

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.

**МИНИСТЕРСТВО
ПРИРОДНЫХ РЕСУРСОВ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Гидрогеоэкологическая
научно-производственная
и проектная фирма "ГИДЭК"**



**ОПЫТНО-
МИГРАЦИОННЫЕ
РАБОТЫ**

**НА МЕСТОРОЖДЕНИЯХ
ПИТЬЕВЫХ ВОД**

Методические рекомендации

Москва - 1998

**Министерство природных ресурсов
Российской Федерации**

**Гидрогеоэкологическая научно-производственная
и проектная фирма «ГИДЭК»**

***Опытно-миграционные работы
на месторождениях питьевых вод
(методические рекомендации)***

**ГИДЭК
Москва -1998 г.**

**Опытно-миграционные работы на месторождениях
питьевых вод
(методические рекомендации).**

Разработчик:

Гидрогеоэкологическая научно-производственная и проектная
фирма ГИДЭК.

Санкт-Петербургский государственный горный институт
им. Г.В.Плеханова (технический университет).

Исполнители:

от СПГГИ: чл.-кор. РАН, д.г.-м.н., проф. МIRONENKO В.А.,
д.г.-м.н. Румынин В.Г.

от ГИДЭК: д.г.-м.н. Боровский Б.В.
к.г.-м.н. Ершов Г.Е.

Адрес: 105203, Россия, Москва, ул.15-я Парковая, 10А
АОЗТ "ГИДЭК"

Тел.: (095) 965-98 61 Факс: (095) 965-98 62

E-mail:hydec@glasnet.ru

© АОЗТ "ГИДЭК", 1998

ВВЕДЕНИЕ

Надёжность прогнозов качества подземных вод на водозаборах и границ поясов зоны их санитарной охраны определяется информационным обеспечением используемых гидрогеологических моделей месторождений [2]. Между тем, решение задач охраны подземных вод от загрязнения, эффективного управления их качеством и рационального использования неизменно сталкивается с хроническим дефицитом и недостаточной надёжностью исходной информации. Ключевое место в такой информации (наряду с данными о геофильтрационных параметрах пород, граничных условиях и балансе водоносных горизонтов) занимают сведения о механизмах и параметрах миграции подземных вод с учётом строения водоносных горизонтов на более детальном по сравнению с задачами геофильтрации уровне (мезо- и микроуровне). Получению этих сведений служат опытно-миграционные работы (ОМР) - комплекс полевых и лабораторных экспериментов и натурных наблюдений за миграцией компонентов в водовмещающей среде. С достаточной степенью условности в составе ОМР можно выделить полевые опытно-миграционные опробования (ОМО), направленные преимущественно на количественную оценку миграционных параметров среды, опытно-фильтрационные индикаторные опробования (ОФИО), проводимые с целью характеристики структуры миграционного потока, необходимой детализации геофильтрационной схемы и исследования комплексных показателей фильтрации и массопереноса, лабораторные индикаторные эксперименты - для характеристики миграционных параметров на микроуровне рассмотрения водовмещающей среды - и опытно-миграционные наблюдения (ОМН), основной задачей которых является характеристика миграционных процессов в естественных, или "бытовых"¹ условиях. Ввиду особой экономической и экологической значимости упомянутой проблемы, ОМР оказываются важным и необходимым звеном гидрогеологических изысканий и наблюдений.

Несмотря на очевидную потребность практики, ОМР проводятся пока в весьма ограниченном объёме и обычно без должного методического обоснования: единичные полевые индикаторные эксперименты чаще всего носят исследовательский характер, а принятые в широкой практике схемы и методы наблюдений за загрязнением подземных вод лишь в редких случаях позволяют использовать их

¹Под естественным ("бытовым") потоком понимается поток, сложившийся на участке опробования до проведения ОФР и ОМО, в том числе, под влиянием работы искусственных инженерных сооружений (водозаборов и дренажей)

результаты для детального анализа собственно миграционных процессов определения расчётных параметров миграции и прогнозных расчётов.

Такое положение дел объясняется рядом причин: слабой разработанностью теоретических и методических основ ОМР, часто неверно понимаемыми возможностями отдельных их видов и отсутствием тесного сочетания гидродинамических, гидрохимических и гидрогеофизических методов исследований; слабой увязкой миграционных экспериментов с существующей практикой гидрогеологической разведки, недооценкой значимости подобного рода работ, без которых зачастую невозможно обоснование эффективных инженерно-экономических решений в системе управления подземными водами и их охраны. Эти решения недостаточно обеспечены требуемой информацией, методикой её определения и соответствующей квалификацией инженерного персонала. Настоящая работа призвана в какой-то мере компенсировать указанные недостатки.

Все главы настоящей работы подготовлены д.г.-м.н. Мироненко В.А. и д.г.-м.н. Румыниным В.Г. при участии к.г.-м.н. Ершова Г.Е., разделы 1.2.1 и 3.2.4 написаны при участии д.г.-м.н. Боровского Б.В., разделы 1.2, 6.2, 6.3 - при участии к.г.-м.н. Коносавского П.К. Научная редакция д.г.-м.н. Мироненко В.А. и д.г.-м.н. Боровского Б.В.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОЦЕССОВ МИГРАЦИИ И ОСНОВНЫХ МИГРАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ.

1.1. Основные понятия и элементарные механизмы миграции.

Процессы миграции вещества в подземных водах определяются множеством факторов, которые принято разделять на две основные группы - гидродинамические, не затрагивающие межфазовые взаимодействия и химические процессы в растворе, и физико-химические, которые связываются с взаимодействиями в системе “вода-порода” и/или химическими реакциями внутри водной фазы.

К главным гидродинамическим формам переноса и рассеяния компонентов в подземных водах относят: конвекцию под влиянием гидравлического или плотностного градиента, гидродисперсию - продольную и поперечную - и молекулярную диффузию (последняя включается в эту группу условно, по соображениям практического свойства).

Конвекция определяется полем скоростей фильтрации (v) и активной пористостью (трещиноватостью) - n , в определенных условиях последняя может существенно отличаться от общей пористости (трещиноватости) n_0 , представляющей отношение суммарного объема пор к общему объему породы, - ввиду наличия застойных, пассивных в фильтрационном отношении, зон, постепенно вовлекаемых (частично или полностью) в миграционный процесс благодаря диффузионно-дисперсионным, гравитационным, осмотическим и некоторым другим механизмам переноса. Доля пассивных зон особенно велика в трещинно-блочных средах с каналовым механизмом фильтрации по трещинам в силу неравномерного взаимопересечения и раскрытия последних.

Гравитационная (плотностная) конвекция, обуславливается появлением на границе раздела более минерализованных (плотностью ρ_0) и пресных (плотностью ρ^0) растворов дополнительной вертикальной составляющей скорости фильтрации, которая контролируется величиной "плотностного" градиента $\Delta \bar{\rho} = (\rho_0 - \rho^0) / \rho^0$.

Молекулярная диффузия определяется градиентным законом Фика и контролируется значением коэффициента D_m , который в полностью водонасыщенных пористых или трещиновато-пористых (при пористости блоков более 0.1- 0.2) осадочных образованиях имеет порядок 10^{-5} м²/сут.

Продольная гидродисперсия вещества - рассеяние его вдоль фильтрационного потока - характеризуется в хорошо проницаемых средах коэффициентом дисперсии $D_L = \delta_L \times v$, где δ_L - константа продольной гидродисперсии (дисперсивность), величина которой коррелирует с размером элементарных составляющих горной породы (рис. 1 а,б,в). Для однородных песчаных пород значения δ_L составляют тысячные и сотые доли метра, для трещиноватых имеют порядок метров и десятков метров.

Поперечная гидродисперсия вещества - рассеяние вкрось направления фильтрационного потока - приводит к формированию объемных ореолов загрязнения; её константа δ_T обычно в 10-20 раз ниже, чем значение δ_L для тех же пород. В большинстве случаев отмечается сильная анизотропия рассеивающих свойств водоносных толщ в направлениях, ортогональных направлению конвекции: различия в величинах дисперсивностей δ_{T1} и δ_{T2} , характеризующих плановую и профильную поперечную гидродисперсию, могут достигать двух и более порядков (обычно $\delta_{T1} \gg \delta_{T2}$), что является следствием естественной стратификации геологических сред. Несмотря на относительно малые значения поперечной дисперсивности в сравнении с продольной, роль поперечного дисперсионного рассеяния вещества может со временем оказаться доминирующей, так как по мере увеличения масштаба переноса

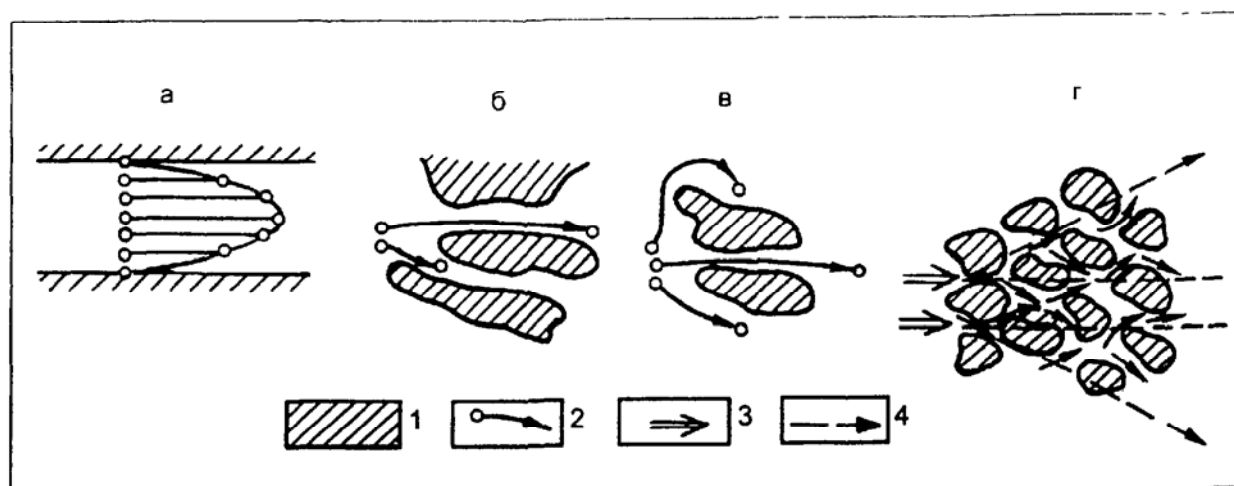


Рис. 1.1. Механизмы микродисперсионного рассеяния:
а - неравномерность поля скоростей в поровом канале, б - различия скоростей в различных поровых каналах,
в - деформации линий тока в поровом пространстве, г - поперечное рассейвание.

растёт, соответственно, боковая поверхность ореола загрязнения, через которую осуществляется поперечная дисперсия (рис. 1г).

Упомянутые выше характеристики - пористость или трещиноватость пород, продольная и поперечная дисперсивность (параметры гидродисперсии) и коэффициент молекулярной диффузии - являются миграционными параметрами пород, исчерпывающе описывающими гидродинамические механизмы миграции в однородных гомогенных средах¹; для неоднородных и гетерогенных сред этот список потребует расширения (см. разд. 1.2).

Физико-химический характер миграции определяется [5, 17, 18]: процессами (реакциями) межфазового взаимодействия - сорбцией, ионным обменом, растворением/осаждением и др., реализующимися на границе раздела жидкости и минерального скелета, а также внутрифазовыми процессами (реакциями), протекающими в объёме поровой жидкости, - комплексообразованием и деструкцией (распадом).

Сорбция вещества из мало концентрированных растворов обычно подчиняется линейной изотерме Генри, для которой определяющим является безразмерный коэффициент $K_I = \Delta q / \Delta C = \text{const}$, определяющий соотношение между приращением содержания вещества в твёрдой фазе Δq при изменении его концентрации в растворе на величину ΔC .

В зависимости от типа пород, для параметра K_I выбирается одно из двух основных представлений:

- в пористых породах

$$K_I = K_d \rho$$

(K_d - коэффициент объемного сорбционного распределения, см³/г;

ρ - плотность пород, г/см³);

- в трещиноватых породах

$$K_I = K_a S_h$$

(K_a - коэффициент сорбционного распределения вещества на поверхности трещин, см; S_h - удельная поверхность трещин/блоков, см⁻¹).

Описание ионообменных процессов также целесообразно сводить к изотермическим зависимостям, носящим, однако, часто нелинейный характер [17]. При этом показателями интенсивности и направленности процессов служат суммарная ёмкость катионного обмена (поглощения) Q , и коэффициенты селективности K_{ij} (i, j - условные индексы обменивающихся катионов). Описываемые таким образом равновесные состояния

¹ Уточним поэтому, что рассмотренные эффекты дисперсии, протекающие в таких породах лишь на микроуровне (уровень пор и трещин), будут именоваться далее микродисперсией

сорбционных и ионообменных процессов достигаются по завершению их кинетических стадий, которые в экспериментальных условиях (например, опыты с сорбируемыми индикаторами на участках реабилитации качества подземных вод) могут быть сравнительно длительными

Процессы комплексобразования дают объяснение многообразию водных форм миграции одного и того же химического элемента [18]. Возможные различия в параметрах сорбции у каждой из этих форм делают необходимым проведение специальных термодинамических расчетов для определения концентраций ионов и комплексных соединений в растворах.

Для описания структуры (распада) неустойчивых веществ в растворе обычно обращаются к линейной модели, в которой определяющим процесс параметром является константа распада λ_r (имеющая размерность, обратную времени)

Коэффициент распределения Генри K_d , суммарная емкость катионного обмена (поглощения) Q_t и коэффициенты селективности K_{ij} , константа распада λ_r и характеристики комплексобразования являются параметрами, описывающими физико-химические взаимодействия и трансформации при миграции элементов в подземных водах

Предметом ОМО в основном являются гидродинамические механизмы переноса и рассеяния вещества

1.2. Основные модели и типовые расчётные схемы миграции.

1.2.1. Структурная и литолого-генетическая дифференциация изучаемых объектов.

При рассмотрении процессов миграции вещества обычно можно выделить по меньшей мере три разных масштаба рассмотрения процессов - мега-, мезо- и микроуровень

а) мегауровень¹ - масштаб рассмотрения участка исследований в целом. На этом уровне определяющую роль в переносе компонентов играет крупномасштабная фильтрационная неоднородность - наличие плано-протяженных зон с существенно отличающейся водопроницаемостью (коэффициентом фильтрации), их положение относительно граничных контуров, источников загрязнения и скважин водозабора. Неоднородные на данном уровне объекты не могут быть сведены к осреднённым квазиоднородным моделям, а масштабы элементов

¹ Термин принимаемый в данной работе условно - из соображений удобства изложения материала

неоднородности здесь превышают реально достижимый масштаб опытных опробований или соизмеримы с ним

Качество эксплуатируемых водозабором подземных вод при наличии зон неоднородности такого рода определяется в основном скоростями движения по ним и соотношением притоков от источников загрязнения и питания в балансе водоотбора, а также конкретной конфигурацией линий тока. Процессы микродисперсии в этом случае имеют существенно подчиненное значение, а полевая оценка миграционных параметров (пористости, дисперсивности и т.п.) для области возможного переноса загрязнений целесообразна только в случае наличия достаточной информации о фильтрационных характеристиках неоднородности данного уровня, т.е. о балансе и структуре фильтрационного потока. В случаях существенно неупорядоченной неоднородности (например - при наличии одной или нескольких крупных зон трещиноватости большой протяженности) для корректного описания миграционного процесса фильтрационная модель должна быть детерминирована (т.е. информационно обеспечена) до данного уровня неоднородности, а миграционные процессы рассматриваются отдельно по каждому (или наиболее представительному) элементу этой неоднородности. Постановка опытно-миграционных работ с целью характеристики миграционных параметров таких объектов в целом нецелесообразна, и изучению могут подлежать лишь параметры отдельных элементов неоднородности. В то же время, крупномасштабные индикаторные запуски могут оказаться полезными для расшифровки фильтрационной структуры объекта в целом (см. разд. 3.1.2 - ОФИО).

б) мезоуровень - масштаб рассмотрения отдельного элемента неоднородности предыдущего уровня (например, участок водоносного пласта вдоль линии тока от источника загрязнения к скважине водозабора - в пределах одной зоны меганеоднородности), допускающий описание его усредненной (квазиоднородной) фильтрационной моделью. Вместе с тем, элемент, рассматриваемый как однородный для решения фильтрационной задачи, может фактически состоять из множества подэлементов с различающимися фильтрационными свойствами (например, слоистый или трещиноватый комплекс, состоящий из совокупностей блоков и трещин с резко различной - неоднородной - структурой). Иначе говоря, и на этом уровне протекание процессов миграции определяется плановой и профильной фильтрационной неоднородностью, однако, размеры ее подэлементов могут быть существенно перекрыты реальными масштабами ОМО. В этой ситуации ОМО могут быть целесообразными как для изучения отдельных подэлементов системы (если они обеспечены соответствующей информацией о фильтрационных показателях), так и для их совокупности в целом. В последнем случае возможна усредненная

характеристика неоднородности этого уровня путем формального описания (формулой или осредненными параметрами) миграционного процесса в рамках моделей макродисперсии. Параметрами макродисперсии, помимо пористости или трещиноватости пород, в зависимости от выбранной модели, являются характеристики рассеяния вещества, определяемые структурой среды. Они будут рассмотрены ниже при формулировке физических моделей макродисперсии. В тех случаях, когда описание свойств исследуемого объекта в таких - осредняющих - представлениях недопустимо, следует рассматривать его как неоднородный на мезоуровне. Соответственно, в настоящей работе понятие о макрон неоднородных средах далее будет относиться к комплексам пород, которые характеризуются неоднородностью фильтрационных свойств на мезоуровне. В отличие от них, комплексы пород, не проявляющие существенной неоднородности свойств на данном уровне рассмотрения рассматриваются как однородные.

в) микроуровень - масштаб рассмотрения объема пород, в пределах которого их фильтрационные свойства могут считаться неизменными. Этому масштабу соответствуют миграционные модели микродисперсии, параметрами которых, помимо пористости и трещиноватости, являются константы пространственной микродисперсии и параметры молекулярной диффузии. В отсутствие фильтрационной неоднородности, именно их соотношение определяет протекание процессов миграции в гомогенных образованиях. Строго говоря, и на этом уровне процессы рассеяния определяются физической неоднородностью водовмещающей среды (рис. 1.1), однако в данном случае ее масштаб (на уровне элементарных составляющих горной породы) намного меньше реальных масштабов опробования.

Итак, понятие неоднородности далее связывается с пространственной изменчивостью проницаемости в масштабах превышающих минимальный репрезентативный объем среды. Напомним, что только в таких объемах, своими размерами превосходящих хотя бы на порядок размеры элементарных составляющих (минеральных зерен, блоков и т.д.) среды, может быть допустимым статистическое осреднение свойств в рамках концепции сплошной среды [13], поэтому только при масштабах опробования, больших минимального репрезентативного объема, оказываются достаточно правомочными и все интерпретации ОМО.

Важно подчеркнуть, что и в пределах минимального репрезентативного объема рассматриваемая среда может иметь неоднородное строение и/или содержать существенно различающиеся по свойствам группы ее элементарных составляющих, в последнем случае среда считается гетерогенной. Наиболее типичным примером гетерогенной среды являются трещиновато-пористые породы, в которых

проницаемость и ёмкость резко различаются для основных составляющих - трещин и пористых блоков, предельным вариантом такой среды с двойной ёмкостью служат комплексы трещиновато-пористых пород, в которых проницаемость блоков пренебрежимо мала, а ёмкость является доминирующей. Другими характерными примерами гетерогенных сред являются слоистый пласт пористых пород, рассматриваемый как единый, статистически осредненный по своему профилю, комплекс (в этом случае минимальный репрезентативный объём среды охватывает совокупность достаточно маломощных прослоев в пределах пласта), а также комплекс неравномерно трещиноватых или закарстованных пород, в которых прослеживаются отдельные крупные трещины или "каналы" (здесь минимальный репрезентативный объём должен содержать достаточно много подобных, аномально проводящих, элементов).

Таким образом в данной работе понятие гетерогенной (в противовес гомогенной) среды связывается с наличием групп разнородных по проницаемости и/или ёмкости элементарных составляющих в пределах минимального репрезентативного объёма.

При изучении миграционных процессов, в качестве особого подразделения структуры среды, необходимо отличать изотропные среды, фильтрационные свойства которых во всех направлениях одинаковы, и анизотропные. При этом анизотропия может проявляться на микроуровне (в пределах минимального репрезентативного объёма) и мега- или мезоуровне, в последнем случае будем говорить о макро-анизотропных средах. Плановая анизотропия пород характеризуется параметром $\chi^2_h = k_x / k_y$, где k_x и k_y - коэффициенты фильтрации в направлениях x и y соответственно, а также (в общем случае) углом между направлениями осей анизотропии φ . Профильная анизотропия - параметром $\chi^2_v = k_z / k_x$, где k_z - вертикальный коэффициент фильтрации. Строго говоря, в результате особенностей осадконакопления водовмещающих пород и последующих геологических процессов практически все они в той или иной мере являются анизотропными. При этом для пористых пород в результате их послойного накопления характерна профильная анизотропия (даже в практически однородных песчаных породах отношение вертикального коэффициента фильтрации к горизонтальному обычно составляет порядка 1/10 - 1/50), а для трещиноватых и трещиновато-пористых - также и плановая в результате отражения в их структуре тектонических процессов. Характеристика анизотропии среды весьма важна как на этапе расшифровки результатов опытно-миграционных работ, так и на этапе построения дальнейших прогнозных моделей миграции вещества, поскольку скорость конвективного переноса, с которой оперируют все

расчётные схемы, определяется через скорость фильтрации v в каждом направлении.

Значимость того или иного механизма, контролирующего развитие миграционного процесса в целом, определяется во многом типом коллектора подземных вод. Поэтому, исходя из различий в емкостных (массообменных) и фильтрационных свойствах водовмещающих пород-коллекторов подземных вод и экранирующих образований, будем далее иметь в виду следующие их литотипы:

- а) пористые раздельно-зернистые (песчаные) породы;
- б) пористые породы существенно глинистого состава;
- в) трещиноватые скальные (магматические и сильно метаморфизованные осадочные) породы с пренебрежимо малой пористостью блоков при относительно равномерной трещиноватости;
- г) пористые гравийно-галечные накопления;
- д) трещиновато-пористые (сцементированные терригенио-осадочные и карбонатные) породы;
- е) переслаивающиеся породы песчаного и глинистого состава (при доминировании фильтрации вдоль напластования);
- ж) трещинно-жильные и трещинно-карстовые породы с резко неравномерной (неоднородной) трещиноватостью и/или с проницаемостью, определяемой редкими водопроводящими каналами.

На уровне элементарных репрезентативных объёмов горных пород образования первых трёх типов можно условно считать гомогенными (квазигомогенными) по фильтрационным и емкостным массообменным свойствам. Для трещиноватых пород это предполагает, что достигаемый масштаб опробования хотя бы на порядок превышает характерные расстояния между основными проводящими трещинами. Конвективно-дисперсионный процесс рассеяния вещества, связываемый с флуктуациями поля скоростей на этом уровне, ассоциируется с микродисперсией. Характеристика параметров трещиноватости и продольной микродисперсии является стандартной задачей опытно-миграционных опробований (ОМО).

Последующие три литотипа являются представителями гетерогенных пород: они характеризуются резко различающимися свойствами трещин (или песчаных слоёв), с одной стороны, и пористых блоков (глинистых слоёв) - с другой¹. Перенос вещества в таких породах сопровождается более мощными факторами рассеяния, обусловленными

¹ В гравийно-галечных накоплениях подобные различия связаны с обычными для этих комплексов частыми фацialsными замещениями и неоднородным составом заполнителя

кинетикой диффузионного обмена веществом между трещинами и пористыми блоками или песчаными и глинистыми слоями (рис 1.2) и связывается с понятием макродисперсии. Изучение параметров макродисперсии для трещинно-пористых пород (рис 1.2а) также является стандартной задачей ОМО, для переслаивания песчаных и глинистых пород (рис 1.2б) характерное время проявления процессов рассеяния обычно во много раз превышает длительность проведения стандартных полевых работ, поэтому здесь их изучение в целом (или по группе слоев) может являться задачей лишь ОМН или ОФИО. В то же время для сравнительно однородных гравийно-галечных отложений характерное время процессов рассеяния не столь велико.

Для трещинно-жильных и карстовых пород, а также в тех случаях, когда невозможно рассмотрение водовмещающих пород в пределах зоны опробования с позиций сплошной среды (это особенно характерно при доминировании в упомянутых ранее породах так называемого “каналового” механизма миграции), анализ миграционных процессов в рамках традиционных расчетных схем миграции является мало надежным. В этих условиях целесообразными с точки зрения изучения объекта могут быть только индикаторные запуски (ОФИО) для изучения структуры потоков, а также ОМН на этапе опытной или промышленной эксплуатации водозаборов.

Изложенная в этом разделе структурная и литолого-генетическая дифференциация объектов, подлежащих изучению посредством ОМО, во многом предопределяет проявление различных масштабных эффектов (см разд. 3.2.4). В частности, и теоретические, и экспериментальные работы свидетельствуют о зависимости значений дисперсивности от пространственно-временного масштаба рассмотрения процесса. Это обусловлено асимптотическим характером самого представления о дисперсивности: оно предполагает допущение сплошности среды, а это означает, что область переноса должна на один-два порядка превосходить размеры элементарных составляющих горной породы в однородных средах или характерные масштабы корреляции неоднородности - в неоднородных. В гетерогенных по емкости породах традиционное представление о дисперсивности вообще лишено физического смысла.

