и минусы, и с допустимым приближением использовались многими исследователями для решения задач гидравлического удара.

Существенный вклад в развитие теории гидравлического удара внес

Л.Ф.Мошнин, под руководством которого в институте ВНИИ ВОДГЕО велись исследования данного явления. По результатам проведенной работы Л.Ф.Мошниным в совместно написанных работах с Е.Т.Тимофеевой и Л.А.Обуховым [124, 92] приводится методика расчета гидравлического удара для напорных трубопроводов водоснабжения. Это один из первых обширных трудов по данной теме и в дальнейшем ученые в своих исследованиях опирались на него. Здесь приведено большое количество примеров расчета различных случаев гидравлического удара графическим и аналитическим способами, но сопровождающихся понижением давления в трубе только до атмосферного. Такая особенность расчета основана на допущении, что при понижении давления ниже атмосферного в системе срабатывает вантуз, который будет поддерживать постоянное давление в системе равным атмосферному. Однако это допущение вызывает определенные сомнения [57], поскольку предвидеть точное место установки вантзуза в этом случае затруднительно, кроме этого, механизм любого вантзуза обладает определенной инертностью и достаточно быстро впустить воздух в трубопровод не сможет, а также в определенных случаях установка вантзуза на трубопроводе невозможна. Как отмечается в работе [57], при возможности образования в трубах вакуума рациональнее вначале произвести расчет трубопровода именно с учетом этого явления, а затем решать вопрос о защите

14

водовода от недопустимого повышения или понижения давления при гидравлическом ударе.

Поэтому метод, предложенный этими авторами, можно рассматривать только как приближенный, особенно в случае гидравлического удара с разрывом сплошности потока.

Наибольшую популярность среди аналитических способов расчета гидравлического удара получил метод «характеристик», основы которого были заложены еще в работе Н.Е.Жуковского [48].

Впервые, опираясь на труды Н.Е. Жуковского и А.Н.Христиановича, практически применил метод «характеристик» к расчету гидравлического удара Н.Т.Мелещенко [82]. Впоследствии этот метод был развит и усовершенствован М.А.Мостковым [90], К.Г.Асатуром [6, 7], И.П.Гинзбургом и А.А.Грибом [24], Н.А.Картвелишвили [59], Г.М.Мелконяном [83, 84] и многими другими.

За рубежом наибольшей известностью в этой области пользуются труды В.Стрите́ра [112, 141-143] и Д.Фокса [127]. В.Стрите́ром на основе метода «характеристик» разработана методика расчета гидравлического удара на ЭВМ. В настоящее время, как отмечается в литературе [139], разработки В.Стрите́ра лежат в основе наиболее популярной сейчас за рубежом программы расчета гидравлического удара на ЭВМ «WatHam».

В нашей стране использование метода «характеристик» для моделирования на ЭВМ переходных процессов в напорных системах занимался К.П.Вишневский [17, 53, 54]. Им процесс гидравлического удара по методике, разработанной во ВНИИ ВОДГЕО, определяется взаимодействием волн давления, возникающих у насоса и отраженных в трубопроводе. Потери напора учитываются фиктивными диафрагмами, условно расставленными вдоль трубопровода. Эта методика позволяет также подобрать число и размеры противоударных средств.

Разработка алгоритмов программ для моделирования переходных процессов К.П.Вишневским [17] выполнена для сложных напорных систем с учетом возможности образования разрывов сплошности потока, наличием

15

гидравлических сопротивлений, особенностей структуры насосных систем водоснабжения (насосов, трубопроводов, арматуры и т.п.). Однако все расчеты гидравлического удара адаптированы для напорных систем водоснабжения хозяйствственно-питьевого назначения.

Кроме К.П.Вишневского использованию метода «характеристик» для расчета гидравлического удара на ЭВМ посвящены работы Б.Ф.Лямаева [74-76]. В работе [74] им подробным образом описан процесс моделирования неустановившегося течения жидкости в сложных трубопроводных системах, транспортирующих чистую воду. Здесь же рассматриваются подходы к описанию данного явления при необходимости учета разрывов сплошности потока, нестационарного трения, изменения газосодержания и других параметров. Большое внимание здесь так жеделено способу систематизации исходных данных с помощью координатной сетки, который позволяет наиболее простым способом записать все исходные данные по всем участкам большой и разветвленной сети.

Совместная работа [76] является дальнейшим развитием метода «характеристик» для расчета гидравлического удара с помощью вычислительной техники. Здесь процесс ввода исходной информации для расчета гидравлического удара упрощается для пользователя путем использования геоинформационных систем. По указанной программе можно проводить многовариантные расчеты нестационарных режимов течения, но для напорных систем, транспортирующих незагрязненные воды.