1.2.2. Модели миграции для гомогенных пород.

1.2.2.1. Квазиодномерные расчётные схемы.

Простейшей из них является схема поршневого вытеснения, пренебрегающая дисперсионно-диффузионными механизмами. Согласно ей, пространственное положение l_0 , или временная

координата l_0 , фронта поршневого вытеснения определяются кинематическим равенством

$$v/n = dl/dt, \quad (1.1.)$$

интегрирование которого проводится вдоль линий тока ψ с заданным (найденным из решения фильтрационной задачи) распределением скорости фильтрации $v = v(l)$. Таким путем нетрудно получить основные соотношения для двух типовых форм плановых фильтрационных потоков:

- при плоскопараллельной фильтрации со скоростью v (в направлении оси X)

$$x_0 = \frac{vt}{n}, \quad t_0 = \frac{xn}{v}; \quad (1.2)$$

- при осесимметричном движении со скоростью

$$v_r = Q/2\pi mnr$$

(r - радиальная координата, Q - дебит источника, m - мощность пласта)

$$r_0 = \sqrt{\frac{Qt}{\pi mn}}, \quad t_0 = \frac{\pi mnr^2}{Q} \quad (1.3.)$$

В рамках рассматриваемых представлений обычно описываются закономерности смещения удалённых плановых и профильных гидрохимических границ в пласте при сосредоточенном водоотборе или нагнетании.

При поршневом взаимном вытеснении жидкостей, имеющих различную плотность, фронт принимает в профиле наклонное положение. При этом средняя точка контакта движется со скоростью, примерно отвечающей действительной скорости фильтрации, а её пространственное положение может быть найдено по формулам (1.2) и (1.3). В общем случае непрерывного изменения плотности в потоке подземных вод необходимо определение полей напоров и плотностей, зависящих от суммарной концентрации, то есть фильтрационная и миграционная задачи должны решаться совместно.

В квазиодномерной постановке часто могут исследоваться и процессы конвективно-дисперсионного переноса. Соответствующей расчётной схеме микродисперсии, описывающей распределение концентрации вдоль фиксированных линий тока (когда поперечным перераспределением вещества между ними допустимо пренебречь), отвечает приближённое решение:

$$\bar{C} = 0,5 \operatorname{erfc}(\xi), \quad (1.4)$$

аргумент которого имеет два основных представления -

$$\xi = \frac{l - l_0}{\sqrt{2\sigma_l^2}} \quad \text{или} \quad \xi = \frac{t - t_0}{\sqrt{2\sigma_t^2}} \quad (1.4a)$$

где l_0 и t_0 - пространственная и временная координаты фронта поршневого вытеснения; σ_l^2 (м²) и σ_t^2 (сут²) - показатели статистической дисперсии концентрационного распределения, коррелирующие с размером переходной зоны, $\bar{C} = (C - C^0) / (C_0 - C^0)$ - относительная концентрация индикатора при его фоновом значении C^0 .

В частности [17]:

- для плоскопараллельного (с постоянной скоростью фильтрации) потока:

$$\sigma_l^2 = \frac{2x_0^2}{Pe_0}, \quad \sigma_t^2 = \frac{2t_0^2}{Pe} \quad (1.5)$$

- для осесимметричного потока:

$$\sigma_l^2 = \frac{2r_0^2}{3Pe_0}, \quad \sigma_t^2 = \frac{8t_0^2}{3Pe} \quad (1.6)$$

Как правило, поперечным рассеянием вещества допустимо пренебречь при рассмотрении миграции от достаточно протяжённого (линейного или площадного) источника вещества в линейном или близком к линейному потоке, когда размеры источника значительно превышают размеры области переноса. Под обозначением Pe здесь и далее подразумевается число (критерий) Пекле, характеризующий здесь соотношение размеров зоны переноса (конвективной составляющей переноса) и параметра дисперсии. В приведенных выше зависимостях $Pe_0 = l_0 / \delta_l$, $Pe = l / \delta_l$, $l = x, r$. При $Pe > 20 - 30$ различные представления аргумента ξ в формуле (1.4) дают близкие результаты.

Анализ решения (1.4) показывает, что достоверность оценок массопереноса в гомогенных пористых породах зависит лишь от погрешностей определения активной пористости (наряду с фильтрационными свойствами среды и структурой фильтрационного потока) [6,9]. Эффекты продольной гидродисперсии значимы лишь для комплексов трещиноватых пород или в случае кратковременного поступления ограниченных объемов загрязнения в пласт пористых пород.

1.2.2.2. Пространственные расчётные схемы.

Основные решения задачи двух- и трёхмерного рассеяния в условиях одномерного фильтрационного потока в гомогенной среде подразделяются в зависимости от геометрической формы источника вещества и характера входного концентрационного сигнала. Из их анализа следует, что:

1) максимальное развитие процессы поперечной дисперсии получают при локальном поступлении вещества в водоносный горизонт, когда размер концентрационного источника r_s много меньше расстояния до расчётных точек (x): $r_s \ll (\delta_l \times x)^{1/2}$;

2) при этом поперечная дисперсия замедляет продвижение фронта с относительной концентрацией $\bar{C} = 0,5$, в то же время способствуя увеличению длины переходной зоны в продольном направлении.

При существенном развитии поперечного рассеяния ролью собственно продольной дисперсии часто можно пренебречь. Тогда все упомянутые решения дают вполне надёжные значения концентрации для области, оставшейся за фронтом поршневого вытеснения. В общем случае эти решения имеют квазистационарные асимптотики, что также подтверждает возможность практической стабилизации поля концентрации во времени. Соответствующие формулы для случая $D_l = 0$ имеют вид:

а) при двухмерном в плане рассеянии

$$C = \frac{P_m}{2\sqrt{\pi D_l x v}} \exp\left(-\frac{y^2}{4 D_l x / v}\right), \quad (1.7)$$

б) при трёхмерном рассеянии

$$C = \frac{P_M}{4\pi D x} \exp\left(-\frac{y^2}{4 D_l x / v} - \frac{z^2}{4 D_l x / v}\right), \quad (1.8)$$

где $P_m = q_0 C_0$, $P_M = Q_0 C_0$ - мощности точечных концентрационных источников (q_0 и Q_0 - удельный и полный расходы растворов, поступающих в пласт), $D' = \sqrt{D_l D_{l_1}}$.

Приведенные выше решения и оценки могут претерпеть кардинальные изменения при нарушении плоскопараллельного характера течения жидкости. В частности, такого рода деформации могут быть вызваны сосредоточенным водоотбором или гидродинамическим влиянием самого концентрационного источника, а также проявлением плотностной конвекции [14].

Для условий профильной фильтрационной задачи в пластах большой мощности, когда поток не может рассматриваться как

одномерный, учёт процессов рассеяния вещества достаточно сложен, требует применения вычислительной техники, и в данной работе подробно не рассматривается. В рамках схемы поршневого вытеснения для расчёта вектора скоростей в каждой точке $v(x_i, z_i)$ профильно-однородного пласта мощностью m в условиях откачки с дебитом Q из скважины с длиной фильтра l (рис. 3.1) используются зависимости, полученные В.Д.Бабушкиным [3].

Для частных случаев соотношений размеров и положения фильтров скважин и мощности пласта существуют аналитические решения, приведенные в разделе 5.3 и в приложении 1.

1.2.2.3. Подходы к учёту физико-химических процессов

Сорбционные равновесия, описываемые линейной изотермой Генри, при миграции в гомогенных средах принято учитывать путем замены активной пористости на эффективное значение

$$n_0 = n + \Delta n, \quad (1.11)$$

где $\Delta n \equiv K_f$ - дополнительная ёмкость пласта, не зависящая от абсолютных концентраций - граничной и "фоновой" (разд. 1.1).

"Изотермическое" представление реакций ионного обмена позволяет учитывать их в моделях миграции аналогично сорбционным процессам. Вместе с тем, присутствие в поглощённом комплексе и в пластовой воде катионов и анионов макрокомпонентов, преобладающих в составе вытесняющих растворов, может привести к коренным изменениям в характере задаваемых концентрационных функций в границах переходной зоны с особым составом воды [17]. В отдельных случаях в расчётную величину Δn могут включаться также параметры комплексообразования в растворе [17, 18].

Деструкция (распад) в одномерном фильтрационном потоке без дисперсии описывается формулой:

$$\bar{C} = \exp(-\lambda_p n x / v), \quad (1.12)$$

справедливой при неизменной граничной концентрации ($\bar{C} = 1$) для участка $x < vt/n$ (для точек $x > vt/n$ считается, что $\bar{C} = 0$). В соответствии с этим решением, за фронтом переноса концентрация остается постоянной в течение всего периода миграции; при $t > (2-3)\lambda_p$ наступает стационарный режим переноса.

Часто для задач миграции, осложнённой деструкцией компонентов, достаточно характерным является граничное условие $C(x=0,t) = C_0 \exp(-\lambda_p t)$, свидетельствующее о протекании этого процесса в

источнике загрязнения (вариант невозобновляющегося загрязнения). В этом случае искомые решения получаются путем умножения функции $C_{p,0}$ отвечающей известным решениям задач переноса без деструкции компонентов, на “фактор распада” - временную функцию $\exp(-\lambda_p t)$. Например, фундаментальное решение квазиодномерного уравнения переноса для относительной концентрации $\bar{C}$ (1.4) принимает форму

$$\bar{C} = 0.5 \exp(-\lambda_p t) \operatorname{erfc}(\xi) \quad (1.13)$$

1.2.2.4. Учёт анизотропии пород.

Фильтрационная плановая анизотропия пород характеризуется параметром $\chi_n^2 = k_x/k_y$ (k_x и k_y - компоненты коэффициента фильтрации по осям x и y). Миграция вещества определяется коэффициентом анизотропии скоростей $\chi_h^2 = (k_x/n_x)/(k_y/n_y)$, совпадающим с фильтрационным коэффициентом плановой анизотропии в случае равных значений пористости пород по осям x и y .

Учет плановой анизотропии скоростей при миграционных расчетах можно проводить методом трансформации координат, что для радиального потока выполняется заменой значения r (расстояние от скважины) на $r' = \sqrt{\chi_h^2 v^2 + r^2}$ или $r' = r \sqrt{\chi_h^2 \sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi}$, где φ - угол между радиусом r и осью анизотропии y . В тех случаях, когда в расчетах присутствует в явном виде значение коэффициента фильтрации пород k , оно заменяется на обобщенный коэффициент фильтрации анизотропных пород $\sqrt{k_x k_y}$.

Аналогично этому профильная анизотропия пород ($\chi_v^2 = (k_z/n_z)/(k_x/n_x)$ где k_z и k_x - компоненты коэффициента фильтрации) при расчетах компонентов вектора скорости v_x и v_z в точке (x_1, z_1) может быть учтена заменой горизонтальной координаты x_1 на $x'_1 = x_1 \sqrt{k_z/k_x} = x_1 \chi_v$ и умножением полученного значения скорости на χ_v .

1.2.3. Макродисперсия в гетерогенных водоносных пластах

Для комплексов пористых (песчано-глинистых) пород проявление гетерогенности обусловлено вариациями гидравлической проницаемости, а для существенно трещиноватых коллекторов -

разнородными механизмами массопереноса по трещинам и пористым блокам. Гетерогенность пород целесообразно учитывать в рамках предельных расчётных схем - моделей макродисперсии, увязанных с характерными пространственно-временными масштабами изучения миграционного процесса.

1.2.3.1. Комплексы пористых пород

Простейшей для них является модель двухслойного пласта (с резко различными значениями проницаемости отдельных слоёв), довольно хорошо описанная в литературе [3, 5, 14, 19]. Она вполне эффективна для исследования миграции в относительно маломощных водоносных пластах с четко выраженными разделяющими (глинистыми) прослоями. При отсутствии таковых в водоносных толщах сравнительно большой мощности, формирование дисперсионных фронтов может быть оценено в рамках моделей с заданными законами внутрипластового распределения проницаемости.

Анализ решений задач переноса в упорядочено - стратифицированных водоносных пластах, проницаемость (k) которых является функцией вертикальной координаты (z), показал, что в общем случае расчётные значения показателя дисперсии сильно зависят от масштаба области и временных диапазонов рассмотрения процесса. Однако при этом выделяются два предельных режима переноса: а) послойный (для малых моментов времени) и б) асимптотический (для больших моментов времени).

В режиме послойного переноса (рис. 1.2в), когда влияние процессов поперечной дисперсии минимально, значение коэффициента макродисперсии пропорционально квадрату средней скорости фильтрации и возрастает во времени

$$D = A_n v^2 t / n, \quad (1.15)$$

где численное значение коэффициента пропорциональности A_n зависит от вида функции $k(z)$. Например, при линейном затухании проницаемости с глубиной ($k = 2k_{cp}z/m$) имеем $A_n = 1/3$, а при параболическом

($k = k_{max}(1 - \frac{z^2}{m^2})$) $A_n = 1/5$ [22]. Если профильное изменение проницаемости

носит стохастический (случайный) характер, то $A_n = W_k$ (W_k^2 - коэффициент профильной вариации проницаемости. Зависимость приводится для нормального закона распределения коэффициента фильтрации и активной пористости в пласте). Таким образом расчётное значение константы дисперсии δ_i в её стандартном представлении для режима

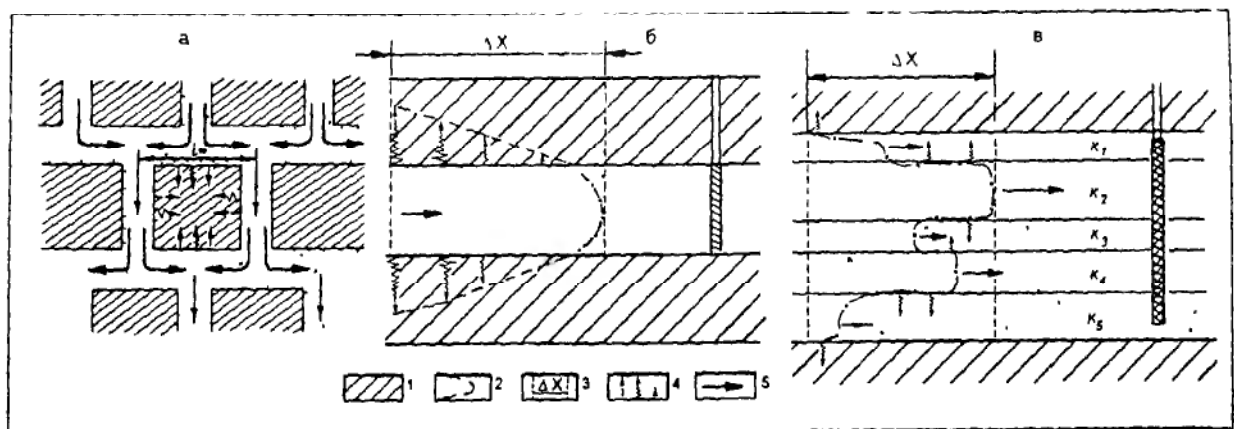


Рис. 1.2. Механизмы макродисперсионного рассеяния.

а - массообмен в трещиновато-пористых пластах, б - массообмен между раздельнозернистыми и глинистыми породами, в - послойный перенос в стратифицированном пласте пористых пород.

1 - блоки породы с преимущественно диффузионным переносом, 2 - фронт распространения индикаторного раствора, 3 - зона макродисперсионного рассеяния, 4 - направления диффузионного переноса, 5 - направления локальных скоростей конвективного переноса

последнего переноса оказывается связанным с расстоянием переноса L линейной зависимостью $\delta_l = A_n L$.

В асимптотическом режиме, на этапах интенсивного межслоевого обмена, процесс описывается постоянным коэффициентом макродисперсии

$$D^* = \delta^* v \quad (1.16)$$

Выражение для константы δ^* также зависит от вида функции $k(z)$ и от константы, контролирующей интенсивность межслоевого обмена. Например, для упомянутого линейного закона изменения проницаемости по глубине $\delta^* = m^2/(24\delta_{Tz})$, для параболического $\delta^* = m^2/(45\delta_{Tz})$, а для стохастического распределения $\delta^* = W_k^2 l_z^2/(3\delta_{Tz})$ (l_z - характерный масштаб ковариационной функции проницаемости), где δ_{Tz} - параметр поперечной дисперсии. Однако, установление асимптотического режима достигается в течение очень длительного времени, оцениваемом критерием $\tau = \delta_{Tz} L/m^2 > 0,5$. При характерных значениях $\delta_{Tz} \approx 10^{-3}$ м, $m = 10$ м масштаб применимости асимптотической схемы составит $L = 50$ км. В то же время при $\tau > 0,15 - 0,2$ достигаются значения порядка (0,8-0,9) D^* , что даёт основание с допустимой точностью пользоваться асимптотическими параметрами существенно (в два-три раза) раньше момента наступления истинной асимптотики.

Гораздо труднее оцениваются масштабы макродисперсии в пористых водоносных системах неупорядоченного строения, для которых характерно наличие пропластков, линз и других включений с различной геометрией и проницаемостью, случайным образом распределённых по площади и в разрезе. Такая структура водоносных систем предопределяет трёхмерный характер распределения истинных скоростей фильтрации, флуктуации которых и контролируют рассеяние вещества, в этом варианте анализ процесса требует привлечения вероятностных (стохастических) методов.

Практические перспективы использования стохастических моделей ограничены из-за трудностей их информационного обеспечения. В то же время, такого рода модели (особенно при их численной реализации) являются исключительно эффективными для диапазонных оценок и анализа чувствительности [17].

1.2.3.2. Комплексы трещиновато-пористых пород

Процесс миграции в этих комплексах описывается тремя основными расчётными схемами - неограниченной ёмкости, сосредоточенной ёмкости и предельной схемой макродисперсии (сводящей гетерогенную среду к квазигомогенной). В первом случае - на начальных этапах

процесса - ограниченность ёмкости пористых блоков на нем еще не сказывается (рис. 1.2а), во втором - она учитывается в предположении, что вся потенциальная ёмкость пористого блока сосредоточена в его центре, а в третьем - считается, что при длительном протекании процесса заполнение ёмкости трещин и пористых блоков происходит одновременно. При таком подходе все уровни процесса в среде описываются на одной и той же параметрической базе.

Определяющими параметрами являются: $\lambda_m = S_b^2 D_m n_0$ или $\alpha_m = \lambda_m / n_0^2 = S_b^2 D_m / n_0$ - комплексные массообменные параметры, где S_b - удельная поверхность блоков, n_0 и D_m - пористость блоков и коэффициент молекулярной диффузии в них, и n - активная трещиноватость пород. Удельная поверхность блоков соответствует суммарной площади поверхности усреднённого блока ω на единицу его объёма V (для блоков пластинчатой конфигурации $S_b = 2/m_5$, кубической $S_b = 6/m_5$, где m_5 - мощность блока). В табл. 1.1 представлены основные решения соответствующих задач переноса, записанные для случая поршневого (без дисперсии) движения растворов по трещинам (t_0 - временная координата фронта вытеснения).

Таблица 1.1.

Расчётная схема	Аналитическое решение $\bar{C} = F_1(\eta_1, \tau_1)$	η_1	τ_1	Критерий применимости
Неограниченной ёмкости	$F_1 = \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{\tau_1}}\right)$	$\frac{\alpha_m t_0}{n}$	$\lambda_m(t-t_0)$	$\tau < 0.5$
Сосредоточенной ёмкости	$F_2 = 1 - \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta_1}{2\sqrt{\tau_1}}\right) \int_0^{\eta_1} I_0(\sqrt{4\tau_2 z}) dz$	$\frac{\alpha_m n_0 t_0}{n}$	$\alpha_m(t-t_0)$	$\tau > 0.5$
Предельная макродисперсия	$F_1 = 1 - 0.5 \operatorname{erfc}\left(\frac{\tau_1 - \eta_1}{2\sqrt{\tau_1}}\right)$	$\frac{\alpha_m n_0 t_0}{n}$	$\alpha_m(t-t_0)$	$\tau > \eta > 5$

Примечание: $\tau_2 \equiv \alpha_m(t-t_0)$, функция $F_2(\eta_2, \tau_2)$ табулирована [5].

1.2.3.3. Учёт физико-химических процессов

Для анализа условий миграции неконсервативных компонентов в пористых раздельнозернистых породах, гетерогенность которых связана с изменчивостью их фильтрационных свойств, могут использоваться эффективные приемы, описанные в разд. 1.2.2.3. В этом случае ёмкость каждого (i -ого) элемента стратифицированной среды корректируется

путем введения в модель соответствующего коэффициента сорбционного распределения (K_{π})

В расчетных зависимостях для массопереноса в трещиновато-пористых породах учитываются два вида сорбции - на поверхности пористых блоков и в их поровом пространстве, соответствующие расчетные параметры емкости системы - ее трещиноватость и пористость - получают приращение

$$\Delta n = K_{\sigma} S_b, \quad \Delta n_0 = K_{\sigma} \quad (1.17)$$

где K_{σ} - коэффициент распределения, отвечающий увеличению количества вещества на поверхности блоков (г/м^2) с ростом его концентрации в растворе (г/м^3) (имеет размерность длины - м), K_{π} - коэффициент Генри для внутривещного пространства (безразмерный параметр)

Для оценки роли деструкции можно широко использовать предположку о неограниченной емкости пористых блоков. С соответствующим решением (для случая постоянной входной концентрации) можно ознакомиться в работе [14]. Это решение имеет стационарную асимптотику

$$\bar{C} = \exp \left[-\lambda_p t_0 \left(1 + \sqrt{(\lambda_m / \lambda_p) / n} \right) \right] \quad (1.18)$$

Приведенный краткий обзор физических моделей миграции вещества в подземных водах показывает, что процессы массопереноса и набор контролирующих их параметров в значительной степени зависят от структуры и строения водовмещающих пород. С другой стороны, постановка комплекса работ для изучения и прогнозирования миграции компонентов при разведке месторождений подземных вод зависит не только от этих факторов, но также от характеристик возможного загрязнения на участках разведываемых водозаборов и особенностей последних. Рассмотрению этих аспектов посвящен следующий раздел.

2. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРАХ И ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО ФАКТОРЫ

Стратегия гидрогеологической разведки месторождений подземных вод в целом, а также перечень отдельных видов опытных работ, среди которых специальное место занимают опробования с целью оценки механизмов и обоснования моделей миграции подземных вод, должны тесно увязываться с характером возможного техногенного воздействия на

эксплуатируемые водоносные горизонты. Эта связь устанавливается на основе типизации гидрогеоэкологических условий эксплуатации подземных вод (разд. 2.4), которая базируется на общих представлениях о характере потенциальных источников загрязнения и видах содержащихся в них веществ, критериях загрязнения, особенностях миграционного процесса (разд. 2.1-2.3), а также учитывает требования к санитарной охране подземных вод на водозаборах. Следует принимать во внимание при этом, что характер и интенсивность миграционных процессов в значительной степени зависят от литотипа и структуры водовмещающих пород (разделе 1.1).

Миграционные расчёты при разведке подземных вод обычно имеют своей целью обоснование границ зоны санитарной охраны (ЗСО) водозаборов, прогноз возможных изменений качества эксплуатируемых подземных вод, а также обоснование гидрогеоэкологического мониторинга и возможных водоохраных мер.

Обоснование границ ЗСО предполагает выделение трёх поясов:

- строгого режима - в радиусе 30-50 м от скважин водозабора;
- защиты от микробного загрязнения - в пределах траекторий движения подземных вод к водозабору, отвечающего периоду времени жизнеспособности бактерий (100-400 сут в зависимости от климатических условий);
- защиты от химического загрязнения - в пределах области движения подземных вод к водозабору за расчётный срок его эксплуатации.

Прогноз изменений качества подземных вод предполагает оценку времени поступления к водозаборным скважинам некондиционных (загрязнённых) вод, длительности последующего периода, в течение которого качество эксплуатируемых вод может оставаться в пределах установленных норм, а также расчёт максимальных концентраций компонентов-загрязнителей в них на период эксплуатации водозабора.

2.1. Загрязнение подземных вод и его критерии.

Под загрязнением отбираемых подземных вод здесь понимается процесс ухудшения их исходного состава (микробного и/или химического), приводящий или потенциально способный привести к несоответствию показателей качества вод критериям ГОСТ 2874-82 или ПДК, предусмотренных другими нормативными документами.

В перечне нормируемых показателей важным является показатель допустимого микробного (бактериального) загрязнения подземной воды, определяемый общим содержанием в ней бактерий (не более 100 в 1 мл) и количеством бактерий группы кишечной палочки (не более 3 в 1000 мл,

что соответствует коли-индексу не более 3). Следует заметить в то же время, что микробное загрязнение легко ликвидируется при организации централизованного водоснабжения широко известными методами обеззараживания. Наряду с этим, в лимитирующие показатели качества вод включаются нормы (предельно допустимые концентрации - ПДК) содержания биологически активных макро- и микрокомпонентов (в том числе радиоактивных элементов), появление которых вероятно при бытовом, техногенном или сельскохозяйственном загрязнении подземных вод [4,9].

Обобщенным показателем качества вод по макрокомпонентному составу является величина сухого остатка, которая не должна превышать 1 г/дм^3 при общей жесткости не более 7 мг-экв/дм^3 .

Среди микрокомпонентов, нормируемых ГОСТ 2874-82, можно выделить две основные группы [8] первая включает элементы, ПДК которых обычно много больше их фоновых концентраций в пресных водах (например, ионы меди, молибдена, свинца, цинка), вторая объединяет элементы, ПДК которых близки к фоновым (например, ионы железа, марганца, фтора, селена, бериллия). При изучении естественных вариаций химического состава подземных вод особое внимание должно уделяться второй группе элементов. Однако в нарушенных гидрогеохимических условиях загрязнение подземных вод часто определяется аномальным ростом концентраций элементов первой группы. При изучении техногенных загрязнений частым случаем также является загрязнение нефтепродуктами и фенолами, предельно-допустимые содержания которых в подземных водах много ниже встречаемых в условиях техногенеза концентраций.

Если вода содержит компоненты с подобными показателями токсичности, то сумма концентраций этих веществ, выраженная в долях от максимально допустимых концентраций, не должна превышать единицы, при этом, однако, действие фтора, нитратов и радиоактивных веществ оценивается отдельно по соответствующим ПДК.

При анализе природной обстановки не следует забывать, что в качестве критериев загрязнения могут выступать как сами превышения значений содержания нормируемых компонентов в подземных водах, так и скорость их роста во времени, а также заметные превышения содержания отдельных компонентов над естественными фоновыми значениями [2].

2.2. Типы загрязняющих растворов.

Источники ухудшения качества подземных вод на водозаборах по своему генезису делятся на естественные и техногенные. Естественные источники, как правило, обусловлены присутствием в самом

эксплуатируемом горизонте некондиционных вод или же их перетоком из смежных горизонтов. Техногенные источники загрязнения формируются в результате переноса загрязняющих веществ атмосферными осадками и поверхностными водами, а также непосредственно в местах утечек и просачивания промстоков и растворённых загрязнений в подземные воды.

При характеристике источников загрязнений с точки зрения анализа миграционного процесса полезно выделить три типа мигрантов: консервативные (трассеры), химически активные (но физически нейтральные) стоки и физически активные (тяжёлые или, наоборот, лёгкие) стоки. Такая дифференциация, отражающая, в частности, роль процессов самоочищения и гравитационного перераспределения загрязнений, эффективно учитывает постепенное усложнение изучаемого миграционного процесса.

Выделяются четыре категории растворов, различающихся ассоциациями загрязняющих веществ и/или физическими свойствами.

Первая категория объединяет пресные (с минерализацией $M < 1 \text{ г/дм}^3$) воды с относительно невысоким содержанием бытовых загрязнителей, привнос которых определяется либо контактом этих вод с атмосферой, земной поверхностью и техногенными объектами, либо растворением - выщелачиванием минерального вещества (например, удобрений) из почвенного слоя инфильтрационными водами. К таким загрязнителям, наряду с патогенными микроорганизмами, относятся водорастворённые нефтепродукты, фенолы и пестициды, а также азотные соединения, содержания которых не слишком сильно превышают ПДК. В условиях пористых пластов воды активно очищаются от этих загрязнителей, так что процессы загрязнения водоносных горизонтов обычно носят узко локальный характер и относительно легко прогнозируются; в трещиноватых коллекторах интенсивность этих процессов много сильнее, а прогнозирование даёт менее однозначные результаты по причине сильного варьирования поля скоростей.

Вторая категория включает пресные и слабоминерализованные ($M < 3 \text{ г/дм}^3$) сточные воды с повышенным содержанием токсичных компонентов, среди которых тяжёлые металлы (наиболее опасными являются свинец, кадмий, стронций, цинк, медь, никель, марганец, ртуть), мышьяк, фосфаты, фториды, флотореагенты (цианиды, фенолы, поверхностно-активные вещества) и др. Их концентрации могут многократно превышать ПДК. Одно из первых мест по степени опасности занимают радионуклиды, проникновение которых в водоносные горизонты может происходить с поверхности - при инфильтрации атмосферных осадков с загрязнённых территорий (например, в результате Чернобыльской аварии) или, наоборот, из глубины - при миграции радионуклидов от участков подземного захоронения радиоактивных

отходов. Наряду с перечисленными веществами, в загрязнённых водах могут присутствовать компоненты, характерные и для первой категории промышленных стоков. В самоочищенном вод от токсичных веществ ведущую роль часто играют внутрипластовые физико-химические процессы, прогнозирование которых требует детальных миграционных построений, учитывающих, в частности, многокомпонентный характер стоков.

Третью категорию стоков образуют солёные воды ($M = 5 - 35 \text{ г/дм}^3$) и рассолы ($M > 35 \text{ г/дм}^3$). Как правило, в этих растворах, обладающих повышенной плотностью, с ростом минерализации увеличивается содержание микрокомпонентов, свойственных предшествующей категории стоков. Однако основным показателем, контролирующим качество подземных вод в области их загрязнения, обычно является общая минерализация, на которую ориентируются все практические прогнозы. Их проведение осложняется необходимостью учёта гравитационной конвекции, обусловленной различиями в плотности пластовых вод и сточных растворов.

К четвёртой категории стоков относятся техногенные растворы и вещества с особыми (специфическими) свойствами: а) нефтепродукты в исходном состоянии (нефть, бензин, керосин, разнообразные масла и др.), несмешивающиеся с водными растворами, б) высококонцентрированные растворы органических кислот, спиртов и фенолов; в) двухфазные стоки, например, пульпа (смесь продуктов дробления горной массы и воды) обогатительных фабрик горноперерабатывающих предприятий. Не только химические, но и физические свойства (плотность, вязкость) перечисленных стоков отличаются от соответствующих свойств пластовых вод, что делает прогнозы загрязнения особенно сложными.

Таким образом, присутствие в водоносных горизонтах загрязняющих растворов первой и второй групп, в зависимости от типа водовмещающей среды и режима загрязнения, может потребовать изучения параметров микро- или макродисперсии и сорбции компонентов - помимо детализации фильтрационного строения горизонта и характеристики трещиноватости (пористости) пород. Для третьей группы растворов, как правило, процессы гравитационной конвекции преобладают над процессами рассеяния, поэтому здесь более существенное внимание должно уделяться изучению профильного строения горизонта (включая профильную анизотропию) и распределению плотности растворов. Для четвёртой группы стандартные расчётные схемы миграции напрямую часто вообще неприменимы, при этом основное внимание должно уделяться изучению физических свойств растворов, а миграционные

процессы и параметры оцениваются с помощью специализированных видов работ, здесь особо не рассматриваемых

2.3. Типы источников загрязнения подземных вод.

С точки зрения своего местоположения источники загрязнения делятся на поверхностные и подземные. Наличие поверхностных источников загрязнения при мощной зоне аэрации и в пластах большой мощности, как правило, требует характеристики процессов вертикальной миграции компонентов

По отношению к размерам области распространения водоносного комплекса источники его загрязнения могут быть локальными (сосредоточенными), линейными и площадными (рассредоточенными). Наличие локальных источников обычно требует учета (а следовательно, и определения характеристик) пространственной дисперсии, а для линейных периодического или “разового” действия - продольного рассеяния (при сравнительно небольших расстояниях от источников до водозаборов). Оценка воздействия на водозаборы площадных поверхностных источников загрязнения требует повышенной детальности изучения инфильтрационного питания подземных вод с учетом процессов самоочищения в породах зоны аэрации

По степени гидродинамического влияния на подземные воды техногенные источники загрязнения дифференцируются на гидродинамически активные и пассивные - в зависимости от вызываемых ими изменений в структуре исходного фильтрационного потока. Эти изменения определяются соотношением между расходом утечек промышленных стоков из источника и расходом “бытового” фильтрационного потока, контролирующим интенсивность смешения техногенных и пластовых вод [8, 14]

По режиму загрязнения источники можно разделить на постоянные, периодические и импульсные (разовые). Для прогнозных расчетов качества подземных вод наличие периодических источников загрязнения обычно требует учета характеристик рассеяния вещества, что тем более справедливо для импульсных источников, при постоянном же режиме загрязнения часто допустимо применение упрощенных схем поршневого вытеснения

2.4. Типизация водозаборов по условиям возможного загрязнения

Гидрогеоэкологические условия эксплуатации водозаборов определяются, с одной стороны, совокупностью природных факторов, контролирующей естественную защищенность подземных вод, а, с другой, - характером возможного влияния на них тех или иных источников загрязнения. В практическом плане типизация этих условий, имеющая целью облегчить решение задач экспериментального изучения параметров и прогнозирования качества подземных вод, предполагает их увязку с существующими (нормативными) представлениями о зонах санитарной охраны (ЗСО) водозаборов, рассматриваемых как первоочередная водозащитная мера. С этих позиций, типизация предполагает подразделение условий водозаборов подземных вод на следующие категории (рис. 2.1):

- 1) водозаборы инфильтрационные(береговые), расположенные в речных долинах или вблизи крупных природных водоемов, а также сочетающиеся с поверхностными системами искусственного восполнения запасов подземных вод;
- 2) водозаборы в грунтовых потоках, тяготеющие к водораздельным областям и склонам долин и удаленные, вместе с тем, от питающих границ;
- 3) водозаборы в субнапорных водоносных системах, характеризующихся относительно тесной взаимосвязью эксплуатируемых (напорных) водоносных горизонтов с приповерхностными грунтовыми водами;
- 4) водозаборы в напорных глубокозалегающих водоносных системах, не имеющих тесной связи с грунтовыми водами.

На водозаборах первых двух (а частично - и третьей) групп основная опасность ухудшения качества воды чаще всего связана с влиянием поверхностных источников бытового, промышленного или сельскохозяйственного загрязнения. На водозаборах четвертого (и частично - третьего) типа изменение качественного состава вод обычно обуславливается смещением исходной гидрогеохимической зональности - подтягиванием к водозабору глубоких некондиционных вод природного генезиса, а иногда - имеющих техногенное происхождение (например, на участках подземного захоронения промстоков или вблизи аварийных нефтедобывающих скважин).

Важнейшими факторами, определяющими защищенность водозаборов первого - инфильтрационного - типа, подтягивающих воду из реки или водоёма (часто - при заметном бактериологическом загрязнении последних), являются:

- 1) характер гидравлической взаимосвязи подземных и поверхностных вод, по которому выделяются поверхностные водотоки и водоемы, имеющие совершенную или затрудненную гидравлическую взаимосвязь с эксплуатируемым водоносным горизонтом;
- 2) направление движения естественного потока подземных вод
а) к реке, б) от реки, в) параллельно реке - подрусловые потоки;
- 3) строение и структура водовмещающих пород;
- 4) защищённость эксплуатируемого водоносного горизонта в долине реки, где возможно поступление антропогенных загрязнений через зону аэрации.

В настоящее время накоплен большой опыт эксплуатации водозаборов вблизи поверхностных источников питания. Он свидетельствует о высоком уровне самоочищения от загрязнения (в частности - микробного) поверхностных вод при их фильтрации через пористые песчаные породы: обычно достаточными являются пути миграции в несколько десятков метров. Напротив, в трещиноватых, и, особенно, закарстованных породах нередки случаи переноса загрязнения (в том числе микробного) на значительные расстояния, измеряемые многими сотнями метров и даже километрами.

Гидрогеологические расчёты по обоснованию ЗСО и прогнозам качества вод для водозаборов рассмотренного типа базируются обычно на простейших двумерных плановых моделях и, соответственно, параметрах конвекции, контролирующими время нахождения инфильтрационных вод в пластовых условиях. Для оценки максимальных концентраций компонентов на водозаборах в случае постоянного загрязнения дисперсионные эффекты здесь малозначимы. Среди фильтрационных параметров особого внимания заслуживают те из них, которые определяют долю привлекаемых поверхностных вод в общем объёме откачиваемой воды, причём для несовершенных водоёмов и рек (рис. 2.1а) это означает, в частности, необходимость внимательного изучения профильной фильтрационной анизотропии и неоднородности, которые могут потребовать применения трёхмерных моделей фильтрации, особенно, при наличии мощных подрусловых потоков. В трещиноватых и трещиновато-пористых пластах в условиях долин рек (рис. 2.1б), как правило, формируется выраженная плановая анизотропия фильтрационных свойств, определяющая разницу в скоростях движения загрязнителей вдоль и поперёк долины.

При прогнозах качества подземных вод следует иметь в виду, что здесь часто источником загрязнения может являться сама река (как правило, в виде поверхностного линейного источника периодического или импульсного загрязнения). В этом случае характеристики продольного рассеяния приобретают первостепенное значение для оценки максимально

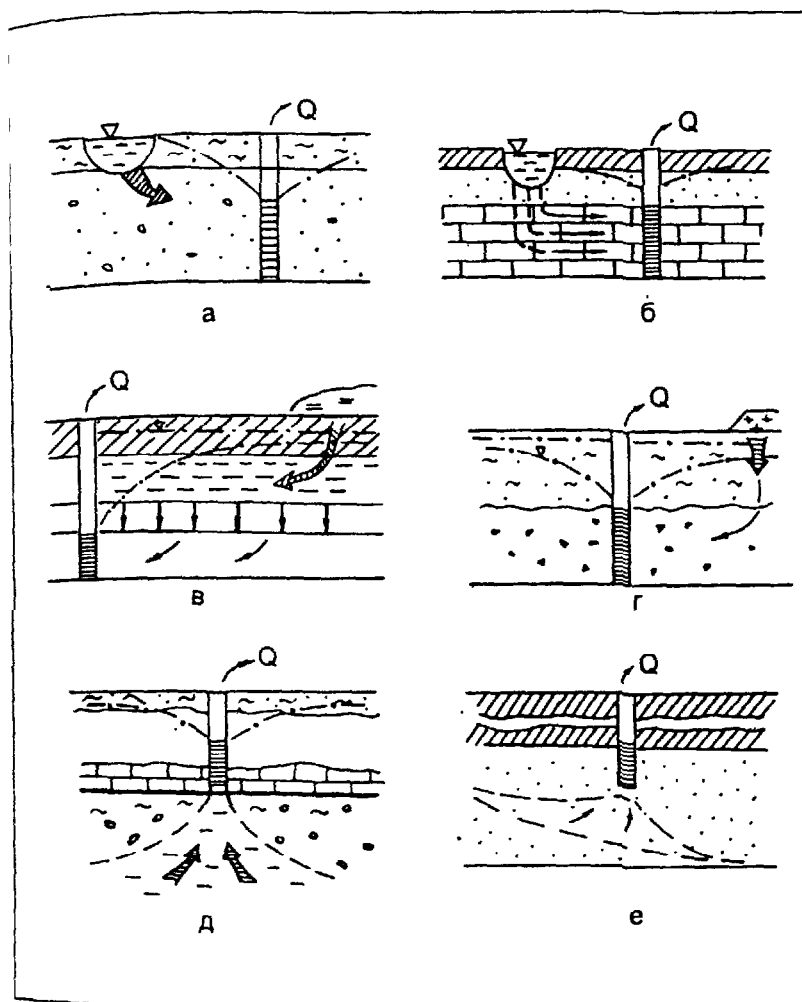


Рис 2 1 Типизация водозаборов по условиям возможного загрязнения.
 а,б - инфильтрационные водозаборы, в - водозаборы в грунтовых потоках
 водораздельных областей, г - водозаборы в субнапорных водоносных системах,
 связанных с грунтовыми водами, д,е - водозаборы напорных глубокозалегающих
 водоносных систем.

возможных концентраций компонента-загрязнителя в эксплуатируемых водах. Для химически активных загрязнителей (фенолы, пестициды и др.) становится актуальным учёт процессов сорбции и распада. И лишь при постоянном характере загрязнения качество подземных вод практически полностью определяется гидродинамическим балансом и полевое определение миграционных параметров не требуется, за исключением тех случаев, когда нужны оценки времени прохождения речных вод к удалённому водозабору (в то же время, они могут быть получены с помощью иных методов, например, изучением естественных изотопов [20]).

Гидрогеологические условия эксплуатации водозаборов в грунтовых потоках вдали от питающих границ (второй тип водозаборов, рис. 2.1в) во многом определяются характером связи подземных вод с техногенными источниками загрязнения и интенсивностью инфильтрационного питания, а также мощностью и составом пород зоны аэрации, выполняющей важные защитные функции. Источники загрязнения обычно являются поверхностными - постоянными, периодическими и "разовыми".

При анализе миграционных процессов в области влияния локальных поверхностных источников целесообразно выделение двух характерных видов ореолов загрязнения - ореолов растекания и ореолов рассеяния [9, 14]. Первые, сопровождающиеся подчиненным развитием плановой поперечной дисперсии, характерны для гидродинамически активных источников загрязнения (бассейнов промстоков), интенсивность фильтрации из которых заметно превосходит расчётный расход естественного потока. Наоборот, в развитии ореолов второго вида, характерных для гидродинамически пассивных источников (сильно экранированные бассейны, промплощадки, "сухие" свалки и пр.), интенсивность инфильтрации из них заметно уступает расчётному расходу естественного потока и поперечная дисперсия играет важнейшую роль. Соответственно, в первом варианте изучению подлежат (наряду с характеристиками, упомянутыми выше для инфильтрационных водозаборов) показатели продольной дисперсии, а во втором - и поперечной (плановой) дисперсии.

Наряду с этими двумя характерными типами площадей загрязнения в целом, особо выделяется непосредственно прилегающая к источнику область инфильтрации (преимущественно, нисходящей) загрязнений. Ввиду несовершенного - в большинстве случаев - характера фильтрационной связи поверхностных источников загрязнения с подземными водами, важная роль здесь отводится изучению профильной анизотропии, а также свойств донных отложений, во многом предопределяющих не только фильтрационную, но и миграционную ситуацию - физико-

химическую трансформацию загрязнений, соответственно, здесь может потребоваться подключение вспомогательных профильно-двумерных и даже трехмерных моделей переноса

На основной же площади распространения грунтовых вод решающее значение для оценки санитарных условий их эксплуатации имеют инфильтрационное питание и защитные свойства пород зоны аэрации. Методика соответствующих расчетных оценок вертикального влагопереноса и миграции загрязнений через высокопроницаемые гомогенные (трещиноватые или раздельнозернистые) толщи хорошо освещена в литературе. Основные трудности вызывает оценка защитных свойств слоистых песчано-глинистых и гетерогенных трещиновато-пористых пород большой мощности (многократно превышающей высоту капиллярного поднятия)

Для условий площадных (рассередоточенных) источников загрязнения обоснование ЗСО водозаборов данного типа может потребовать явного представления в расчетной схеме параметра инфильтрационного питания, в том числе и на уровне вспомогательных профильных двумерных моделей

Для водозаборов третьего типа (рис. 2.1г), функционирующих в условиях частичного подпитывания эксплуатируемого горизонта загрязненными (потенциально или реально) грунтовыми водами, назначение ЗСО и прогнозы качества подземных вод базируются на анализе гидродинамического и гидрохимического взаимодействия потоков в рамках квазитрехмерных двухпластовых моделей. В тех случаях, когда реальные условия не могут быть схематизированы до двухпластовых систем, детерминировать все параметры многослойной толщи как правило, не представляется возможным. В этом случае прогнозные концентрации компонентов целиком определяются балансом и структурой фильтрационного потока, а приблизительные оценки времени движения загрязнителей могут быть произведены только из самых общих соображений. В то же время, ясно, что процессы перетекания и физико-химические взаимодействия в разделяющих глинистых толщах могут полностью сместить представления об опасности загрязнения и о требованиях к ЗСО. Поэтому изучению параметров этих толщ должно уделяться первостепенное внимание.

Наконец, для водозаборов четвертого типа (рис. 2.1д), хорошо защищенных от поверхностного загрязнения, традиционные представления о ЗСО (особенно в том, что касается ее 2-го пояса) должны быть модифицированы. Источники потенциального загрязнения, как правило, являются естественными (постоянными) за исключением возможных случаев присутствия поблизости от водозаборов участков подземного захоронения отходов или скважин законтурированного

защиты. Первостепенный интерес здесь представляет прогнозирование возможного изменения качества воды в результате нарушения природной гидрогеохимической зональности в водоносных горизонтах - профильной (в разрезе) или плановой (по напластованию пород). К особому типу воздействия на эксплуатируемые водоносные горизонты следует отнести упругое отжатие некондиционных вод из слабопроницаемых толщ и/или перетекания через них растворов с пониженным качеством из смежных водоносных комплексов. Так как качество воды во всех упомянутых ситуациях определяется, преимущественно, её общей минерализацией, то в соответствующих прогнозах пренебрегают процессами физико-химического взаимодействия, ограничиваясь обычно сочетанием двумерных профильных и плановых моделей конвективного переноса (в общем случае - для разнотемпературных жидкостей). Ввиду того, что движение минерализованных вод при длительной эксплуатации водозаборов может захватывать существенно более глубокие зоны эксплуатируемого пласта или подстилающих его горизонтов, то исключительное внимание должно уделяться изучению профильной фильтрационной анизотропии на участке расположения водозабора. В трещиноватых комплексах особую роль приобретает изучение фильтрационной структуры потока - выделение в пространстве зон наиболее активного переноса и характеристика их связи с окружающими породами.

Следовательно, сочетание таких факторов, как тип месторождения подземных вод, структура водовмещающей среды, характер загрязняющего раствора, тип источника загрязнения и его режим, характер и расположение водозабора, определяют основные механизмы миграции и параметры, необходимые для выделения ЗСО и прогнозирования качества подземных вод.

3. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИНДИКАТОРНЫХ ОПРОБОВАНИЙ КАК ВИДА ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ.

3.1. Виды и задачи индикаторных опробований, их сочетание с другими видами работ.

В период гидрогеологической разведки главным направлением исследований миграционной направленности служат полевые индикаторные опробования пластов (в сочетании с индикаторными лабораторными экспериментами). В их основе лежат запуски в водо-

носные горизонты химических (а в некоторых случаях тепловых) индикаторов-трассеров. При этом детализируются геофильтрационные условия и вырабатываются представления о возможных моделях массопереноса, после чего изучаются миграционные параметры отражающие, главным образом, емкостные и рассеивающие (дисперсионные) свойства опробуемых пластов, а прочие механизмы миграции (разд 1.1) оцениваются преимущественно по лабораторным данным. В составе индикаторных опробований можно выделить собственно опытно-миграционные опробования (ОМО), ориентированные на оценку механизмов и параметров миграции, и индикаторные опробования фильтрационной направленности (ОФИО¹). Качественная постановка, проведение и интерпретация ОМО возможны лишь при наличии достаточно детальных представлений о геофильтрационных условиях на участке опробования, причем очень часто результаты стандартных опытно-фильтрационных работ оказываются для этого недостаточными. Для выработки и уточнения таких представлений и проводятся ОФИО, способствующие повышению детализации фильтрационных характеристик пластов и получению некоторых обобщенных (комплексных) показателей фильтрации и массопереноса.

Опытно-миграционные наблюдения (ОМН) проводятся, как правило, на этапе эксплуатационной разведки при высокой сложности гидрогеологических условий и большом разнообразии действующих факторов, когда имеющаяся информация об объекте не позволяет полностью исключить возможность загрязнения подземных вод, а их эксплуатация базируется на концепции контролируемого загрязнения [12].

3.1.1. Задачи опытно-миграционных опробований (ОМО).

При формулировке задач ОМО как обязательного вида стандартных гидрогеологических изысканий необходимо совокупно учитывать

- 1) требования к информационному обеспечению прогнозов направленных на оценку возможных изменений качества воды на водозаборах различных типов (разд 2.3),
- 2) ограниченные технико-экономические возможности ОМО по части достижения необходимого информационного обеспечения в тех или иных литологических комплексах и гидрогеологических условиях - с учетом дополнительных ограничений, диктуемых неполнотой и дефектами информации о структурно-геологических и фильтрационных условиях на участке опробования,
- 3) возможности альтернативных путей получения требуемой

¹ Опытно-фильтрационные индикаторные опробования

информации, прежде всего - на базе анализа кернового материала и лабораторных определений, с одной стороны, и данных скважинного каротажа и режимных наблюдений - с другой

Исходя из ранее сказанного, в задачи стандартных ОМО целесообразно включать, в первую очередь, определение параметров конвективно-дисперсионного (отчасти - диффузионного) переноса в комплексах трещиноватых и трещиновато-пористых водоносных пород, а в некоторых случаях также - конвективного переноса в сравнительно однородных толщах гравийно-галечных отложений¹, среди этих параметров

- 1) активная трещиноватость (пористость - для гравийно-галечных пород) В трещиновато-пористых породах с высокой - десятки процентов - пористостью блоков небольших (доли метра) размеров этот показатель важен для прогнозирования только начальных этапов массопереноса,
- 2) показатель продольной дисперсии (дисперсивность) трещинного пространства, который для трещиновато-пористых пород с высокой емкостью блоков, а также для гравийно-галечных отложений нужен не столько для прогнозов, сколько для правильной расшифровки результатов опробования,
- 3) комплексный параметр массообмена между трещинами и пористыми блоками трещиновато-пористых пород, совокупно отражающий пористость, показатель молекулярной диффузии и геометрию пористых блоков,
- 4) параметр поверхностной сорбции конкретных загрязнителей в трещиноватых породах, а иногда - и в сравнительно однородных гравийно-галечных породах

Три первые из перечисленных задач решаются с помощью инертных индикаторов-трассеров, последняя - с использованием неконсервативных индикаторов, отвечающих предполагаемому составу загрязняющих стоков

С другой стороны, из задач стандартных ОМО исключаются

- 1) оценки миграционных параметров комплексов песчано-глинистых пористых пород, что не снижает целесообразности применения в них индикаторных запусков фильтрационной направленности

¹ Поскольку предполагается возможность проведения опытов повышенной интенсивности так как на первых этапах опробования искомый показатель активной пористости оказывается сильно меняющейся (возрастающей) величиной за счет постепенного пропачивания трещин в относительно засоренные зоны

- 2) определения параметров физико-химического взаимодействия возможных загрязнителей с горными породами и их трансформаций в водном растворе, кроме параметров быстро протекающей сорбции вещества на стенках трещин и на поверхностях гравия или гальки;
- 3) оценка показателей поперечной дисперсии.