Расчетам гидравлического удара в многофазных системах, в том числе и на ЭВМ, посвящены работы В.М.Алышева [79, 2]. Интегрирование дифференциальных уравнений неустановившегося напорного движения производится также по методу «характеристик». Учитывая работы В.Стритера, К.П.Вишневского, Г.И.Мелконяна и Б.Ф.Лямаева, В.М.Алышев использует метод расчета гидравлического удара, основанный на замене распределенных по длине потока параметров газа сосредоточенными в фиктивных воздушно-гидравлических колпаках (ФВГК), установленных на границах расчетных участков трубопроводов. Фиктивными упругими

16 элементами (ФУЭ) заменяется упругая деформация стенок трубопровода, а

упругая деформация твердой взвеси моделируется фиктивными упругими элементами твердой взвеси (ФУЭТВ). Но подобных экспериментальных исследований с учетом твердой составляющей, подтверждающих используемый метод в работе не приводится.

Особую сложность в плане расчетов представляют собой гидравлические удары, сопровождающиеся разрывом сплошности потока. Это явление продолжает оставаться на данный момент еще не до конца изученным, поэтому труды многих ученых посвящены экспериментальным и теоретическим исследованиям нестационарных процессов с разрывом колонны жидкости.

Впервые подробно изучал гидравлические удары с разрывами сплошности потока и получил первые расчетные формулы для таких случаев А.Ф.Мостовский

[91]. Впоследствии разработке этого вопроса большое внимание уделяли А.А.Сурин [113], Л.Бержерон [12], Л.Ф.Мошнин [124], Н.А.Картвелишвили [5, 59], М.М.Андрияшев [4], В.С.Дикаревский [37], К.П.Вишневский [17], Б.Ф.Лямаев [74], В.И.Блохин [14, 15], Э.П.Ашиянц [8], Л.С.Геращенко [22], В.Н.Коваленко [65] и многие другие.

Наиболее подробное экспериментальное и теоретическое изучение гидравлических ударов с разрывами сплошности потока в водоводах выполнено во ВНИИ ВОДГЕО Д.Н.Смирновым и Л.Б.Зубовым [107]. В результате проведенных исследований ими описаны основные закономерности разрыва колонны , жидкости и получены сравнительно простые расчетные зависимости.

В указанных выше работах даны методы определения максимальных напоров после разрывов сплошности потока. Однако результаты расчетов по этим методам нередко противоречивы. Кроме этого, недостаточно выяснены условия, при которых образуются максимальные напоры, мало исследовано влияние потерь напора, вакуума, характера и продолжительности регулирования потока и других факторов на величину максимального напора.

17

Исследованием гидравлического удара с разрывом сплошности потока и без него занимался В.С.Дикаревский [37]. В его работах подробно освещен вопрос влияния величины вакуума на ход всего процесса гидравлического удара. Аналитически и на основе экспериментальных данных ученый доказывает, что в горизонтальном трубопроводе разрыв сплошности потока происходит в основном у регулирующего органа, а кавитационные явления по длине трубопровода проявляются только в виде мелких пузырьков, влияние которых на процесс гидравлического удара незначительно. В результате исследований ученым были получены аналитические зависимости для гидравлического удара с разрывом сплошности потока, учитывающие потери энергии, время регулирования потока и волновой характер самого явления. Однако исследования В.С.Дикаревского были проведены в основном для горизонтальных напорных трубопроводов и насосных агрегатов с малой инерцией движущихся масс.

Исследования Н.И.Колотило и др. [67, 68, 131], проведенные в Харьковском инженерно-строительном институте, посвящены изучению гидравлического удара с разрывом сплошности потока в промежуточной точке. Н.И.Колотило [67] аналитическим способом выведено условие образования разрыва сплошности потока в переломной точке трубопровода при понижении давления в этой точке ниже атмосферного. Результаты проведенных исследований показали, что место образования разрыва сплошности потока в переломной точке зависит, в первую очередь, от профиля трубопровода.

Изучением вопроса гидравлического удара с разрывом сплошности потока для газожидкостных потоков также занимался В.М.Алышев [2]. Для расчета неустановившегося напорного движения с учетом таких явлений им составлены соответствующие программы на ЭМВ, а влияние газа и твердой взвеси на нестационарный процесс учитывается скоростью распространения звука в воде.

В своей работе В.М.Алышев [2] приводит приближенный метод определения наибольшего разряжения при гидравлическом ударе. Им