Последние три задачи должны решаться специальными ОМО или на опытно-эксплуатационном уровне - в процессе проведения опытно-миграционных наблюдений.

Следует ещё заметить, что и приведенный круг задач может быть иногда дополнительно сокращен и конкретизирован за счёт более внимательного учета специфики работы водозаборов различных типов (разд 2.4).

3.1.2. Задачи опытно-фильтрационных индикаторных опробований (ОФИО).

Решение задач прогноза качества подземных вод требует резко повышенной детальности изучения фильтрационных свойств водоносных пород - рассмотрения и характеристики структуры неоднородности пород как на мега-, так и на мезоуровне. Эта детальность часто не может быть обеспечена одними лишь традиционными видами опытно-фильтрационных опробований (ОФО). Такие показатели, как параметры плановой и профильной анизотропии, профильная неоднородность водовмещающих пород с выделением интервалов и зон сосредоточенной фильтрации и др., не могут быть в полной мере охарактеризованы стандартными гидродинамическими методами с необходимой для миграционных расчётов достоверностью. Так, практикуемая оценка параметра профильной анизотропии по данным откачек из несовершенных скважин является, как правило, малокорректной из-за слабой чувствительности пьезометрии к изменчивости этого параметра. Процессы миграции значительно более чувствительны к изменчивости упомянутых показателей. Поэтому применение индикаторных запусков фильтрационной направленности - как попутных с проведением ФО, так и специально организованных - позволяет охарактеризовать профильное и плановое строение водоносного горизонта с повышенной детальностью. Одновременно подобные запуски можно рассматривать и как предварительные миграционные опробования, позволяющие получить представление о характере массопереноса, оценить порядок величин значений миграционных параметров и спланировать собственно ОМО

В задачи ОФИО, в зависимости от конкретных условий водозаборов, могут входить:

- 1) изучение профиля проницаемости водоносного горизонта для обоснования моделей фильтрации и миграции;
- 2) количественная характеристика плановой анизотропии;
- 3) характеристика процессов субвертикальной миграции в водоносных пластах;
- 4) исследования плановой структуры потока в планово-неоднородных пластах и выделение зон интенсивной фильтрации в них;
- 5) прямые оценки действительной скорости фильтрации в водоносных пластах;
- 6) предварительные оценки миграционных параметров пород для планирования ОМО;
- 7) характеристика профиля проницаемости пород зоны аэрации;
- 8) прямые оценки действительной скорости влагопереноса в породах зоны аэрации.

С позиций тематики данной работы, индикаторные опробования пород зоны аэрации могут представлять интерес в трех основных аспектах¹:

- 1) для прослеживания за перемещением фронтов увлажнения при опытной оценке субвертикальной проницаемости или, более широко, параметров субвертикального влагопереноса в породах зоны аэрации;
- 2) для оценки "бытовых" скоростей инфильтрации;
- 3) для оценки параметров физико-химического взаимодействия пород зоны аэрации с конкретными загрязнителями.

Последняя задача обычно закрепляется за лабораторными экспериментами и длительными наблюдениями. Поэтому в данной работе, в какой-то мере, находят отражение лишь первые два аспекта. Задачи индикаторных опробований водоносных комплексов кратко охарактеризованы в табл. 3.1.

3.1.3. Сочетание индикаторных опробований с другими видами работ.

Необходимо иметь в виду достаточно тесное взаимодействие индикаторных опробований с другими видами гидрогеологических (и сопряженных с ними) работ, в числе которых заслуживают упоминания:

- 1) опытно-фильтрационные опробования, которые дают фильтрационную базу для ОМО и, более того, могут частично совмещаться с ними в пространстве и во времени;

¹ Отдельного упоминания заслуживают индикаторные опробования пород зоны аэрации на участках предполагаемого подтопления поверхностными техногенными бассейнами имеющие свою специфику и здесь не рассматриваемые.

Задачи индикаторных опробований водоносных пластов

Таблица 3.1

Изучаемые комплексы пород	Определяющие миграцию механизмы и факторы	Задачи индикаторных опробований	
		ОМО	ИОФН
Однородные пористые	конвекция, профильная анизотропия, макродисперсия, в глинах - молекулярная диффузия	не проводятся*	Изучение параметров профильной анизотропии и профиля проницаемости пласта
Гравийно-галечные**	конвекция, профильная анизотропия, макродисперсия	характеристика эффективной пористости*	Изучение параметров профильной анизотропии и профиля проницаемости пласта
Трещиноватые (с пренебрежимо малой пористостью)	конвекция, микродисперсия, плановая и профильная анизотропия	характеристика трещиноватости, параметра микродисперсии	Характеристика плановой и профильной анизотропии пород, изучение профиля проницаемости пласта
Трещиновато-пористые	конвекция, макродисперсия, плановая и профильная анизотропия	характеристика трещиноватости, комплексных параметров массообмена*	Характеристика плановой и профильной анизотропии пород, изучение профиля проницаемости пласта
Трещинно-карстовые и жильные	конвекция по зонам наибольшей проницаемости	не проводятся	Изучение структуры и скоростей потоков, баланса притоков по отдельным выделенным зонам

* в условиях неконсервативного загрязнителя проводятся специальные опробования или лабораторные работы с целью изучения процессов сорбции и деструкции компонентов

** для профильно-неоднородных пластов миграция рассматривается отдельно по слоям - элементам неоднородности

- 2) каротажные работы, гидродинамические экспресс-опробования и гидрогеофизические опробования в скважинах - расходометрия, резистивиметрия и/или термометрия, которые часто могут рассматриваться в качестве неотъемлемого элемента индикаторных опробований, особенно в свете расшифровки фильтрационных условий на участке опробования, а также технического состояния скважин, которое может существенно исказить результаты экспериментов,
- 3) отбор и анализ кернового материала и грунтовых монолитов как основа для структурно-гидрогеологического расчленения разреза, причем объемы такого рода работ целесообразно существенно увеличивать именно в свете изучения миграционных процессов
- 4) поверхностные геофизические работы той же ориентации, особенно полезные в свете выбора представительных участков для постановки ОМО и взаимного расположения опытных скважин
- 5) опытные наливывы в шурфы и скважины, пройденные по породам зоны аэрации
- 6) лабораторное определение пористости и диффузионно-дисперсионных параметров, а также изучение возможных трансформаций загрязнителей в растворах и их физико-химического взаимодействия с горными породами

Среди задач лабораторных экспериментов, непосредственно сопряженных с индикаторными опробованиями (т.е. направленных на расшифровку их результатов), выделяются

- а) оценка активной и общей пористости песчано-глинистых образований, а также внутриблоковой пористости в трещиноватых породах,
- б) оценка коэффициента молекулярной диффузии в образцах, отобранных из глинистых прослоев и из массивов трещиноватых пород,
- в) изучение теплофизических характеристик пород - в случае использования теплового трассера,
- г) изучение возможной сорбции и деструкции выбранных индикаторов

Их методика подробно рассмотрена в работах [15,20]. При проведении лабораторных исследований и применении их результатов для миграционных расчетов следует учитывать следующие ограничения этих методов

- возможное нарушение естественного строения пород при отборе проб,
- изменение их гранулометрического состава во время бурения и промывкой,

- масштабные эффекты, связанные с кратковременным характером и ограниченностью пути миграции в образце

3.2. Основные экспериментальные схемы и их информативность.

Опыты могут проводиться в естественных (бытовых) и возмущенных потоках

По характеру фильтрационного возмущения при полевых индикаторных исследованиях возможны следующие виды опробования

- запуски при откачках
- запуски при наливах и нагнетаниях в скважины
- дуплетные опробования, где участвуют две возмущающие скважины одновременно - для откачки и нагнетания,
- односкважинные опробования, когда в опытную скважину осуществляется налив индикатора, а затем из нее же производится откачка

Все эти виды фильтрационного возмущения применяются при ОМО проводимых с целью определения миграционных параметров. Выбор конкретного вида опробования при этом определяется имеющимися техническими возможностями и гидрогеологическими условиями участка работ. Для ОФИО преимущественно используются запуски при откачках и дуплетные схемы, выбор вида фильтрационного возмущения при этом определяется целями опробования. В породах зоны аэрации основное значение имеют запуски индикатора при наливах в шурфы и скважины.

3.2.1. Экспериментальные схемы ОМО.

Практическая реализация опытов в естественных (бытовых) фильтрационных потоках требует создания в водоносном горизонте обширной сети наблюдательных пунктов для детального прослеживания индикаторного ореола, который формируется за счет кратковременного налива индикаторного раствора в одну или несколько скважин. Повышенные затраты такого рода реально могут быть оправданы в том случае, когда прогнозная задача требует учета процессов поперечного рассеяния (как правило - при локальном источнике загрязнения) а масштаб исследования позволяет выйти на определение параметра поперечной дисперсивности (δ_1), пригодного для прогнозных оценок (раздел 1.1.1). Этот вид опробований не может рассматриваться как типовый при разведке водозаборов, требуя специального обоснования в каждом конкретном случае. Особого упоминания заслуживают опытные

запуски вблизи очагов родниковой разгрузки, способствующие уточнению здесь фильтрационной структуры (как правило, аномальной). Возможны конечно, и другие – крупномасштабные, долговременные – запуски индикаторов в естественном потоке, однако их следует рассматривать скорее, как ОФИО или элемент ОМН.

Создание возмущенного фильтрационного режима, в частности путем совмещения ОМО и опытно-фильтрационных работ, резко повышает эффективность индикаторных опробований.

Во многих случаях технически наиболее простым вариантом ОМО является запуск индикатора в наблюдательную скважину с его регистрацией по откачивающей скважине, или опробовании при откачке. Такие запуски оказываются эффективными при необходимости быстрой, весьма приближенной, оценки емкостных показателей опробуемых сред. Дополнительные технические приемы повышающие качество постановки эксперимента, позволяют определить и ориентировочные значения показателей, контролирующих дисперсионное рассеяние вещества.

При небольших глубинах опробования (до нескольких десятков метров) целесообразна схема налива (нагнетания) индикатора в центральную скважину с последующим прослеживанием за ним по наблюдательным скважинам. Среди недостатков этой схемы следует отметить неоднородность поля скоростей фильтрации и заметное искажение краевых зон влияния эксперимента естественным фильтрационным потоком: “точечный” характер отбираемых проб на фоне возможных сильных флуктуаций концентрации по отдельным направлениям переноса от центральной скважины и вдоль ствола каждой наблюдательной скважины, влияние эффектов гидрохимической инерционности наблюдательных скважин (раздел 5.4.2), довольно большой объем бурения, потребность в воде для опыта.

Эти недостатки устраняются проведением опыта по двухскважинной – дуплетной – схеме, когда перед запуском индикатора создается установившийся фильтрационный поток между запускной и улавливающей индикатор (откачивающей) скважинами, возможно наличие при этом и наблюдательных скважин, что делает опыт более контролируемым. Росту надежности опыта способствуют четкое соблюдение граничных условий миграции, в частности, благодаря отбору проб в режиме откачки, автоматически осредняющему профиль концентрации по расходам отдельных фильтрующих зон разреза и устраняющему влияние гидрохимической инерционности скважин, возможность прямого контроля потерь индикатора в пласте, относительно равномерное распределение скоростей фильтрации в центральной части опробуемой зоны. Однако важнейшим достоинством дуплетной схемы

особенно в крупноблочных трещиноватых породах, является крупномасштабное осреднение фильтрационных свойств опробуемой среды - не только вдоль, но и поперек фильтрационного потока. При этом достигается более равномерная степень насыщения индикатором различных зон разреза (благодаря хорошо выраженным поперечным конвективной и дисперсионной составляющим потока), заметно различающихся интенсивностью конвективного переноса, а также обеспечивается одновременная оценка фильтрационных свойств именно на участке опробования. Тем самым устраняются масштабные эффекты, обусловленные несоответствием зон миграционного и фильтрационного опробования. Обращение к дуплетной схеме снимает проблемы совместимости закачиваемой и пластовой воды (при использовании откачиваемой пластовой воды для налива или нагнетания) а также сокращает требуемый для опыта объем бурения, что делает ее особенно эффективной при опробовании глубоко залегающих водоносных горизонтов. Недостаток дуплетных экспериментов в "чисто" трещиноватых породах - трудности диагностики наличия массообмена между трещинами и блоками, указывающего на проявление гетерогенных свойств среды.

В трещиновато-пористых породах могут с относительным успехом использоваться и опробования пород по односкважинной схеме - согласно которой одна и та же опытная скважина последовательно используется в качестве инъекционной и откачивающей (регистрационной). Несмотря на то, что в процессе односкважинных экспериментов определяются некоторые обобщенные параметры, нуждающиеся в последующей расшифровке, подобные опыты могут оказаться незаменимыми при изучении процессов массо- и теплопереноса на весьма больших глубинах, особенно для гетерогенных трещиновато-пористых пород с низкими массообменными свойствами.

Одной из перспективных модификаций односкважинного эксперимента является опытная схема с выстаиванием индикатора в пласте, когда после кратковременного нагнетания индикатора гидродинамическое воздействие прекращают, по прошествии определенного времени, в течение которого индикатор из трещин диффундирует в блоки, проводят интенсивную откачку. Иногда аналогичный эксперимент осуществляют при параллельном отборе проб из наблюдательной скважины. Точность результатов такого опыта даже в средах со слабо выраженными поглощающими свойствами достаточно высока, ибо она сравнительно мало зависит от влияния профильной фильтрационной неоднородности при откачке индикатора. время его

¹ Подобный эксперимент может быть полезен и для изучения сорбции компонентов на поверхностях трещин в гомогенных породах.

обратного подтягивания к скважине оказывается примерно одинаковым для всех зон пласта и изменения концентрационной функции определяются в основном микродисперсией и кинетикой внутрипластовых обменных процессов. Главные потребности здесь возникают за счет сноса части “выстаивающегося” индикатора естественным фильтрационным потоком или при наличии заметной вертикальной компоненты скорости фильтрации.

В целом, полное или частичное извлечение из пласта индикаторной жидкости может рассматриваться как естественное завершение опытов, связанных с использованием нагнетательных скважин (например “кустовой” налив), – если последние могут быть оснащены вспомогательным оборудованием. В этом плане, здесь уместна аналогия с опытно-фильтрационными опробованиями, для которых обязательным является этап восстановления уровней после прекращения водоотбора.

Сопоставительный анализ схем ОМО свидетельствует о заметном преимуществе тупикового опробования при длительных запусках индикаторов в комплексах неоднородных трещиноватых пород. Опыты по схеме длительного налива индикатора могут конкурировать с ним при малых глубинах опробования, когда появляется возможность разбуривания довольно большого числа наблюдательных скважин по разным лучам. Первая и последняя из описанных выше опытных схем должны рассматриваться – применительно к участкам разведки питьевых водозаборов – как вспомогательные.

3.2.2. Экспериментальные схемы ОФИО.

Если основной целью ОМО является характеристика тех или иных миграционных параметров, то отдельные виды ОФИО имеют различные цели. Поэтому их рассмотрение разумно проводить не по видам фильтрационного возмущения, практически незначительным вытеснением, а по целям, которые преследуются при проведении работ.

Изучение профиля проницаемости по разрезу опробуемого пласта имеет особую значимость применительно ко всем миграционным построениям. В то же время, основные методы “поставляющие” эту информацию, – скважинная резистивметрия и расходометрия, дают в таком случае ориентировочную оценку фильтрационных свойств отдельных слоев пласта в локальных точках. Изучение профиля проницаемости пород с помощью индикаторных запусков проводится в основном путем импульсных и пакетных запусков консервативных трассеров в наблюдательные скважины на последних этапах кустового откачек. При этом желательно использование совершенных скважин

Наблюдения осуществляются по содержанию индикатора в откачиваемой воде в случае, если на графике ($C - t$) достаточно четко выделяются отдельные пики концентрации возможна оценка коэффициентов действующей скорости $v_d = k_d n_d$ по соответствующим им слоям профиля водоупорных пород. При близких показателях свойств пород в пределах многослойного пласта выходная индикаторная кривая не имеет отдельных пиков в этом случае возможна оценка коэффициента вариации H_k послойной проницаемости (строго говоря - коэффициента действующей скорости $v = k_d n_d$). В этих случаях сочетание ОФИО с расходомерией и резистивиметрией приобретает особое важное значение.

При возможности определений концентрации индикатора скважинными методами непосредственно по длине ствола наблюдательных скважин эти оценки можно производить дифференцированно по выделяющимся в профите пласта слоям, применяя, в частности, схемы налива (нагнетания) трассера или дуплетного опробования при пакетном режиме запуска индикатора.

Оценки плановой фильграционной анизотропии в трещиноватых и трещинно-пористых породах проводятся также по данным пакетных или индивидуальных запусков в скважины (преимущественно при откачках) однако, в этом случае делается несколько запусков по различным направлениям. При совпадении направления движения трассера с главными осями анизотропии производятся два запуска в соответствующие им скважины, в общем случае необходимы запуски в трех различных направлениях. Совместный анализ выходных кривых концентрации индикатора в откачиваемой воде по проведенным запускам позволяет определить коэффициент анизотропии $\chi' (k n)_x (k n)_y$ и угол φ между направлениями запусков и осью минимальной проницаемости. Для тех же целей возможно и применение схемы запуска индикатора при кустовом наливе. В этом случае наблюдательные скважины в опытном кусте должны располагаться на осях анизотропии (или по трем различным направлениям).

Использование индикаторных методов при изучении пространственной фильграционной анизотропии и параметров субвертикальной фильтрации имеет несколько возможных модификаций.

Наиболее надежной является схема "вертикальный дуплет" представляющая наличие нагнетательной и откачивающей скважины с фильтрами в различных интервалах разреза расположенных примерно на одной вертикали (рис. 3.1а). Возможно и применение одной скважины с изолируемыми друг от друга фильтрующими интервалами с независимыми режимами откачки-нагнетания. При этом создается четко выраженный стационарный поток вкrest напластования пород, на фоне

его в скважину для нагнетания (налива) запускается трассер, наблюдения за выходом которого производятся в откачивающей скважине.

Технически более проста схема “подошвенного засоления”, основанная на предварительной инъекции индикаторного раствора в нижнюю часть пласта с последующей откачкой из скважины в верхней его зоне (рис. 3.16). Здесь тем более возможно применение односкважинных вариантов. Однако, эта схема не столь надёжна с позиций интерпретации, т.к. эксперимент проводится в существенно нестационарном режиме, и, кроме того, необходимо оценивать долю воды, поступающей снизу, в общем расходе откачки.

Результаты обработки результатов запусков по схеме “вертикальный дуплет” или “подошвенное засоление” позволяют получить оценку параметра $k_z n / k_x$, для дальнейшей оценки значения параметра профильной анизотропии при этом необходимо знание величины пористости (трещиноватости) n . Совместное определение этих параметров возможно при применении схемы “двойной дуплет”, которая предполагает одновременный запуск двух различных индикаторов вкост и по напластованию пород (рис. 3.2). Обработка результатов опробования по данной схеме производится с применением компьютерной техники - для расчета линий тока в двух- или трехмерном потоке [3].

При решении задач обоснования ЗСО важное значение имеет оценка защитной роли пород зоны аэрации. Для этого, как известно, проводятся наливы в шурфы и скважины, направленные, в первую очередь, на определение вертикальной проницаемости пород. Эффективность подобных опытов заметно возрастает при использовании меченой жидкости, продвижение которой прослеживается прямым отбором проб или различными косвенными методами - в зависимости от характера метки. В тех случаях, когда индикатором служит краситель (например, эозин), глубину его проникновения приходится определять с нарушением сплошности опробуемого массива, т.е. одновременно, после прекращения эксперимента. При использовании разбавленных растворов электролитов можно ориентироваться на изменения электрических сопротивлений между электродами, помещенными в зону проникновения наливаемой жидкости. Более широкими возможностями обладает метод “борной метки” [14], позволяющий с помощью нейтронного индикатора влажности (НИВ) непрерывно следить за вертикальными перемещениями индикатора в массиве, не нарушая его. Возможно использование также теплового индикатора. При наливах “на слой” (относительно водоупорных пород) раствора электролита через неглубокие (до 7-10 м) скважины весьма эффективно использование метода заряженного тела [20]. Тем самым определяются границы зоны растекания электролита по поверхности слоя, контролируемые его вертикальной проницаемостью.

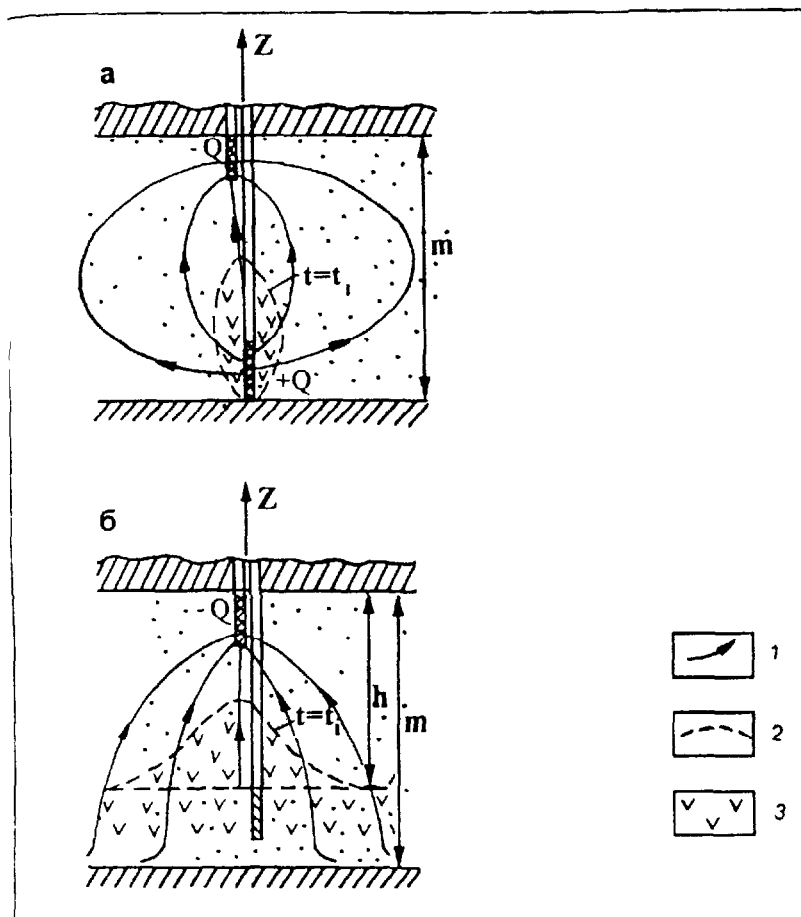


Рис 3 | Основные экспериментальные схемы индикаторного опробования
профильно-анизотропных толщ
(а - вертикальный дуплет, б - "с подошвенным засолением")

- 1 - линии тока 2 - контур перемещения фронта индикаторного раствора
3 - область распространения индикаторного раствора

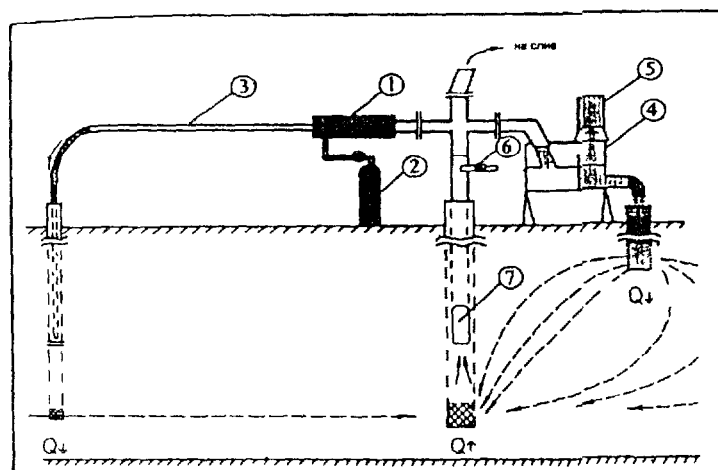


Рис 3.2 Технологическая схема и пример оборудования куста скважин для опробования по схеме "двойной дуплет"

- 1 - смеситель для растворения газового индикатора (гелия)
- 2 - скважина (газ) водовод подачи индикатора для субгоризонтального запуска
- 4 - смеситель жидкого индикатора 5 - дозатор 6 - хранилище для отбора проб
- 7 - насос

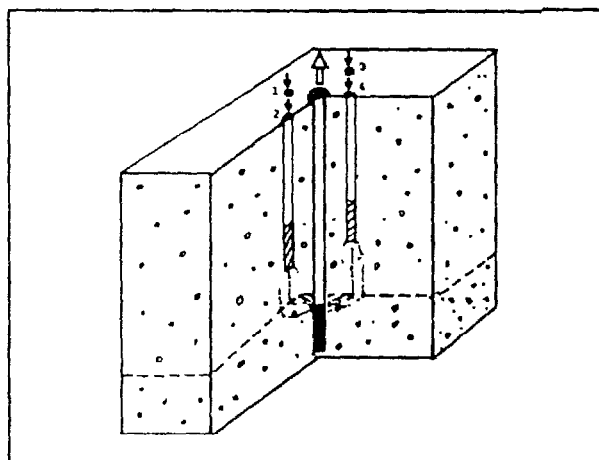


Рис 3.3 Схема опробования зоны аэрации "конверт"

- 1 - 4 - скважины для налива индикатора

Для прогнозов загрязнения от непостоянных поверхностных источников часто весьма актуальной является оценка естественной скорости влагопереноса в зоне аэрации. Одной из наиболее простых разновидностей индикаторных опробований, служащих этой цели, является налив индикатора в зону аэрации по схеме "конверт". Опытный куст скважин при таком опробовании включает откачивающую скважину с фильтром, находящимся непосредственно под урвеной поверхностью грунтовых вод, и четыре окружающие её скважины с открытым дном в зоне аэрации пород¹, куда осуществляется подача (без подпора) индикаторного раствора (рис. 3.3). Результаты опробования дают прямую оценку времени и скорости движения влаги по зоне аэрации.

Следует заметить, что применение индикаторных опробований при изучении субвертикальной фильтрации и миграции вызывает необходимость предъявления повышенных требований к изоляции затрубного пространства опытных и близрасположенных скважин, поскольку затрубные перетоки в прискважинном пространстве могут привести к искажению результатов опробований и неверной их интерпретации.

3.2.3. Режимы запуска индикаторов.

При вводе индикатора в пласт возможны следующие режимы запуска:

- 1) мгновенный подъём концентрации в точке запуска и поддержание её неизменного значения в течение всего опыта;
- 2) "пакетный" запуск - поддержание постоянной концентрации только в течение ограниченного времени;
- 3) "импульсный" запуск - мгновенное создание больших концентраций индикатора на весьма малый промежуток времени (по меньшей мере, в сотни раз меньший времени движения индикатора к точке наблюдения), в течение которого весь индикатор поступает в пласт.

Для опытов с наливом и по дуплетной схеме обычно выбираются непрерывный или пакетный режимы запуска, что обусловлено возможностью приготовления больших объёмов индикаторного раствора стабильной концентрации на земной поверхности и равномерного его распределения по рабочему сечению запускной скважины. Для инъекции в наблюдательные скважины (запуски при откачках) чаще используется импульсный сигнал. В этой связи заметим, что при применении пакетного

¹ В принципе, они могут быть заменены шурфами или траншеями

и особенно, импульсного режимов в условиях большого разбавления индикатора (опробования при откачках) или в средах с высокими рассеивающими свойствами (например, в трещиновато-пористых породах), надежность и информативность опыта резко падает и существенно ограничивается чувствительностью фиксации индикатора. По этой причине при использовании теплового индикатора следует ориентироваться на длительное поддержание постоянной возмущенной температуры в запускной скважине.

3.2.4. О целесообразных условиях постановки ОМО в свете влияния масштабных эффектов.

Как уже отмечено, масштабные эффекты обусловлены как естественными (неоднородность, гетерогенность), так и техническими (связанными с дефектами скважин, методов прослеживания и отбора пробы) факторами.

Характер проявления масштабных эффектов при ОМО всецело определяет надежность оценки параметров массопереноса и возможность их экстраполяции на прогнозные условия, т.е. саму целесообразность постановки данного вида работ. Масштабные эффекты могут сводиться в частности

1) к малой репрезентативности области индикаторного воздействия, слабо отражающей региональную изменчивость фильтрационных свойств пород;

2) к невыполнению предпосылки о сплошности опробуемой трещиноватой среды, особенно с учетом "каналового" механизма фильтрации и массопереноса в ней, что наиболее важно для трещинно-жильных и трещинно-карстовых водоносных комплексов;

3) к несоответствию масштабов, охваченных опытно-миграционными опробованиями, с одной стороны, и опытно-фильтрационными - с другой;

4) к резким различиям в характерных репрезентативных масштабах (временах) проявления отдельных механизмов массопереноса, таких, например, как конвекция в трещинах и диффузия в пористых блоках;

5) к сильной зависимости результатов от характера поступления индикатора в пласт и его отбора из скважины, - чем ближе он к "точечному", тем больше вероятность сильных не интерпретируемых флуктуаций и наоборот. Однако, увеличение объема пробы и соответственно, осреднение замера также имеет разумные пределы, так как оно означает снижение разрешающей способности эксперимента.

Таким образом, масштабные эффекты затрудняют или делают вовсе невозможным перенесение миграционных параметров определяемых при опробовании локальных участков на прогнозные условия. В наибольшей степени это относится к достоверности оценки активной емкости и параметров дисперсии, точнее - макродисперсии комплексов пористых (песчано-глинистых) пород. Поэтому здесь рекомендуется ограничиться лабораторным изучением поровой емкости образцов этого типа пород или даже априорным выбором ее характерных значений по аналогии, уделив максимальное внимание геофильтрационному расчленению пласта в полевых условиях и оценкам профильной анизотропии. Этой цели служат некоторые модификации индикаторных опытов, которые не ставят своей целью определение собственно миграционных параметров (ОФИО). К сожалению, такой альтернативы для гравийно-галечных пород в ряде случаев нет, что приводит к необходимости проведения в них достаточно длительных опробований. Имея, однако, ввиду необходимость специального обоснования значений используемых параметров при переходе к масштабу прогнозных оценок.

В противоположность сказанному, выйти на представительный масштаб опробования в комплексах трещиноватых пород позволяют высокие действительные скорости массопереноса обеспечивающие охват индикаторным воздействием достаточно больших объемов даже при относительно кратковременных экспериментах. Поэтому полевое опытное изучение миграционных параметров в комплексах трещиноватых пород представляется не только необходимым (по причине отсутствия альтернативы ему на уровне лабораторных экспериментов) но и вполне реальным. Большинство таких комплексов (прежде всего, осадочного генезиса), рассматриваемых в качестве наиболее интенсивных транспортеров загрязнителей, проявляют в масштабе прогнозных оценок хорошо выраженные гетерогенные свойства конвективного переноса вещества по трещинам сдерживается его диффузионным оттоком в межтрещинное - поровое пространство блоков. Такой миграционный процесс описывается в рамках моделей макродисперсии (разд. 1.3.2) разработанных для сред с двойной емкостью. Доказано, что в масштабе прогнозных оценок кинетика диффузионного обмена приводит к интенсивной дисперсии концентрационного фронта, нередко - более существенной нежели под влиянием фильтрационной неоднородности трещинного пространства. Этот факт является важным доводом в пользу эффективной экстраполяции получаемых в опытах результатов для прогнозирования процессов загрязнения подземных вод.

Априори пренебречь указанным обменным механизмом можно только при рассмотрении комплексов гомогенных ("скальных" - изверженных или сильно метаморфизованных осадочных) пород с пренеб-

режимом малыми значениями общей пористости блоков (μ_0), доступной для диффузии индикатора. Анализ процесса в такой среде может базироваться на модели микродисперсии (разд. 1.2), по крайней мере, в случае относительно равномерного характера трещиноватости.

С другой стороны, обращение к модели микродисперсии при интерпретации индикаторных опробований часто диктуется объективно ограниченным пространственно-временным масштабом опытов, недостаточным для проявления эффекта двойной пористости на выходных кривых. Расчетная схема микродисперсии является основной и при анализе переноса специальных индикаторов, слабо усваиваемых пористой матрицей. Необходимость в их применении может диктоваться как требованиями исследования поведения в пластах отдельных групп загрязнителей (например, высокомолекулярных органических веществ или коллоидов), так и необходимостью четкого выделения при опытных опробованиях механизмов чисто конвективно-микродисперсионного характера.

Очень сильные влияния масштабные эффекты могут оказывать на опробование трещиноватых пород макроблочной структуры, в которых трудно добиться соблюдения условий сплошности среды если индикатор распространяется по одной-двум основным водопрводящим трещинам. К тому же не вскрытым теми или иными скважинами, то опытные результаты затруднительно распространить на представительную область. Ситуация осложняется и неравномерностью распределения индикатора даже в пределах отдельно взятых трещин, где может доминировать "канальный" характер фильтрации, также резко снижающий возможности ОМО с позиций информационного обеспечения прогнозов. Тем не менее, даже отрицательный результат того или иного опробования - с точки зрения определения миграционных параметров - нередко должен восприниматься как полезный практический итог опыта: во-первых, он подчеркивает и выявляет сложную природу механизмов миграции в конкретных условиях, а во-вторых, позволяет обоснованию перейти к более крупномасштабным экспериментам, в том числе и на опытно-эксплуатационном уровне (ОМН).

4. ПЛАНИРОВАНИЕ И ПРОВЕДЕНИЕ ИНДИКАТОРНЫХ ОПРОБОВАНИЙ.

Полевому изучению процессов миграции предшествует их планирование, т.е. предварительное обоснование характеристик опытов, таких как расход нагнетания или откачки, расстояния до наблюдательных скважин, режим индикаторного сигнала, концентрация трассера и его тип, продолжительность опыта и некоторые другие. Эти показатели подбираются таким образом, чтобы в процессе опыта воспроизводилась та или иная расчетная схема, причем в оптимальном варианте она должна либо непосредственно отвечать уровню (масштабу) предполагаемых прогнозных задач, либо позволять оценить параметры, допускающие дальнейшую расчетную экстраполяцию и перемасштабирование. С другой стороны, применимость конкретной расчетной схемы определяется вероятными значениями миграционных параметров. Это предполагает этапность проведения индикаторных опробований и проверку правильности расчетной схемы на основе миграционных параметров, определяемых на первых этапах опробований, а также лабораторными экспериментами и по аналогии.

Отсутствие должного планирования индикаторных опробований часто делает эти эксперименты практически бесполезными.

4.1. Рекомендации к планированию общей схемы миграционного эксперимента и опытного куста.

При планировании ОМО и крупномасштабных ОФИО, направленных на численные оценки параметров, определяющих скорость миграции, в общем случае необходимо соблюдение следующей этапности в проведении работ:

- геолого-структурный анализ условий месторождения, определение задач проведения индикаторных опробований,
- выбор участка проведения работ,
- обоснование и устройство опытно-фильтрационного куста скважин,
- гидрогеофизические исследования в скважинах, направленные на изучение направления, интервалов и интенсивности движения подземных вод (расходомерия и резистивиметрия) в естественном и нарушенном режимах, а также характеристику технического состояния скважин,
- проведение опытно-фильтрационных работ, определение геофильтрационных параметров,
- планирование и проведение предварительных индикаторных

запусков при выполнении опытно-фильтрационных работ с целью оценки характера миграции, скоростей движения, возможной плановой фильтрационной анизотропии;

- выбор индикатора (комплекса индикаторов) для проведения индикаторного опробования;

- выбор вида фильтрационного возмущения при индикаторном опробовании;

- обоснование конструкции и размещения дополнительных скважин на опытно-фильтрационном кусте для проведения работ (или выбора имеющихся скважин);

- выполнение фильтрационных опробований и геофизических исследований в дополнительно пробуренных скважинах;

- обоснование длительности проведения опыта и режима запуска индикатора;

- проведение индикаторного опробования;

- интерпретация результатов.

При этом следует иметь в виду, что определение и уточнение задач исследований производится практически на всех стадиях, т.е. по мере выполнения комплекса работ состав задач может как сужаться, так и расширяться, что может потребовать возвращения к ранее выполненным стадиям.

4.1.1. Необходимая информация и проведение сопутствующих работ.

Для планирования полевых индикаторных экспериментов необходимо предварительное получение информации двух основных групп - первая включает характеристики гидрогеологических условий участка опробования, вторая связана непосредственно с техническим состоянием используемых скважин.

Основными характеристиками водовмещающей среды, используемыми для планирования работ являются: характер проницаемости пород, оценка уровня их неоднородности и представительных объемов (в пределах которых возможно осреднение свойств пород для использования в прогнозных расчетах), выделение интервалов преобладающего движения подземных вод, оценка направлений возможной анизотропии фильтрационных свойств, а также интенсивности и направления естественного потока. Часто для оптимальной постановки и, тем более, для интерпретации результатов работ (особенно в гетерогенных средах) необходимо получение количественных характеристик диффузионных параметров менее проницаемых блоков пород, а также оценка сорбционных параметров по лабораторным экспериментам.

С точки зрения технического состояния скважин необходимо получить и проанализировать информацию о внутрискважинных перетоках, возможности затрубных перетоков, а также оценить гидрохимическую инерционность скважин

Геолого-структурный анализ при планировании индикаторных опробований отталкивается от предварительной оценки характера строения водовмещающих пород на основе материалов разведочной геофизики описания керна и опробования при проходке скважин. Полезно также специально обследовать обнажения пород в естественных откосах и горных выработках. Все это позволяет выбрать оптимальные интервалы опробования и параметры опыта, установить характерные размеры блоков и трещин или зерен породы, мощности слоев, ориентировочно оценить общую трещиноватость (пористость) и ее доминирующие направления, тем самым получить независимые показатели для контроля опытных результатов. В тех же целях полезно привлекать результаты лабораторных определений и экспериментов, в том числе миграционной направленности.

Анализ материалов опытно-фильтрационных опробований на участках индикаторных экспериментов заметно упрощает обоснование пространственно-временных диапазонов опыта по известным значениям фильтрационных параметров. При этом такие материалы, сами по себе, могут характеризовать ожидаемую представительность и даже целесообразность ОМО.

Так, графики площадного прослеживания опытных откачек (нагнетаний) позволяют оценить возможное влияние плановой неоднородности и анизотропии фильтрационных свойств, а сильный разброс точек на этих графиках при опробовании трещиноватых пород часто свидетельствует о невыполнении предпосылки сплошности среды в пределах области, которая будет охвачена индикаторным возмущением, это обстоятельство может ставить под сомнение саму целесообразность ОМО или потребовать увеличения его масштаба.

Сопоставление расчетных фильтрационных параметров, полученных по данным площадного и временного прослеживания, позволяет судить о возможности перенесения результатов ОМО на область эффективного влияния откачки, размер которой по крайней мере на порядок превосходит размер области индикаторного воздействия на пласт. В этом смысле, явно предпочтительнее дуплетные опробования, оценивающие и фильтрационные, и миграционные параметры в пределах одного и того же участка водоносного пласта.

Так как при основных схемах ОМО на участке куста предварительно создается квазистационарный или стационарный фильтрацион-

ный режим, то к этой стадии миграционного опыта следует относиться как к опытно-фильтрационному опробованию достаточно высокого класса (хотя им охватывается обычно меньшая область пласта, чем при типичном фильтрационном опробовании), его оперативный анализ позволяет внести последние коррективы в схему ОМО

Гидрогеофизические исследования в опытных возмущающих и наблюдательных скважинах (расходомерия, резистивиметрия и термометрия) позволяют

1) детализировать гидрогеологическое строение опытного участка, выделить различающиеся по проницаемости профильные зоны для более обоснованного выбора опытных интервалов;

2) оценить интенсивность внутрискважинных перетоков и тем самым наметить оптимальные точки отбора проб и желательную степень их дифференциации вдоль ствола скважины;

3) оценить направление и скорость естественного ("бытового") потока подземных вод, а также осуществить предварительные оценки скоростей фильтрации в точках расположения наблюдательных скважин при фильтрационном возмущении,

4) вести непрерывное прослеживание индикаторной волны по наблюдательным скважинам при проведении индикаторных опробований,

5) оценить гидрохимическую инерционность пьезометров.

Особое место отводится гидрогеофизическим работам при оценке качества изоляции опытных интервалов и состояния фильтров скважин. В целом, гидрогеофизические исследования опытных скважин должны рассматриваться как обязательный элемент индикаторных опробований

Предварительные индикаторные запуски являются одним из наиболее информативных видов работ для целенаправленного планирования крупномасштабных ОМО и ОФИО. Они позволяют более точно оценить скорости потока, эффективную трещиноватость или пористость пород n , интервал активного массопереноса m_0 (при наблюдениях по стволу скважин), обосновать расчётную схему миграции и предварительно оценить параметры рассеяния (дисперсивность δ для условно гомогенных пород, комплексный параметр массообмена λ_m для трещиновато-пористых или коэффициент вариации проницаемости I_k для стратифицированных пористых гетерогенных пород), а также в первом приближении охарактеризовать параметр плановой фильтрационной анизотропии χ . В ряде случаев - для предварительных миграционных прогнозов при изучении месторождений подземных вод на ранних стадиях (поиски, предварительная разведка), для пористых гетерогенных пород в отсутствие профильной анизотропии или когда в ее определении нет

необходимости, для трещинно-жильных и трещинно-карстовых коллекторов - эти работы могут оказаться окончательным этапом полевого изучения миграционных процессов. Поскольку, как правило, они проводятся параллельно с кустовыми опытно-фильтрационными опробованиями (в виде запусков при откачках) и являются относительно недорогими видами исследований, требования к их планированию могут быть снижены. Выбор расстояний между опытными скважинами при этом проводится на основании приведенной в разделе 4.1.5 зависимости (4.1), в качестве индикаторов используются консервативные растворенные или нерастворенные (в зависимости от целей миграционных опытов, раздел 4.1.3) вещества.

4.1.2. Предпосылки к выбору опытных участков.

Опытные кусты должны располагаться в пределах представительной области пласта, где в реальных условиях загрязненные фильтрующиеся подземные воды будут находиться наиболее продолжительное время. С этих позиций, при опробовании трещиноватых пород концентрация опытных скважин вблизи поверхностных бассейнов и водотоков - источников загрязнения часто неоправданна. Проницаемость и степень трещиноватости здесь обычно повышены ввиду нетипичного состояния пород, значения фильтрационных и миграционных параметров в таких зонах могут оказаться несвойственными водоносному горизонту в целом. При наличии в пласте особых зон преимущественного переноса, их изучению должно отдаваться предпочтение.

Индикаторные эксперименты целесообразно приурочивать к участкам проведения кустовых откачек, максимально учитывая полученную по ним информацию при планировании ОМО. Вместе с тем, использование наблюдательных скважин фильтрационных кустов часто не исключает необходимости бурения дополнительных пьезометров, так как расположение контрольных точек при опытных откачках ориентируется на существенно отличные критерии.

Если же опробование будет проводиться на участке, ранее не изученном в структурно-геологическом и/или в фильтрационном отношении, то детальному планированию ОМО (в частности окончательному выбору схемы опытного куста) должны предшествовать

1) геолого-структурные исследования по разбуриваемым первым опытом скважинам с необходимым комплексом сопутствующих опробований (пилотная скважина будущего куста должна проходить с отбором керна и последующим комплексом геофизических исследований, включающих резистивиметрию и расходоimetriю), в тех же целях могут использоваться и поверхностные геофизические методы, привлекаемые уже на стадии выбора участка,

2) экспресс-опробования (в том числе гидрогеофизические) опытных скважин (разд. 4.2);

3) опытно-фильтрационное опробование, которое в случае предполагаемого кустового ОМО должно проводиться дважды - а) в виде пробного одиночного возмущения (после разбуривания первой-второй скважин куста) и б) в виде кустового опыта, который использует все скважины на участке (тем самым оценивается степень их гидравлической связи) и проводится в режиме, намеченном для последующего ОМО.

4.1.3. Предпосылки к выбору индикатора.

Полевые эксперименты должны проводиться с достаточно инертными и устойчивыми в природных водах индикаторами, легко определяемыми (желательно в полевых условиях) химическими или другими методами и мало влияющими на фильтрационные свойства пород¹. Индикаторные растворы не должны отличаться по плотности от пластовых вод. При изучении сорбционных свойств соединений в полевых условиях в качестве индикаторов используются именно эти соединения в сочетании с консервативными трассерами. Возможность приготовления больших объемов индикаторных растворов до опыта делает целесообразным применение легкодоступных и дешёвых трассеров. В то же время, выбор индикаторов определяется их способностью идентифицировать и оттенять те или иные особенности физических процессов внутрипластового массообмена при опробовании гетерогенных сред. Поэтому следует отдельно рассматривать химические (они дифференцируются в зависимости от физико-химических свойств растворов на растворённые и нерастворённые) и тепловые индикаторы. Выбор того или иного вида индикатора для опробования диктуется характером среды и целями исследований (табл. 4.1). Растворённые химические индикаторы являются более универсальными, и выбор той или иной их разновидности определяется технологическими возможностями и требованиями к пределам обнаружения и измерения при возможном существенном разбавлении индикаторного раствора. Однако, в трещиновато-пористых породах жёсткие ограничения пространственно-временных характеристик опробований (раздел 4.1.5) могут потребовать совместного применения растворённых химических индикаторов с тепловыми или нерастворёнными для раздельного изучения трещиноватости пород и параметров массообмена.

¹ Здесь не рассматриваются радиоактивные индикаторы, применение которых в полевых условиях часто связано со значительными трудностями организационного характера

Растворённые химические индикаторы.

Соли электролитов При опробовании водоносных горизонтов, содержащих пресную (с минерализацией менее 1 г/л) воду, предпочтение должно отдаваться легко растворимым хлоридным солям, таким, как NaCl , CaCl_2 , NH_4Cl и др. При использовании этих электролитов регистрируют хлор-ион, инертный практически ко всем типам горных пород. Концентрацию хлора в растворе определяют аргентометрическим титрованием, потенциометрическим (с использованием ионоселективного электрода) или поляризационными методами, последние позволяют замерять содержание ионов хлора непосредственно в стволе скважины. Наблюдения за распространением индикатора (электролита) могут осуществляться и по общей минерализации раствора при помощи резистивметрического каротажа скважин. Близким по миграционным свойствам к хлор-иону является ион брома, бромидные соли как индикатор могут широко применяться в водах с повышенным содержанием хлоридов, однако определение ионов Br^- требует применения более сложной методики.

При большом содержании хлоридов и бромидов в сильноминерализованных природных или загрязненных водах целесообразно использовать электролиты с анионными комплексами, нетипичными для подземных вод. Среди них следует особо выделить нитратные и нитритные соли (например, аммиачная и кальциевая селитры, нитриты натрия и калия). Нитратные и нитритные ионы в растворе достаточно просто определяются экспресс-калориметрическими методами (эталонные цветовые шкалы готовятся на пластовой воде). Надёжность измерения возрастает, если интенсивность окраски оценивается на фотокалориметре. Максимальная погрешность такого определения иона NO_3^- составляет 2 - 3 мг/л при его концентрациях в растворе в пределах первых десятков миллиграммов на литр, чувствительность анализа на ион NO_3^- примерно на порядок выше.

Органические красители (флуоресцеин, метиленовая синька, уранин, родамин, пиранин, лизатин ФФ, сульфародамин Б и др.) Основное преимущество этих индикаторов заключается в простоте визуальной и инструментальной регистрации, при этом возможна и скважинная калориметрия растворов с использованием специальных погружных зондов. Чувствительность определений весьма высокая, реально может быть зарегистрировано разбавление исходного продукта в миллион раз. Основные ограничения на интерпретацию ОМО с органическими красителями накладывает слабо предсказуемая (без специальных лабораторных экспериментов, воспроизводящих физико-химическую обстановку в пласте) их сорбция. Исследования 7 типов красителей [21] показали, например, что даже очень низкое содержание

гидроокислов железа, обычно развитых по трещинам кристаллических пород, приводит к их сильной адсорбции (потери могут составить до 40%). Наибольшую сопротивляемость к адсорбции в лабораторных условиях проявил сульфородамин Г.

Растворимые газы. В последнее время все более широкое применение при индикаторных исследованиях находит способ маркировки закачиваемых растворов растворенным гелием. Чувствительность его определения при низких естественных концентрациях в пресной воде достаточно высока и составляет $(1-5) \cdot 10^{-6}$ мл/л. К достоинствам данного индикатора также можно отнести его компактность (в сжатом состоянии), что позволяет осуществлять очень длительные запуски с постоянным поддержанием концентрации индикатора в точке запуска. В то же время применение данного индикатора требует специального оборудования скважин с целью обеспечения герметичности системы подачи индикатора в пласт для предотвращения его потерь в атмосферу (рис. 3.2).

Нерастворенные химические индикаторы

Полимерные коллоидные растворы обладают пониженной проникающей способностью (коэффициент молекулярной диффузии для них часто на несколько порядков ниже, чем у солей электролита). Типичным представителем этого класса соединений является полиакриламид [13]. Использование таких соединений в гетерогенных трещиновато-пористых породах позволяет избежать эффектов поглощения индикатора пористыми блоками и интерпретировать опыты в рамках гомогенных расчетных моделей (соответствующие параметры используются, в частности, непосредственно для прогнозов миграции коллоидных частиц и механических взвесей). При этом открываются возможности независимой оценки параметров активной трещиноватости и микродисперсии, которые являются контролирующими при анализе результатов опробования трещиновато-пористых сред в макродисперсионном режиме.

Нерастворимые полимеры. Особым типом полимерных индикаторов являются дневные флуоресцентные пигменты (ДФП) на основе меламина-толуолсульфамидформальдегидного полимера, разработанные Ростовским гидрохимическим институтом. Эти индикаторы представляют собой разноокрашенные нерастворимые флуоресцирующие частицы микронных размеров, индикация и подсчет содержания которых в трассерной жидкости производится с помощью специального микроскопа на фильтре, через который она предварительно профильтровывается. Достоинствами данного индикатора является высокая степень обнаружения даже в очень малых количествах, возможность одновременного запуска (и обнаружения) трассеров разного

окрашивания в несколько скважин одновременно, что делает их очень удобными для применения в индикаторных запусках с целью исследования плановой и профильной анизотропии, изучения плановой неоднородности в трещинно-карстовых породах. При применении в трещинно-пористых породах анализ характера выходных кривых данного индикатора позволяет разделять характеристики отдельных зон трещиноватости, поскольку он мигрирует практически только по открытым трещинам. В то же время в последнем случае затруднены количественные характеристики параметров рассеяния из-за возможного необратимого поглощения части индикатора пористыми блоками. Полная безвредность индикатора позволяет применять его на участках действующих водозаборов.

В качестве нерастворенных индикаторов с близкими к ДФИ свойствами могут также использоваться споры и пыльца растений.

Тепловые индикаторы.

Применение этих индикаторов оправдано в комплексах трещиноватых и трещиновато-пористых пород, так как изучение искусственно создаваемых тепловых полей позволяет подойти к оценке геометрических характеристик породных блоков. Это необходимо, прежде всего, если реальные масштабы опробования с химическими индикаторами не позволяют вывести опыт на режим, при котором ощутимо проявляется обмен между трещинами и блоками.

Тепловые индикаторы имеют и другие преимущества (по сравнению с солевыми):

- а) исключаются сорбционные эффекты;
- б) появляется возможность непрерывного и дегазного слежения за индикатором *in situ* по стандартным термодатчикам, обеспечивающим точность замеров температуры не менее $0,05^{\circ}\text{C}$;
- в) отпадает необходимость приготовления больших объемов солевых растворов.

Недостатки теплового индикатора обусловлены влиянием естественной конвекции в пласте и в стволе скважины, возможными тепловыми потерями при перемещении индикатора по инъекционной скважине к опытному интервалу, возможностью изменения фильтрационных свойств пород за счет термических деформаций блоков, повышенной продолжительностью опытов.

При изучении геотермальных резервуаров применяются термостойкие трассеры, которыми являются трифторметилы, сульфаты, метилы, фториды, карбоксилы. Наибольшую устойчивость к высоким температурам (около 300°C) проявляют сульфаты, метилаты и карбоксилаты.

4.1.4. Выбор вида фильтрационного возмущения при опробовании и конструкции опытного куста.

Выбор вида фильтрационного возмущения в первую очередь определяется целями проводимых индикаторных опробований, поскольку разные режимы подчёркивают в большей или меньшей мере определённые миграционные процессы (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Вид опробования	Изучаемые факторы и процессы	Изучаемые параметры	
		при ОМК	при ИОФН
Запуск при откачке	Конвекция, микродисперсия, плановая анизотропия	Пористость, трещиноватость, Оценка параметров микродисперсии	Параметр плановой анизотропии, коэффициент вариации проницаемости
Налив (наливание)	Конвекция, микродисперсия, макродисперсия, плановая анизотропия	Пористость (трещиноватость), параметры микродисперсии и массового обмена	Коэффициент вариации проницаемости, параметр плановой анизотропии, профиль распределения скоростей*
Горизонтальный дуплет	Конвекция, макродисперсия	Пористость (трещиноватость), параметр массового обмена	Коэффициент вариации проницаемости, профиль распределения скоростей*
Опосредованное опробование	Конвекция, макродисперсия	Приведённые параметры микродисперсии и массового обмена	Не проводятся
Вертикальный дуплет и инфильтрационное заземление	Вертикальная конвекция	Не проводятся	Параметр профильной анизотропии скоростей
Конверт	Вертикальная конвекция в зоне аэрации	Не проводятся	Скорость вертикальной миграции
Двойной дуплет	Горизонтальная и вертикальная конвекция	Пористость (трещиноватость), параметр профильной анизотропии скоростей	

* при проведении наблюдений по стволу наблюдательных скважин

При изучении неглубоко залегающих горизонтов (до нескольких десятков метров) предпочтение следует отдавать экспериментальной схеме запуска при наливе, причём опытный куст должен включать не менее четырёх наблюдательных скважин, расположенных по двум лучам. Один

излучений ориентируется по естественному потоку подземных вод, другому - в ортогональном к нему направлении. Для опробования водоносных пластов, залегающих на относительно больших глубинах, эта схема малоэффективна, главным образом, по причине значительного возрастания объемов бурения (если нет подходящих для проведения наблюдений скважин, пробуренных ранее с иными целями), что ведет к удорожанию работ в целом. Поэтому более приемлемым для таких условий является дуплетное опробование. Ориентировочное изучение миграционных параметров трещиновато-пористых пород с низкими массообменными показателями на больших глубинах может базироваться также на экспериментах по однокважинной схеме "налив-откачка" с вытеснением индикатора в пласте [13]. Комплекс параметров, доступных изучению при тех или иных видах фильтрационного возмущения, представлен в таблице 4.2

Таблица 4.2

Определяемые параметры	Вид опробования	Режим запуска	Индикатор (рекомендуемый)
Трещиноватость и пористость пород	Дуплет, кустовой налив, запуск при откачке	Постоянный и импульсный пакетный	Химический растворенный
Параметр дисперсии	Кустовой налив (нагнетание), запуск при откачке	Постоянный и импульсный пакетный	Химический растворенный
Комплексный параметр массообмена	Кустовой налив, дуплет, относительное опробование	Постоянный и импульсный пакетный	Сочетание теплового с химическим и из растворенных с полимерными
Параметр профильной анизотропии	Вертикальный или двойной дуплет, по ювенильное засоление	Постоянный и импульсный пакетный	Растворенный и полимерный (взвешенный)
Параметр плановой анизотропии	Запуск при откачке, кустовой налив	Импульсный пакетный	Химический растворенный и полимерный
Изучение профиля проницаемости	Запуск при откачке, кустовой налив	Пакетный и импульсный	Химический растворенный
Изучение параметров сорбции	Кустовой налив, дуплет	Пакетный и постоянный	Сочетание химических консервативных и неконсервативных
Изучение скорости движения в зоне арации	Налив в зону арации (конверт)	Пакетный	Консервативные а также сочетание их с бактериально окрашенными

Планирование расхода возмущения.

При планировании расхода откачки или нагнетания следует исходить из оценок ожидаемого изменения напора в дальней наблюдательной скважине, которое не должно быть слишком малым (не менее нескольких десятков сантиметров); тем самым, с ростом расхода увеличиваются масштаб опробования и зона, незатронутая сильным влиянием естественного потока; при дуплетном опробовании имеет смысл ориентироваться на перепад напоров между скважинами дуплета, обеспечивающий средний градиент потока порядка 0,05 - 0,1. Вообще же, не следует излишне завышать расход (особенно - для трещиноватых и трещиновато-пористых пород), так как форсированные режимы опыта имеют свои недостатки - возможное нарушение линейного закона фильтрации, конвекция в пористых блоках пород и т.п.[13].

Неизбежные погрешности планирования индикаторных опытов по вероятным значениям миграционных параметров делают целесообразным проведение эксперимента в трещиноватых породах при нескольких различающихся режимах (расходах нагнетания).

Планирование схемы куستا

Типовые схемы размещения скважин для различных видов фильтрационных возмущений представлены на рис. 4.1

При опытах с наливом индикатора в центральную скважину, в диапазоне $r_{min} - r_{max}$ может сравнительно равномерно располагаться 3 - 4 наблюдательных скважины. При дуплетных опытах (как горизонтальных, так и вертикальных) также рекомендуется использовать 1 - 2 промежуточные наблюдательные скважины по оси дуплета (что при не слишком больших глубинах опробования представляется вполне приемлемым), их целесообразно располагать в интервале $(0,1 - 0,4)r$ от запускной скважины ($2r$ - расстояние между скважинами "дуплета"). При дуплетной схеме также желательно предусматривать дополнительные скважины позволяющие провести опыт при различных размерах зоны опробования. а конструкции опытных скважин при существенной роли естественного потока должны позволять изменять направленность режима нагнетания-откачки. В целом, целесообразно планировать взаимозаменяемость опытных скважин

При проведении запусков с целью изучения площадной анизотропии рекомендуется, чтобы скважины запуска (при наливач - скважины для наблюдения) по различным лучам располагались на примерно одинаковых расстояниях от откачивающей (наливной) скважины. В противном случае для интерпретации результатов может потребоваться характеристика и учёт процессов рассеяния, которые могут

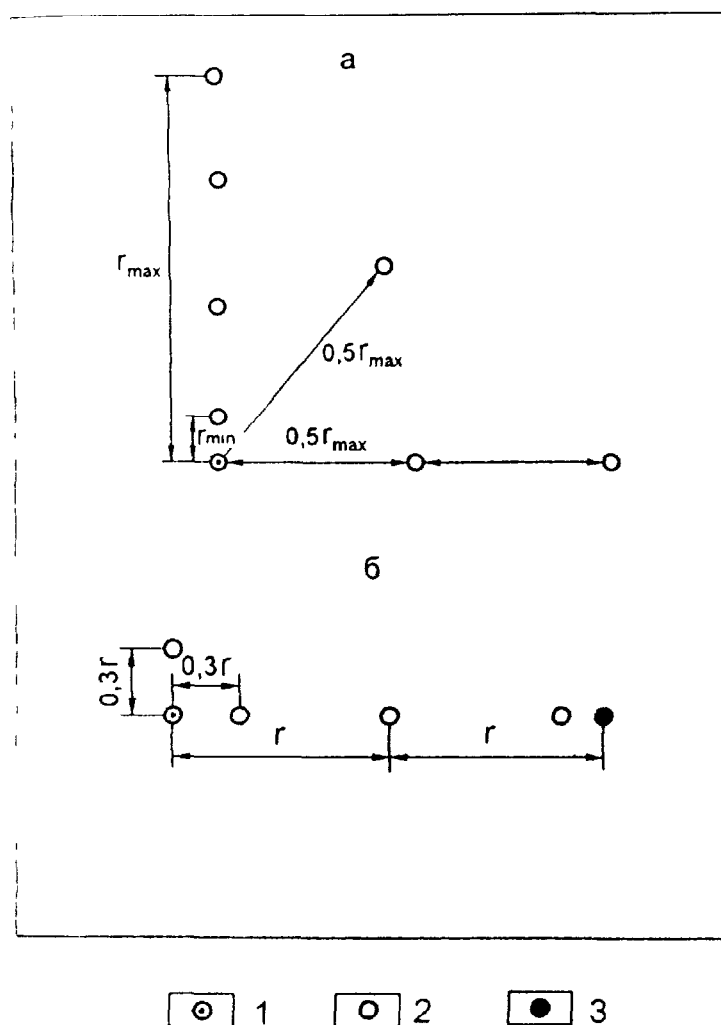


Рис. 4. Типовые схемы размещения скважин при ОМО
 а - для схемы налива (налив-гашения) индикатора, б - для дуплетного опробования
 1 - скважина налива, 2 - наблюдательные скважины,
 3 - скважина откачки

значительно смешать во времени точки фиксации максимальных концентраций

Для вертикальных запусков наличие промежуточных пунктов наблюдения нежелательно так как проходка дополнительных скважин может способствовать образованию искусственных путей миграции трассера

4.1.5. Предварительное обоснование пространственно-временного масштаба опробования.

Расстояние между скважинами, в частности, максимальное расстояние между точками ввода и отбора индикатора должно увязываться с намеченной продолжительностью эксперимента специальными равноточными расчетами. Если используются уже пробуренные (для опытных откачек) скважины то расчетом ищется требуемая длительность опыта наоборот для специально проходных опытно-миграционных кустов расчетом обычно оценивается максимальный размер зоны опробования, исходя из разумной оптимальной продолжительности эксперимента - порядка нескольких суток или первых недель - и с учетом искажающего влияния естественного потока. Поскольку пространственно-временной масштаб опробования должен зависеть от необходимого представительного объема пласта, в пределах которого осредняются миграционные параметры, он существенно различается для разных типов строения водовмещающих пород.

Гомогенные породы.

Максимальное расстояние (l_{max}) между опытными скважинами (собственно, масштаб опробования) зависит от широкого спектра технических факторов - продолжительности опробования, мощности насосного оборудования - расхода откачки, намеченного к запуску объема индикатора и чувствительности его фиксации, отношения расхода откачки к скорости естественного фильтрационного потока и ориентации относительно него наблюдательного тупа. Учитывая при планировании все вытекающие отсюда ограничения, следует принимать величину l_{max} близкой к максимально-допустимому по ним пределу, так как масштаб опробования - решающий показатель его качества (разд. 3.2). Вместе с тем, трудности априорного учета всех этих ограничений делают наиболее эффективным опытный подбор величины l_{max} . Это среди других факторов, определяет необходимость проведения предварительных индикаторных запусков при откачках (с бурением дополнительных скважин на последующих стадиях проведения работ).

Расчетные зависимости определяющие области распространения индикаторного раствора существенным образом различаются при проведении ОМО и ОФИО с преимущественным горизонтальным (плановым) перемещением индикатора и при ОФИО нацеленным на характеристику субвертикальной миграции (при профильном характере движения индикатора)

Опыты с субгоризонтальным движением индикатора

Максимальное расстояние ($l_{\max}$) между центральной и наиболее удаленными скважинами опытного куста выбирается исходя из оптимальной продолжительности (t) эксперимента. При опробовании гомогенных пород для этого используется формула

$$l_{\max} = \sqrt{qt / \pi i} \quad (4.1)$$

не учитывающая диффузию вещества в пористые блоки (при дуэтом опробовании значение $l_{\max}$ увеличивается примерно в 2 раза). Далее на эту оценку $l_{\max}$ должно быть введено дополнительное ограничение принимающее во внимание недопустимость интенсивного расхода индикатора естественным потоком (разд. 6.4.1). Качество опытов повышается при ориентации луча скважин или оси "дуэта" по направлению естественного потока, что снижает его искажающее влияние.

Во всех вариантах минимальные масштабы опробования $l_{\min}$ должны удовлетворять требованиям сплошности среды для трещиноватых пород, это равносильно условию, что отношение $l_{\min} / m_i$ или $l_{\min} / \delta$ (m_i - размер блока, δ - константа микродисперсии) примерно отвечающее характерным числам Пекле имеет порядок, как минимум нескольких десятков.

При пренебрежимо малой емкости пористых блоков в трещиноватых породах распространение индикатора характеризуется сравнительно большими скоростями, так что за несколько суток реально может быть охвачена зона радиусом в десятки, а иногда и первые сотни метров. При отсутствии предварительной информации о величине трещиноватости приближенно можно принимать, что $l \approx (10-20)\sqrt{qt}$ [м], где t [сут] - время прихода основной массы индикатора к скважине, удаленной на расстоянии l от центральной (при дуэтом опробовании здесь под величиной l следует понимать половину расстояния между скважинами), q - Q/m - приток на единицу мощности опробуемого интервала (приведенный дебит).

Опыты с вертикальным движением индикатора

В силу относительно низких вертикальных градиентов и сильной "растянутости" процесса во времени, кратчайшее расстояние между фильтрами скважин по вертикали не должно превышать в пористых породах - 5-10 м, в трещиноватых - 20-30 м

Гетерогенные породы

Для трещиновато-пористых пород необходимы дополнительные разведочные расчеты, учитывающие свойства пористых блоков. При этом предварительный выбор емкостных и массообменных параметров блоков не может основываться на априорных предположениях первоначально значение здесь имеет оценка таких показателей, определяющих интенсивность миграции трассера в блоках пород как характерные размеры (m_0) блоков, их пористость (n_0) и коэффициент молекулярной диффузии D_0 . Последние два показателя вполне надежно определяются лабораторными опытами на образцах, отобранных из скважин на опытном участке - причем оценки D_0 выполняются с трассерными растворами, которые предполагается использовать в полевых экспериментах.

При доминирующей емкости блоков, уже через относительно короткое время значительная доля индикатора усваивается порами и скорость его продвижения по трещинам существенно определяется интенсивностью процессов молекулярной диффузии. Для грубо ориентировочных оценок можно считать, что для трещиновато-пористых пород при характерной пористости 20-30% и времени, измеряемом первыми сутками, целесообразное максимальное значение $r[m]$ имеет порядок $10\sqrt{qm_0}$, где m_0 - характерный размер блоков м, q - Q/m - приведенный дебит, м³/суг. Характерно, что при опробовании трещиновато-пористых комплексов с довольно высокими массообменными свойствами ($\lambda_m \sim 10^{-2} - 10^{-1}$ суг⁻¹) время t_1 в очень сильной степени зависит от расстояния r между скважинами $t_1 \sim r^2$, в то время как в чисто трещиноватых породах $t_1 \sim r^2$.

Трудности выбора оптимального расположения наблюдательных скважин в этих условиях могут приводить к осложнениям противоречивого свойства. Так, при излишне большом удавлении пьезометров (время t_1 велико) скорость переноса будет полностью определяться диффузией индикатора в блоки. Наряду с увеличением требуемой продолжительности опыта, это приведет к тому, что значения активной трещиноватости окажутся практически неопределенными. Для исправления ситуации полезно тогда повторить опыт с индикатором не усваиваемым блоками (например некоторые полимеры [13]). Наоборот при слишком близком расположении пьезометров диффузия в блоки выражена недостаточно четко, а взаимное наложение молекулярного

переноса в блоки и гидродисперсии по трещинам делает опыт трудно интерпретируемым. В этом случае для повышения информативности опыта целесообразно повторить его с тепловым индикатором, который усваивается блоками намного интенсивнее.

Результаты лабораторных определений, наряду с геологическим структурным анализом, призваны обеспечить планирование таких опытных условий, при которых данные ОМО могли бы однозначно интерпретироваться в рамках расчётных гетерогенных моделей, пренебрегающих ролью микродисперсии в пределах трещинного пространства.

Выбор минимального расстояния между центральной и наблюдательными скважинами, обеспечивающего подчинённую роль дисперсионного рассеяния в трещинах, основывается на выполнении критерия:

$$r > r_{\min} \approx \sqrt{qn' \lambda_m} \quad (\lambda_m = S_b^2 D_m n_1) \quad (4.2)$$

Критериальное соотношение (4.2) может использоваться и для планирования дуплетного опробования, при этом допустимое минимальное расстояние между скважинами "дуплета" должно увеличиваться примерно вдвое.

Как видно, в породах с относительно низкими массообменными параметрами масштаб опробования должны быть весьма значительными. Например, при различиях в ёмкости пор и трещин в пределах одного порядка ($n_0 < 10^{-4}$) и при параметре $D_m \sim 10^{-5} \text{ м}^2/\text{сут.}$, величина $r_{\min}$ нередко будет измеряться многими десятками и даже первыми сотнями метров.

Таким образом, в ряде случаев опыты с химическими индикаторами ограничены жёсткими требованиями и их планирование не является тогда гарантией приемлемого варианта размещения скважин (или приемлемых временных диапазонов для уже оборудованных точек наблюдений). Скорее всего, такое положение может возникнуть при изучении миграционными опытами трещиновато-пористой среды с низкими массообменными параметрами ($\lambda_m < 10^{-5} \text{ су}^{-1}$), которая, вместе с тем, не может трактоваться как гомогенная трещиноватая среда. В этой ситуации в проектируемой схеме опыта должны быть предусмотрены возможности: а) использования теплового трассера, б) реализации процедуры выставления индикатора в пласте с последующей его откачкой на поверхность.

Так как кондуктивный прогрев пористых блоков происходит намного интенсивнее, чем их диффузионное насыщение солями, то такой эксперимент даёт рельефную оценку параметра теплообмена

$\lambda_1 = S_1 \cdot a_1 (C_1 - C_w)$ где a_1 - коэффициент температуропроводности блоков C_b и C_w - объемные теплоемкости воды и блоков. Все эти теплофизические коэффициенты легко устанавливаются в лаборатории (для приближенных оценок могут использоваться и табличные данные), так что пересчетом находится удельная поверхность S_b . Далее зная D_1 и m_0 можно найти искомую величину λ_m . Для снижения тепловых потерь в породе окружающие опробуемый интервал, его мощность должна составлять не менее $m_{\min} \sim 0.3 (a_b t_c)^{1/2}$ где t_c - предполагаемое время опыта, существенно возрастающее в сравнении со случаем химического трассера, в первом приближении $t_c \sim (0.7 - 0.8) \pi^2 q$.

Применение тепловой метки позволяет одновременно резко повысить надежность контроля выходных кривых в инерционных наблюдательных скважинах с некачественными фильтрами (разд. 6.4.2). Более того нередко возможно использование бесфильтровых колонн что позволяет исключить влияние на результаты опытов неучтенных внутрискважинных перетоков.

Односкважинная схема эксперимента позволяет достаточно надежно идентифицировать обменные процессы при выполнении критерия $t^* = 0.1 \pi^2 \lambda_m / (t^{**})$ - время выстаивания индикатора в пласте).

4.1.6. Обоснование интервалов опробования и конструкций скважин

При постановке ОМО (за исключением специальных случаев суммарного опробования стратифицированных пористых пластов) нежелательно объединение одним опытным интервалом нескольких зон в разрезе пласта, заметно различающихся по своим фильтрационным параметрам (здесь например, следует учитывать характерные тенденции к уменьшению степени трещиноватости пород с глубиной, а также резко повышенную проницаемость карбонатных пород вблизи уровня грунтовых вод). Вынужденное осреднение скорости фильтрации и концентрации индикатора неизбежно приведет к серьезным ошибкам. Наиболее эффективное и целенаправленное распределение расхода нагнетаемой в пласт индикаторной жидкости по стволу скважины достигается использованием тампонов и пакеров. С другой стороны, соблюдение условия сплошности трещиноватой среды предполагает наличие не слишком малого количества водопроводящих трещин, пересекаемых скважиной, в интервале опробования. В противном случае интерпретация опытов остается весьма неопределенной и их лучше заранее ориентировать на условия максимально приближающиеся к опытно-эксплуатационным, - на длительное опробование всего водоносного

комплекса или той его части, которая будет вскрываться эксплуатационными скважинами

В тех случаях, когда используемые технические средства и скважины не позволяют произвести локализацию возмущения и запуска индикатора в одном интервале, для расшифровки данных опробования необходимо получение дополнительной информации о распределении расходов и концентрации индикатора при опробовании по профилю пласта. Тем не менее, интерпретация результатов опробований при этом существенно осложняется за счет возможных проявлений массообмена и выравнивания концентраций между слоями различной проводимости путем поперечного рассеяния.

Запуски трассеров в отдельные интервалы пласта целесообразно осуществлять лишь при наличии сведений о фильтрационных свойствах пород в этих интервалах и при обеспечении опыта системой поинтервального прослеживания миграции индикатора, не требующей, к тому же, для определения его концентрации откачивания значительных объемов воды (например, геофизическими методами). В противном случае, при отборе пробы происходит дополнительное разбавление индикатора пластовой водой из зон, не охваченных индикаторным возмущением, отсюда - видимое увеличение дисперсионных эффектов. Вообще же, во всех сомнительных ситуациях лучше увеличить длину опытного интервала, нежели неоправданно уменьшать ее.

В любом случае длина опытного интервала должна превышать 1 - 2 м - для химического индикатора и 5 - 8 м - для теплового, что позволяет ограничить влияние оттока индикатора за пределы опробуемой профильной зоны пласта.

Оборудование опытных скважин должно ограничить или полностью исключить различные случайные вертикальные перетоки жидкости как в стволе скважины, так и по ее заглубленному пространству - за пределами выделенного опытного интервала. Это достигается увеличением числа опытных интервалов, обособленных посредством затрубной цементации или глинизации. Качество эксперимента также улучшается при оборудовании специальных секционных пьезометров, позволяющих устранить перемешивание воды в стволе скважины (за счет воды из нерабочей ее части) и отдельно оценить концентрацию индикатора в каждой секции путем прямого отбора проб или гидрогеофизическими методами.

Как видно из сказанного, выбор и изоляция опытных интервалов часто сопряжены с большими трудностями. Более того, именно эти трудности объясняют неудачи многих экспериментов с индикаторами, особенно в трещиноватых породах. Относительно чаще от таких неудач гарантированы опыты в изолированных интервалах, вскрывающих во всех

скважинах один и тот же элемент водоносной системы и ограниченных сверху и снизу выдержанными слабопроницаемыми слоями (зонами). И наоборот, при несоблюдении этих условий всегда имеется большая вероятность, что качество ОМО окажется низким и поэтому целесообразность их проведения сомнительна (особенно если намечаемые эксперименты - дорогие и трудоемкие).

4.2. Проведение индикаторных опробований.

4.2.1 Предварительное гидрогеофизическое опробование скважин опытно-миссионерских кустов

Перед предварительными испытаниями ставятся несколько задач:

- 1) детализация гидрогеологического разреза и выделение зон преимущественного переноса индикатора на основе чего производится окончательный выбор интервалов индикаторного опробования;
- 2) определение направления и скорости естественного фильтрационного потока;
- 3) оценка показателей скин-эффекта наблюдательных скважин или комплексного параметра их гидрохимической инерционности;
- 4) оценка качества оборудования опытных скважин, направления и интенсивности внутрискважинных и затрубных перетоков;
- 5) оценка приспосабливаемости наблюдательной скважины;
- 6) обоснование глубин размещения точек гидрохимического опробования и контрольной аппаратуры;
- 7) уточнение предварительно запланированных характеристик, в частности - расхода.

Для решения этих задач применяются гидрогеофизические методы исследования скважин.

Гидродинамическое расчленение разреза основывается преимущественно на расходомерии скважин опытного куста. Для повышения чувствительности этого метода в некоторых случаях прибегают к изоляции отдельных интервалов пакерными устройствами и производят исследования при наливке воды через устье скважины.

При отсутствии выявленных расходометрией интенсивных внутрискважинных перетоков, целесообразно проведение резистивиметрии с засолением в естественном режиме. Это позволяет получить дифференцированные по вертикали значения скоростей фильтрации.

$$v = \frac{\pi d_c}{4\xi t} \ln \frac{C_{oc} - C^0}{C_c - C^0} \quad (4.3)$$

где C_0 , C^0 и C_{oc} - соответственно, текущая, фоновая и исходная (сразу после засоления) концентрации вещества. Для требуемых в этом случае качественных оценок, параметр ξ , отражающий “скин-эффект”, может приниматься по данным об аналогичных скважинах опытно-фильтрационных кустов, а затем - уточняться резистивиметрией в возмущенном режиме, когда скорость в точке расположения пьезометра считается известной ($q_i = Q/2\pi nr$).

В последнем варианте определяется обобщенный параметр гидрохимической инерционности (разд.6.4.2):

$$\alpha = \frac{Ql}{2\pi nr^2 n} \left(\ln \frac{C_{oc} - C^0}{C_c - C^0} \right)^{-1}, \quad (4.4)$$

где для предварительных оценок значение n может быть определено по данным лабораторных испытаний (в пористых породах) или по аналогии; в дальнейшем его можно уточнить по результатам основного эксперимента.

Таким образом, с помощью резистивиметрии осуществляется предварительная тарировка наблюдательных скважин. Она дополняется экспресс-наливами в них, позволяющими определить сопротивление прискважинной зоны (ξ).

Надёжность результатов резистивиметрии повышается при исключении вертикальных перетоков вдоль ствола скважины, а также эффектов плотностной конвекции (наведенных при засолении), что достигается изоляцией интервала наблюдений за рассолением (например, тампонами или подвижными эластичными манжетами, плотно прилегающими к стенкам скважины).

Так как подаваемый в скважину индикаторный раствор часто имеет отличную от пластовой воды температуру, то данные термометрии в скважинах позволяют получить дополнительную информацию о степени профильной фильтрационной неоднородности пород и о некоторых характерных чертах опытного процесса. Так, на термограммах фиксируются интервалы с повышенной (или пониженной) фильтрующей способностью. Наблюдения за восстановлением температуры в стволе эксплуатационной скважины - после прекращения опытного воздействия - позволяют выделить профильные зоны, различающиеся по проницаемости. Термометрия наблюдательных скважин является и наиболее доступным методом оценки качества затрубной цементации

4.2.2. Запуск трассера и наблюдения за его миграцией

Основные приёмы и схемы запуска индикатора представлены на рис. 4.2.

При кратковременных (импульсных) запусках индикаторный раствор, заливаемый в наблюдательную скважину, должен быть полностью вытеснен из нее в пласт путем налива сверху чистой воды - в количестве двух-трёх обводненных объёмов скважины. Для запусков трассера целесообразно использовать специальные трубки, опускаемые в скважину на нужную глубину (рис. 4.2а), в этом случае минимизируется смешение и разбавление трассерного раствора содержащейся в колонне водой. Наиболее равномерное распределение индикатора достигается при изоляции опытного интервала от остальной части ствола.

При наливах (нагнетаниях) и дуплетных запусках индикаторный раствор и закачиваемая вода могут подаваться в скважину отдельно или после предварительного смешения в резервуаре (рис. 4.2б); последний вариант предпочтителен, так как позволяет вести непрерывный контроль за граничной концентрацией и обеспечивает лучшее перемешивание. Следует обратить особое внимание на то, что при этом необходимо обеспечить наименьшие возможные отклонения концентрации трассера в нагнетаемой воде в течение запуска от среднего значения, что достигается применением дозиметров различных конструкций (рис. 4.3), обеспечивающих равномерную подачу индикатора в резервуар для смешивания. При использовании в качестве индикаторов растворённых газов система обвязки скважин должна обеспечивать полную герметичность водовода от точки ввода индикатора до фильтра нагнетательной скважины. Если при этом расход налива значительно меньше приёмной способности запускной скважины (скважина заполняется подаваемой водой не полностью), во избежание потерь газа в воздушное пространство над уровнем подземных вод необходимо обеспечить подачу индикаторного раствора непосредственно к фильтру скважины (рис. 4.2в).

Проведение миграционного опыта при наливе связано с систематическим отбором проб из наблюдательных скважин и последующим их химическим анализом с целью определения концентрации индикатора. Параллельно ведется отбор и из скважины (ёмкости) для запуска индикатора - для контроля стабильности граничной концентрации. При понтервальном опробовании отбор осуществляется в пределах выбранного интервала, при суммарном - в нескольких выделенных интервалах. С целью устранения гидрохимической инерционности наблюдательных скважин, как правило, следует проводить кратковременную предварительную прокачку скважины (опытного интервала) с выбором 2-3 её (его) объёмов. Наиболее качественный отбор проб

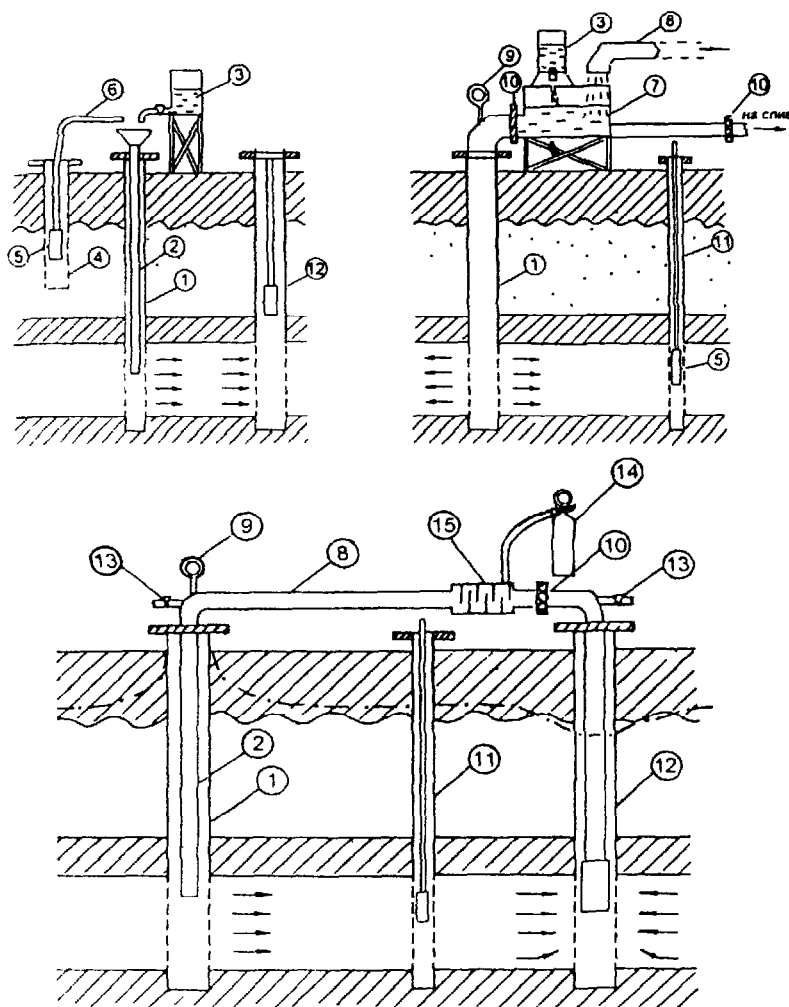


Рис. 4.2 Схемы проведения индикаторных запусков при различных режимах фильтрационного возмущения: а - запуск при откачке, б - налив (нагнетание), в - дуплет

1 - скважина для запуска индикатора, 2 - колонна (пьезометр) для подачи индикатора, 3 - дозатор с индикатором, 4 - вспомогательная скважина, 5 - малогабаритный насос, 6 - водовод для подачи воды в пласт, 7 - емкость (смеситель), 8 - водовод для подачи нагнетаемой воды, 9 - манометр, 10 - задвижка, 11 - наблюдательная скважина, 12 - скважина для откачки, 13 - кран отбора проб, 14 - дозатор подачи газового индикатора, 15 - смеситель газового индикатора

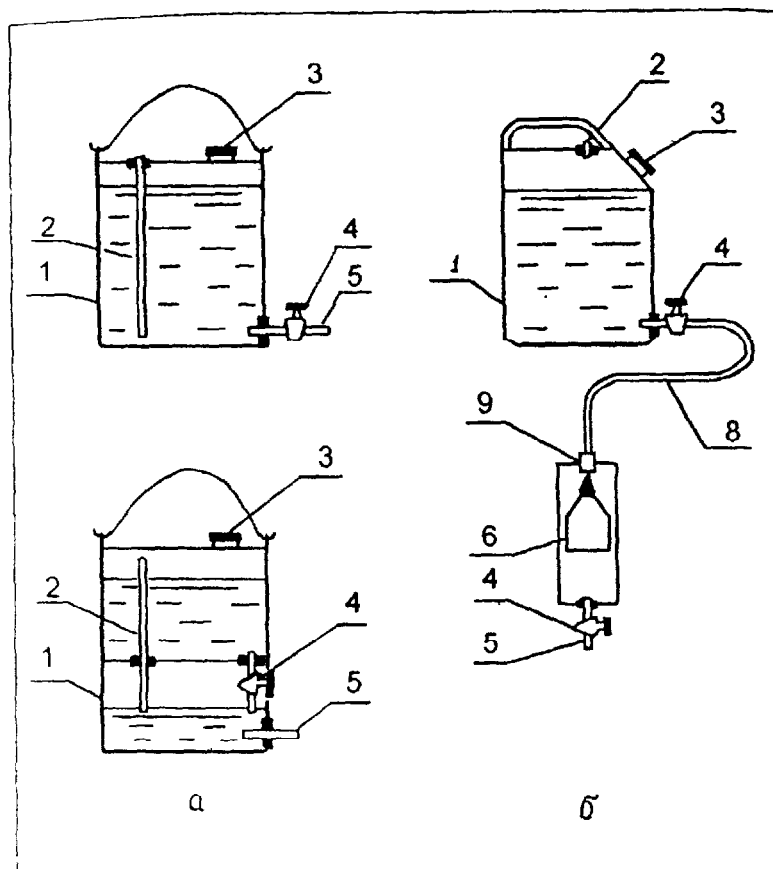


Рис 4 3 Примеры конструкций дозиметров для подачи растворимых индикаторов.
 а) по принципу сосудов Мариотта, б) с поплавковым затвором

1 - емкость, 2 - воздушная трубка, 3 - пробка, 4 - кран, 5 - сливная трубка,
 6 - поплавок 7 - затвор, 8 - гибкий шланг

достигается при использовании пакеров или так называемых секционных пьезометров.

В потоках пресных вод при применении солевого индикатора его регистрацию можно вести по общей минерализации воды с помощью скважинного резистивиметра. Преимущества резистивиметрического контроля особенно очевидны, когда при миграционных работах необходимы данные о неравномерном продвижении индикатора по профилю неоднородному пласту. Аналогичными достоинствами обладает и термометрический контроль миграционных опытов с тепловым индикатором. При этом, как правило, исключается влияние инерционности измерительной системы на точность получаемых результатов.

Частота наблюдений должна обеспечивать построение представительной выходной кривой, особенно детальной в области времени основного прихода трассера к точке наблюдения. При невозможности определения выходных концентраций трассера непосредственно при проведении опытов, для оценки времени его прохождения от точки запуска к точке наблюдений проводятся предварительные импульсные запуски флуоресцентных красителей (с визуальным наблюдением за появлением индикатора) или солевых индикаторов (с резистивиметрическим контролем). После этого оценивается эффективная пористость пород (по зависимости $4l$) и предварительными расчётами для схемы опыта определяется интервал сгущения отбора проб. Обычно для расчёта миграционных параметров по данным ОМО необходимо не менее 10-15 точек выходной кривой (рекомендуемая величина - 30-40 проб на одно опробование). В трещиновато-пористых породах со значительными массообменными свойствами обычно отмечается длительный период спада концентраций трассера (так называемый "хвост"). Для характеристики массообменных параметров желательно прослеживание всей кривой, включая и этот период, однако, частота проб при этом может быть несколько (в 2-3 раза) разрежена по сравнению с периодом регистрации максимальных концентраций.

5. РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ БАЗОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СХЕМ ИНДИКАТОРНОГО ОПРОБОВАНИЯ.

Приведённые ниже модели предполагают, что условия постановки опыта удовлетворяют требованиям сплошности среды, для трещиноватых пород это означает, что достигаемый масштаб

опробования хотя бы на порядок превышает характерные расстояния между основными проводящими трещинами.

5.1. Расчётные модели для ОМО в гомогенных породах.

5.1.1. Импульсные запуски индикатора в наблюдательные скважины при откачках.

Для обработки импульсных запусков индикатора при откачках в гомогенных породах существует несколько аналитических решений, которые, однако, дают достаточно близкие результаты лишь при высоких (>100) значениях характерного параметра Пекле $Pe = r/\delta$. Повышенная точность описания выходной кривой в опытных условиях, характеризующихся широким диапазоном параметра Пекле (начиная с $Pe > 5 \div 10$), достигается с использованием решения [22]:

$$C = \frac{M}{2\pi m n r^2 \sqrt{\frac{4\pi}{3Pe} \psi(t_r)}} \exp \left[-\frac{(1-t_r)^2}{\frac{16}{3Pe} \psi(t_r)} \right], \quad (5.1)$$

где M - масса инъецируемого вещества, (кг),

$$t_r = \frac{Qt}{\pi r^2 m n} = t/t_0,$$

$$\psi(t_r) = 1 - (1 - t_r) \left[1 - t_r \right]^{1/2}, \quad (5.1a)$$

причем $\psi(t_r) \approx t_r$ в интервале $0 < t_r < 2,5$

Согласно представленной зависимости, относительное время $t_{r, \max}$ прихода “пика” концентрации ($C_{\max}$) индикатора в точку наблюдения (откачивающую скважину) составляет

$$t_{r, \max} = \left(\sqrt{1 + Pe^2} - 1 \right) / Pe. \quad (5.2)$$

5.1.2. Опыты в плоско-радиальном потоке, формируемом одиночной нагнетательной скважиной

Осесимметричный конвективно-дисперсионный массоперенос в гомогенной среде при постоянной подаче индикатора в нагнетательную скважину, где поддерживается условие $C = C_0 = const$, достаточно хорошо описывается приближённой зависимостью

$$\bar{C} = 0,5 \operatorname{erfc}(\xi) \quad , \quad \xi = \frac{1-t_r}{4} \sqrt{\frac{3Pe}{t_r^{3/2}}} \quad , \quad (5.3)$$

где $t_r = t/t_0$, $t_0 = \pi^2 mn/Q$, $Pe = r/\delta$, Q - дебит нагнетания, m - эффективная длина интервала опробования, принимающего расход нагнетательной скважины, n - активная пористость/трещиноватость пород, r - расстояние до точки наблюдения, δ - константа продольной гидродисперсии, $\bar{C} = (C - C^0)/(C_0 - C^0)$ - относительная концентрация индикатора при его фоновом значении C^0 . Зависимость (5.3) справедлива при $Pe > 10 \div 15$. Временная координата (t_0) точки $\bar{C} = 0,5$ на индикаторном графике ($\bar{C} \div t$) характеризует время прихода фронта поршневого вытеснения индикатора к наблюдательной скважине, т.е. $t_0 = \pi^2 mn/Q$, откуда следует формула для расчёта параметра активной ёмкости пород (n). Для осуществления этой оценки необходима информация об эффективной мощности m , участвующей в формировании расхода фильтрационного потока, что предполагает проведение параллельных геофизических исследований в скважинах. В противном случае определяется менее информативный обобщенный параметр:

$$\bar{m} = mn = Qt_0/\pi^2 \quad . \quad (5.4)$$

Константа микродисперсии δ , характеризующая интенсивность рассеяния индикатора вблизи фронта его вытеснения, определяется по всей совокупности концентрационных точек индикаторного графика (разд. 6.2). Она может рассматриваться и в качестве некоторого контролирующего параметра, по абсолютной величине которого или по его пространственной изменчивости (при различных расстояниях между скважинами) можно судить о проявлении масштабных эффектов (см. также разд. 6.1 и 6.4). Непосредственное использование этого параметра в прогнозных оценках будет практически всегда занижать роль продольных дисперсионных эффектов.

При заметных различиях послойных скоростей фильтрации в слоистых пористых породах, а также при сильных проявлениях “каналового” механизма миграции в трещиноватых и карстовых породах или диффузионного оттока индикатора в блочную матрицу, применение модели микродисперсии будет приводить к сильной зависимости результата (росту расчетных показателей n и δ) от масштаба опробования, что должно свидетельствовать о необходимости перехода к гетерогенным моделям.

5.1.3. Опыты по дуплетной (двухскважинной) схеме.

Для выходных кривых дуплетного опробования комплексов однородных пород характерно слабое проявление на них гидродисперсии - на фоне конвективного рассеяния индикатора, обусловленного резкой деформацией сетки движения. Низкая чувствительность выходных кривых к параметру микродисперсии в области значений $\bar{C} > 0,1$ позволяет базировать интерпретацию экспериментов на приближенной зависимости:

$$\bar{C} = (2 / \pi) \arccos \left[(t_0 / t)^{1/2} \right], \quad (5.5)$$

полученной в предпосылке о “поршневом” движении индикатора по трещинам:

здесь
$$t_0 = \frac{\pi R^2 m n}{3Q}, \quad (5.5a)$$

- время переноса индикатора по кратчайшей линии тока. Для приближенной оценки параметра микродисперсии (δ_f) могут использоваться типовые кривые на рис. 6.3.

В случае неравенства дебитов откачки и нагнетания, что часто обусловлено меньшей приёмистостью нагнетательных скважин, оценка времени добега по кратчайшей линии тока t_0 может быть выполнена по зависимости

$$t_0 = 2\pi m n \frac{R^2}{(Q_2 - Q_1)^2} \left(\frac{Q_1 + Q_2}{2} - \frac{Q_1 Q_2}{Q_2 - Q_1} \ln \frac{Q_2}{Q_1} \right) \quad (5.6b)$$

где R - расстояние между скважинами, Q_2 и Q_1 - дебиты скважин для откачки и нагнетания соответственно. При расчётах концентраций по зависимости (5.5) в этом случае следует также учитывать дополнительно разбавление индикаторного раствора за счёт большего дебита откачки

5.1.4. Односкважинный эксперимент.

Выходная кривая, получаемая в процессе откачки индикатора из пласта, описывается решением:

$$\bar{C}^* = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}(\xi), \quad \xi = \frac{\bar{t} - 1}{\sqrt{\frac{16}{3Pe^* \psi(\bar{t})}}},$$

где $t = \frac{t}{t^*}$, $Pe^* = \frac{r^*}{\delta_l} = \frac{\sqrt{Qt^*/\pi m}}{\delta_l}$, t^* - период нагнетания, по прошествии которого сразу же начинается откачка,

$$\psi(\bar{t}) = 2 - (1 - \bar{t})\sqrt{1 - \bar{t}},$$

причём $\psi(\bar{t}) \approx 1 + \bar{t}$ при $0 < \bar{t} < 2,5$

Если в трещиноватых породах одновременно с инертным индикатором применяется компонент с известным (из лабораторных опытов) коэффициентом сорбционного распределения на поверхности трещин k_a (разд.1.2.1.3), то для интерпретации соответствующей выходной кривой в решении (5.6) следует заменить безразмерный комплекс Pe^* на величину:

$$Pe_{\lambda}^* = \frac{r_{\lambda}^*}{\delta_l} = \frac{1}{\delta_l} \sqrt{\frac{Qt^*}{\pi(n + \Delta n)m}}, \quad \Delta n = k_a S_b$$

(S_b - удельная поверхность трещин). Таким образом, сорбция приводит к дополнительному выполаживанию выходной кривой. Сопоставляя значения безразмерных параметров Pe^* и Pe_{λ}^* , легко найти соотношение $K_a S_b / n$, полезное для последующей оценки значения S_b при известных K_a и n .

5.2. Расчётные модели для ОМО в комплексах гетерогенных пород

5.2.1. Импульсные запуски индикатора в наблюдательные скважины при откачках.

Выходная кривая опыта, проводимого в пласте пористых и стратифицированных пород, описывается решением [22]

$$C = \frac{M}{2\pi m n r^2 \sqrt{\frac{\pi w_k^2}{3} \psi(t_i)}} \exp \left[-\frac{(1-t_i)^2}{\frac{4w_k^2}{3} - \psi(t_i)} \right], \quad (5.7)$$

где $t_i = qt' / \pi r^2 n$, w_k - коэффициент вариации проницаемости,

$$\psi(t_i) = 2 [1 - (1-t_i) |1-t_i|]^{1/2} - (3/2) [1 - (1-t_i)^2], \quad (5.7a)$$

причем в диапазоне значений $0 < t_* < 1,2$ $\psi(t_*) \approx 1,2$, при $t_* = 1,2 - 1,5$ функция $\psi(t_*)$ - возрастающая, резко нелинейная, стремящаяся в пределе к $3/2t_*$. Последнее обстоятельство определяет пониженные скорости спада концентрации после фиксации в откачивающей скважине пиковых значений - так называемые "хвостовые" эффекты.

Эквивалентом решения (5.1) задачи переноса в гетерогенном (трещиновато-пористом) пласте является решение

$$C' = \frac{M\sqrt{\bar{\lambda}}}{4\pi t_*^2 m n(t_* - 1)^2} \exp\left[-\frac{\bar{\lambda}}{4(t_* - 1)}\right] \quad (5.8)$$

где $\bar{\lambda} = B_m t_0$. Графическое представление решения (5.7) дано на рис. 6.4. Положение пика максимальной концентрации на временном графике определяется соотношением

$$t_{*, \max} = 1 + \bar{\lambda}/6, \quad (5.8a)$$

т.е. массообмен между трещинами и блоками увеличивает время фиксации $C'_{\max}$.

Обобщенный параметр B_m , характеризует массообмен и емкостные свойства пористых блоков и трещин. Вид параметра B_m зависит от модельных представлений о структуре трещинно-блочного пространства среды.

При движении индикатора по условно изолированным друг от друга трещинам с постоянным раскрытием $2b$

$$B_m = D_m n_0 / b^2 \quad (5.8б)$$

где D_m - коэффициент молекулярной диффузии индикатора в пористой среде (матрице), окружающей трещины, n_0 - пористость этой среды. Такое представление параметра B_m оправдано при изучении слабо дезинтегрированных (крупноблочных) трещиноватых пород, когда распространение индикатора на достаточно большие расстояния (до всех наблюдательных скважин) происходит по одной или нескольким субгоризонтальным трещинам.

Чаще реализуется ситуация, когда интенсивность диффузионного оттока вещества в пористую матрицу полностью определяется удельной поверхностью блоков S_f . В этом случае

$$B_m = S_f^2 D_m n_0 / n^2 = \lambda_m / n^2, \quad (5.8в)$$

где λ_m - комплексный массообменный параметр, зависящий только от коэффициентов переноса в блоках и их удельной поверхности.

5.2.2 Опыты в плоско-радиальном потоке, формируемом нагнетательной скважиной.

В гетерогенном пласте пористых стратифицированных пород, опробуемых суммарно, экспериментальной схеме с наливом индикатора соответствует решение [16]

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}\left(\frac{1-t_r}{\sqrt{2}W_k t_r}\right) \left[2 - \operatorname{erfc}\left(1 - 1/W_k \sqrt{2}\right)\right]^{-1} \quad (5.9)$$

где $t = qH/\pi r^2 n$ – коэффициент вариации проницаемости

Проявление двойной пористости для трещиноватых пород обусловленной диффузионным оттоком вещества в пористые блоки диагностируется обычно по резкой асимметрии индикаторных графиков (в координатах $\bar{C} - t$). Для обработки опытов рекомендуется решение

$$\bar{C} = \operatorname{erfc}(\xi), \quad \xi = \frac{t_0}{2} \sqrt{\frac{B_m}{t - t_0}} \quad (5.10)$$

Необходимость оценки возможных погрешностей интерпретации опыта, обусловленных исходным допущением о поршневом характере движения индикатора в пространстве трещин может потребовать обращения к более сложным моделям [13-14]

5.2.3. Опыты по дуплетной (двухскважинной) схеме.

Базовые решения для анализа дуплетного опробования гетерогенных стратифицированных и трещиновато-пористых пластов приводятся в работе [13]

Для практической обработки опытных данных в трещиновато-пористых породах целесообразно использовать графическое представление решения на рис. 6.5. При $B_m t_0 > 0,3-0,4$ т.е. в широком круге экспериментов с химическим индикатором расчетные кривые достаточно хорошо аппроксимируются зависимостью

$$\bar{C} \approx -\frac{1}{2} \lg(\xi), \quad \xi = \frac{t}{2} \sqrt{\frac{B_m}{t - t_0}}, \quad t_0 = \frac{\pi r^2 m n}{3Q}, \quad (5.11)$$

причем используемые значения $\bar{C}$ должны находиться в интервале $0,1 < \bar{C} < 0,8$ (t_0 , как и в предыдущем рассмотрении, отвечает времени миграции индикатора по кратчайшей линии тока)

В случае, когда B_m имеет представление (5.10б) – среда с равнодоступной для индикатора поверхностью блоков изометрической формы

$$\xi = \frac{\sqrt{\lambda_m t_o}}{2n\sqrt{t-1}}, t = \frac{t}{t_o} \quad (5.11a)$$

5.2.4. Односкважинный эксперимент.

При односкважинных экспериментах с выстаиванием индикатора в пласте со слабыми массообменными свойствами можно пренебречь кинетическими процессами, протекающими в кратковременные периоды закачки и откачки. Соответствующее приближенное решение для интерпретации экспериментов в трещиновато-пористых пластах, полученное в предположении, что гидродисперсионные (на стадии закачки и откачки индикатора) и массообменные (в период выстаивания индикатора продолжительностью t^{**}) процессы протекают независимо друг от друга, имеет вид

$$\bar{C} \equiv \bar{C}[t, (t^*, t^{**})] = \bar{C}^* \exp(-\bar{t}^{**}) \operatorname{erfc} \sqrt{\bar{t}^{**}} \quad (5.12)$$

$(\bar{t}^* - B_m t^{**})$, функция $\bar{C}^*$ определяется согласно решения (5.6)

5.3. РАСЧЁТНЫЕ МОДЕЛИ ДЛЯ БАЗОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СХЕМ ОФИО.

5.3.1. Оценка плановой фильтрационной анизотропии.

Для определения времени движения “пика” концентрации индикатора $t_{\max}$ по пласту при произвольной ориентации луча скважин относительно главных осей анизотропии (импульсные запуски индикаторов при откачках или при наливке) применяется следующее выражение [7]

$$t_{\max} = \pi m_1^2 (\cos^2 \varphi + \chi_b^2 \sin^2 \varphi) / (Q \chi_b \sqrt{\cos^2 \varphi + \omega^2 \sin^2 \varphi}), \quad (5.13)$$

где φ - угол между лучом скважин и направлением оси минимальной проницаемости, r - расстояние от запускной до откачивающей (наблюдательной) скважины, χ - параметр плановой фильтрационной анизотропии, $\omega = n/n_y$ - параметр плановой миграционной анизотропии. Ошибка в определении величины χ_b^2 в трещиновато-пористом пласте, обусловленная массообменом между трещинами и блоками, как правило, не превышает 50% при характерных на практике значениях $\lambda_m \pi m_1^2 / (6Qn) < 0,1$

Поскольку при дуплетных опробованиях достигается значительно более высокая степень осреднения определяемых свойств пласта, использование дуплетной схемы приводит к сглаживанию возможных различий в анизотропии значений трещиноватости n_x и n_y . Для независимой оценки параметра плановой фильтрационной анизотропии достаточно проведения двух дуплетных экспериментов при различных ориентациях осей дуплета. Решение для концентрации в откачиваемой скважине при равенстве расходов откачки и нагнетания используется в виде (5.5) при $t_0 = \pi R^2 m n / [3Q \times (\cos^2 \varphi + \chi_h^2 \sin^2 \varphi)]$, где φ - угол между осью дуплета и главной осью анизотропии минимальной проницаемости. Погрешность расчётов при этом не превышает первых процентов.

5.3.2. Опробование в субвертикальном потоке.

В общем случае решение миграционной задачи в пласте большой мощности с несовершенными по степени вскрытия пласта скважинами требует учёта гидродинамического влияния кровли и подошвы пласта, зависящего от расположения и длины фильтров скважин в разрезе. Поэтому решение задачи в общем виде, как правило, требует применения численных или численно-аналитических подходов. Аналитические решения существуют для частных случаев расположения фильтров в пласте.

Для схемы “подошвенного заселения” в том случае, когда фильтр откачивающей скважины примыкает к кровле пласта, изменение концентрации $\bar{C}$ в ней хорошо описывается решением [13, 14]:

$$\bar{C} = (1 - \bar{h}) \left[1 - (t_0 / t)^b \right] \quad (t \geq t_0), \quad (5.14)$$

где $b = 3^{(\bar{h}-1)}$, $\bar{h} = h / m$, h - расстояние от “точечного” фильтра откачивающей скважины до границы зоны распространения индикатора (рис.3.1), t_0 - время миграции по кратчайшей линии тока:

$$t_0 = \pi h^3 n \Phi(\bar{m}) / (Q \chi_h^2).$$

$$\Phi(\bar{m}) = \frac{1}{8\bar{m}} \left[-1 + 4\bar{m} - 2\bar{m}^2 - 4\bar{m}^3 - 4\bar{m}^4 \ln \left(1 - \bar{m}^{-1} \right) \right], \bar{m} = \frac{1}{h} \quad (5.14a)$$

Решение (5.14) может использоваться и для интерпретации длительных периодов водопонижения в условиях исходной профильной гидрогеохимической стратификации мощных водоносных толщ.

Для схемы «вертикальный дуплет» аппроксимация (с погрешностью не более 10% при $\bar{C} > 0,1$) точного решения дается простой аналитической формулой:

$$\bar{C} = 1 - (t_0 / t)^\beta \quad (t \geq t_0) \quad (5.15)$$

где $t_0 = 0,4 m^3 n / (\chi_v^2 Q)$, $\beta = 1/4$ для неограниченного по мощности пласта и $\beta = 3/2$ в случае расположения фильтров вблизи его кровли и подошвы

Для схемы «двойной дуплет» расчёт линий тока от скважин для подачи индикатора к откачивающей скважине на основе численно-аналитических зависимостей возможен в том случае, когда все три скважины находятся в одной плоскости. Тогда горизонтальная компонента скорости движения для расчётной точки может быть представлена как $v_x = v_{x1} + v_{x2} + v_{x3}$, а вертикальная $v_z = v_{z1} + v_{z2} + v_{z3}$, где слагаемые определяются влиянием каждой из трёх скважин системы с учётом знака фильтрационного возмущения (расход откачки - отрицательный). При интерпретации результатов опробования анализируются времена добегания t_0 индикатора от каждой из скважин запуска по кратчайшей линии тока [3].

6. ОСНОВЫ ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИНДИКАТОРНЫХ ОПРОБОВАНИЙ

Интерпретация результатов опытов проводится в несколько этапов:

- 1) качественный анализ индикаторных кривых и диагностика на его основе роли отдельных механизмов внутрипластового переноса;
- 2) непосредственное вычисление параметров, согласно намеченным на первом этапе расчётным моделям миграции;
- 3) оценка достоверности полученных результатов.

6.1. Диагностика результатов ОМО и выбор расчётной модели.

При анализе результатов опробований в первую очередь по виду выходной кривой и информации о распределении индикатора по профилю пласта (в случае наличия таковой) должен быть ещё раз рассмотрен вопрос о характере строения водовмещающих пород - могут ли они рассматриваться как гомогенная среда или их следует относить к гетерогенным. Ответ на этот вопрос определяет дальнейшую схему интерпретации

результатов. При этом для относительно однородных пористых пород возможно рассмотрение их как гомогенных в рамках модели микродисперсии, а для упорядоченно стратифицированных гольц - как гетерогенных, в рамках модели послойного переноса. Для трещиноватых пород при низких массообменных свойствах блоков также возможно применение модели микродисперсии, а при активном проявлении массообмена - моделей неограниченной или сосредоточенной ёмкости в трещиновато-пористой среде (двойной ёмкости).

6.1.1. Комплексы пористых пород.

Проявление гетерогенности (слоистости) пористых пород в опытах с преимущественно горизонтальным переносом индикаторов достаточно просто диагностируется по виду индикаторной кривой ($C - t$) она имеет два-три выположенных участка (при длительном входном сигнале) или пика (при кратковременном пакетном либо импульсном запуске), которые соответствуют миграции индикатора по отдельным слоям, различающимся между собой по проницаемости. Если имеется информация о профильном распределении расходов по пласту и концентрации индикатора по наблюдательным скважинам, то обработка выходной кривой осуществляется дифференцированно - для каждого выделяемого слоя - в рамках расчётной схемы микродисперсии. При небольших интервалах опробования (десять сантиметров, а при использовании теплового индикатора - первые метры) указанные особенности могут оказаться невыраженными - в силу поперечной профильной дисперсии, что заставляет проводить интерпретацию как для квазигомогенной среды.

Если индикаторная кривая не имеет характерных признаков проявления гетерогенности пород, то, прежде всего, основываясь на соотношениях для квазигомогенных сред, определяются эффективные ёмкостные и дисперсионные характеристики - расчётные значения пористости m_0 и константы гидродисперсии δ_f . Примечать того, что пласт, в действительности, близок к гомогенной среде, служат 1) близость значений m_0 к общей пористости пород, 2) слабая изменчивость расчётной константы δ_f , определяемой по разным скважинам или при разных дебитах налива, кроме того, результаты полевых и лабораторных экспериментов должны иметь один порядок.

Если же полевые опыты дают заметно заниженные значения пористости и, наоборот, существенно завышенные величины константы δ_f (не характерные для однородных пористых сред), то это также указывает на проявление гетерогенных свойств пласта, обусловленных изменчивостью фильтрационных параметров по его мощности.

(слоистостью). В этом случае результаты должны рассматриваться в рамках моделей макродисперсии, а в качестве параметра рассеяния рассматривается коэффициент вариации проницаемости W_k . Это весьма характерно, например, для валунно-галечных отложений с неоднородным заполнителем.

Другим важным диагностическим признаком, также требующим последующего пересчёта опытных результатов в рамках моделей макродисперсии, служит зависимость расчётных параметров от расстояния между центральной и наблюдательными скважинами. В частности, для миграции в квазиоднородном стратифицированном пласте характерна примерно линейная зависимость расчётной величины δ_j от расстояния до наблюдательной скважины.

6.1.2. Комплексы трещиноватых пород

Интерпретация опыта может основываться на расчётной модели микродисперсии или альтернативной ей модели гетерогенного пласта с двойной пористостью. Предварительное подразделение трещиноватых пород на гомогенные и гетерогенные выполняется по данным геологоструктурного анализа и лабораторных испытаний. При применении схемы с паливом для диагностики опытных данных полезно сопоставление общего характера индикаторных кривых с типовыми формами теоретических графиков (рис.6.1). В отличие от симметричных графиков, соответствующих схеме микродисперсии, для гетерогенной модели характерна асимметричная выпуклая кривая с быстрым нарастанием концентрации и последующим резким выполаживанием; время достижения относительной концентрации, равной 50% от исходной, составляет малую долю от общего времени нарастания концентрации в наблюдательной скважине. Другим полезным диагностическим признаком является характер графика прослеживания по лучу наблюдательных скважин $t_c = f(r^2)$, где t_c - время появления в скважине фиксированной относительной концентрации $\bar{C}$ (например, 50%): для чётко выраженной гетерогенной среды $t_c \sim r^4$; а для гомогенной - $t_c \sim r^2$. При пакетном входном сигнале относительно быстрое нарастание концентрации в гетерогенных средах сменяется периодом длительного постепенного спада, что не характерно для гомогенных трещиноватых пород.

При дуплетном опробовании общий характер кривых менее информативен, хотя все они заметно выполажены в опытах на гетерогенных комплексах - по сравнению с гомогенными. Для диагностики опытного режима индикаторные кривые перестраиваются в координатах $[\cos(\pi \bar{C}/2)]^{3/4} \div 1/t$. Линейный или близкий к нему вид графиков указывает на слабое влияние оттока индикатора из трещин в блоки.

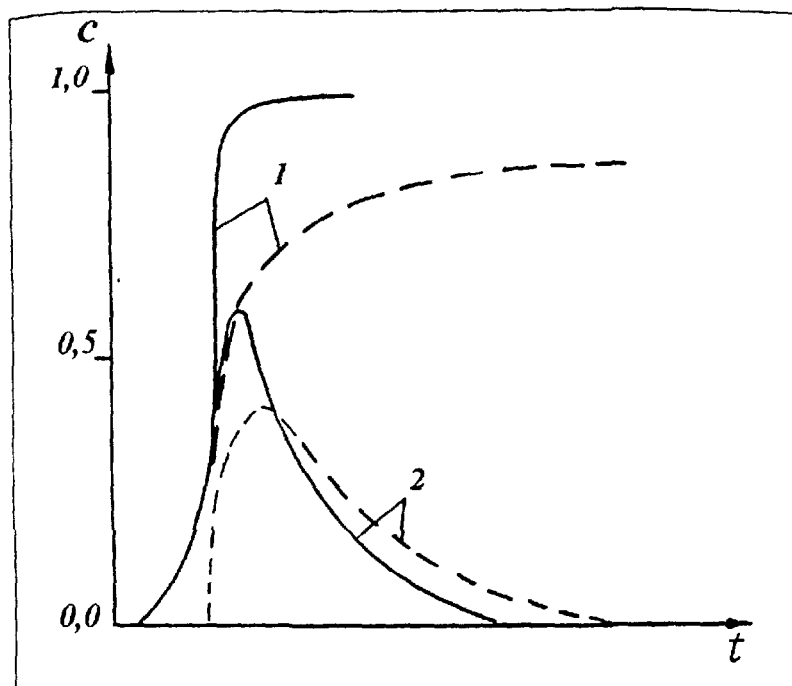


Рис 6 1 Типовые формы индикаторных кривых для различных схем миграции:

1 - при длительном наливе (нагнетании) индикатора,
2 - при пакетном (импульсном) запуске индикатора
(сплошные кривые - для расчетной схемы микродисперсии,
пунктирные - для расчетной схемы неограниченной ёмкости)

Наоборот, выпуклый характер графиков свидетельствует о проявлении гетерогенных свойств пласта.

Весьма показателен график роста относительной суммарной

массы вещества
$$\overline{M}(t) = \frac{\int_0^t \overline{C}(t) dt}{t} \quad \text{в приведенном времени } \tau = t/t_0,$$

где t_0 примерно отождествляется с временем первого прихода трассера (значения $\overline{C}$ измеряются первыми процентами). Для однородных (чисто трещиноватых) пород этот график в интервале относительных концентраций $0,1 < \overline{C} < 0,5$ примерно прямолинейный, приведенное время t_0, t_0 измеряется первыми единицами (теоретически оно равно 3), а уклон графика имеет порядок 0,1. Для типичных гетерогенных пород график более заметно отклоняется от прямолинейной формы, приведенное время t_0, t_0 измеряется десятками и даже сотнями, а осредненный уклон уменьшается на один-два порядка (до 0,01 - 0,001).

В дальнейшем правомерность выбранной интерпретационной схемы должна контролироваться физическим правдоподобием расчетных значений параметров и приведенными ранее критериальными соотношениями (разд. 4). При невыполнении критерия (4.2), что характерно для трещиновато-пористых сред с низкими массообменными параметрами блоков ($\lambda_m < 10^{-7} - 10^{-6} \text{ сут}^{-1}$), повторной диагностикой надлежит обосновать возможность использования модели микродисперсии, при этом, в первую очередь, должны рассматриваться опытные точки со значениями относительной концентрации $0,1 < \overline{C} < 0,5$. Для пород с высокими массообменными параметрами ($\lambda_m > 10^{-1} - 10^{-2} \text{ сут}^{-1}$) выполнение условия сплошности среды обычно обеспечивает допустимый уровень погрешности при ориентации на участки индикаторных графиков, где относительная концентрация $\overline{C}$ превышает 10-20% от максимальной.

В опытах с откачкой (при запуске в наблюдательную скважину) сглаживание выходных кривых предельно осложняет диагностику. Поэтому интерпретация таких опытов должна проводиться с использованием типовых кривых, хотя грубая оценка активной трещиноватости пород возможна по пику индикаторной волны.

При диагностике результатов тепловых запусков необходимо учитывать, что:

- 1) все трещиноватые породы ведут себя в этом случае как гетерогенные;
- 2) плотностная конвекция может приводить к неравномерному продвижению индикатора по мощности опробуемого интервала;

3) температура воды в непрокачанной наблюдательной скважине может в значительной степени определяться кондуктивным обменом между скважиной и пористыми блоками

4) при малых размерах блоков или при длительных запусках опытный процесс может выходить за рамки схемы неограниченной емкости (разд 1 2 2 2), обычно справедливой для химических индикаторов

6.2. Методика количественной интерпретации и анализа результатов ОМО.

6.2.1. Опыты в квазигомогенных средах

В рамках рассматриваемых здесь расчетных процедур интерпретируются опыты в однородных пористых и трещиноватых (с пренебрежимой пористостью блоков) породах. Определяемыми параметрами являются пористость (трещиноватость) пород (m) и константа микродисперсии (δ). Удобной обобщенной мерой дисперсии может служить отношение $(t_{0.9} - t_{0.1})/t_0$, где времена t_i определяются моментами фиксирования соответствующих относительных концентраций $\bar{C}$.

Интерпретацию импульсных запусков в наблюдательные скважины при откачке можно проводить методом типовых кривых (рис 6 2), для чего решение (5 1) при $\psi(t_r) = t_r$ приводится к виду

$$\lg(F) - \lg(f) = 0,$$

$$\text{где } F = F(\bar{C}, t) = 2Q/C/M \cdot f(t, Pe) = (t \sqrt{3Pe/4\pi}) \exp\left[-(1-t_r)^3 3Pe/(16t)\right]$$

Для сопоставления типовых кривых $\lg f - \lg(t_r)$ с фактическим графиком $\bar{C}(t)$ опытные точки наносятся на график в координатах $\lg F - \lg t$ в том же масштабе, что и типовые кривые. Совмещение типовых и опытных графиков производится только по оси абсцисс, тогда по сдвигу осей ординат (A) определяется параметр $mn = 10^A Q/(\pi^2)$, а по шифру кривой (значение Pe) находится константа гидродисперсии ($\delta^2 = 1/Pe$).

Для интерпретации опытов при наливе используется решение (5 3). Опытные данные наносятся на график в координатах $\xi t^{-1/4} - t$ (при опробовании глубоких горизонтов вводится поправка на время движения индикатора по стволу нагнетательной скважины), где $\xi = \operatorname{erfc}(2\bar{C})$ - для точек с $\bar{C} < 0.5$ и $\xi = -\operatorname{erfc}(2 - 2\bar{C})$ - для точек с $\bar{C} > 0.5$, (erfc - функция обратная erfc). При соответствии режима переноса этой расчетной схеме опытные данные ложатся на пря-

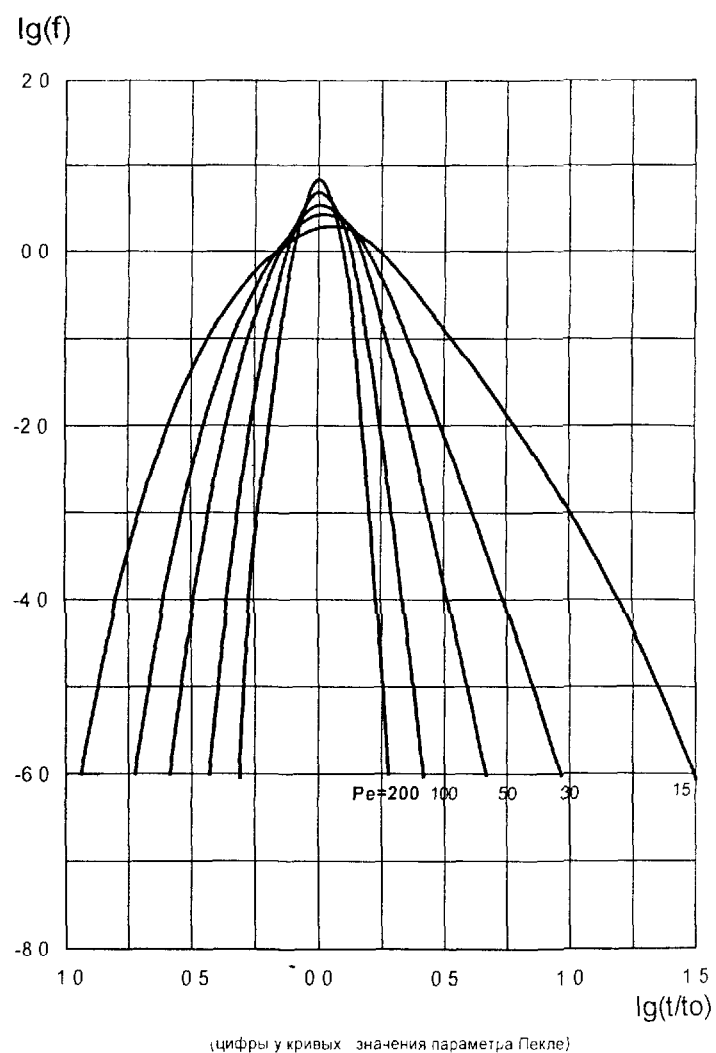


Рис. 6.2. Типовые кривые для интерпретации результатов импульсного запуска индикатора в наблюдательную скважину при откачке в однородных породах

мую, точка пересечения которой с осью времени отвечает значению t_0 . Расчет параметров проводится по следующим зависимостям

$$n = \frac{qt_0}{\pi r^2}, \quad \delta = \frac{0.188r}{tg^2 \varphi \sqrt{t_0}}, \quad (6.1)$$

(φ - угол наклона прямой к оси t)

На графике $\bar{C} - f(t)$ точка t_0 соответствует времени регистрации в наблюдательной скважине концентрации $\bar{C} = 0.5$

Для приближенной экспресс-оценки константы микродисперсии могут использоваться три характерные точки ($\bar{C} = 0.16$, $\bar{C} = 0.5$, $\bar{C} = 0.84$), отвечающие значениям времени $t_{0.16}$, $t_{0.5}$ и $t_{0.84}$

$$\delta = \frac{r}{8} \left(\frac{t_{0.5} - t_{0.16}}{\sqrt{t_{0.5} \times t_{0.16}}} - \frac{t_{0.5} - t_{0.84}}{\sqrt{t_{0.5} \times t_{0.84}}} \right)^2 \quad (6.2)$$

Если расстояние между опытными скважинами r сопоставимо с радиусом нагнетательной скважины r_0 , то в этих и во всех последующих зависимостях осуществляется замена r^2 на $(r^2 - r_0^2)$

При пакетном входном сигнале длительностью t_m , когда общее решение получается суперпозицией решений вида (5.3), обработку опытных данных удобно проводить по значению максимальной концентрации C_{max} и времени ее регистрации в наблюдательной скважине t_{max} . Если $t_{max} \gg t_m$, то справедливы зависимости [16]

$$n = \frac{qt_{max}}{\pi r^2}, \quad \delta = 0.06 \left(\frac{C_0 - C^0}{C_{max} - C^0} \right) \frac{t_0^2}{t_{max}^2} \quad (6.3)$$

При обработке дуплетных опытов осуществляется линейризация выходных кривых в координатах $[\cos(\pi \bar{C}^2/2)]^{1/4} - 1$. При этом тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс равен характеристике t_0 , откуда находится параметр n (или $m = mn$). Если в опыте достигается относительная концентрация $\bar{C} = 0.5$ (в момент $t_{0.5}$), то $n = qt_{0.5}/\pi^2$. Для приближенной оценки параметра микродисперсии (δ) могут использоваться типовые кривые (рис. 6.3)

Для обработки однокважинного эксперимента опытные точки наносятся на график в координатах $\xi \sqrt{t + \psi(\bar{t})} - \bar{t}$. Если в соответствии с решением (5.6), тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс $tg \phi = \sqrt{16/(3Pe^*)}$, откуда находится комплексная величина δ/n .

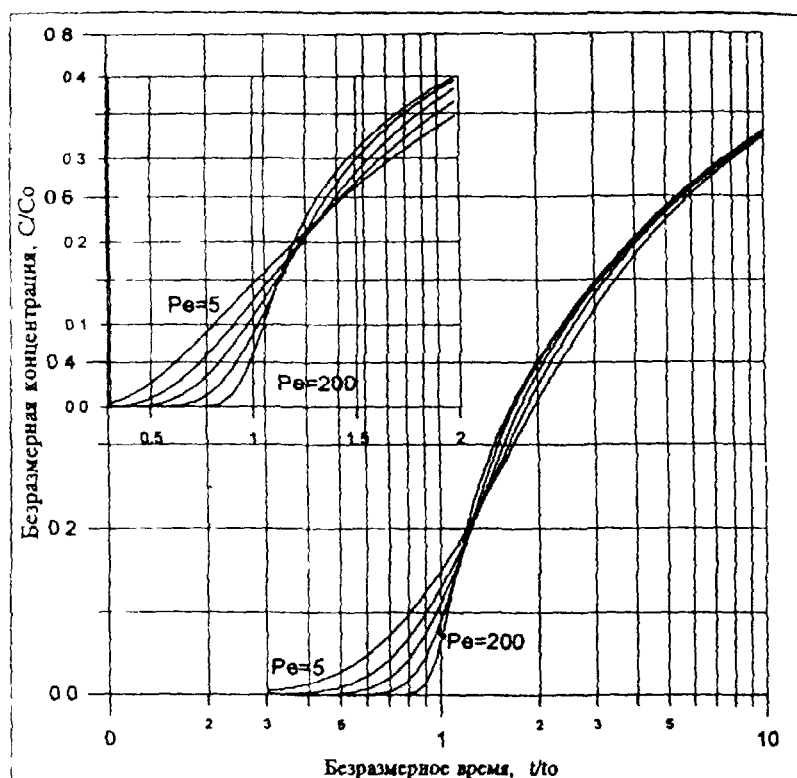


Рис 6.3 Типовые кривые для интерпретации результатов
дуплетного опробования в гомогенных породах
 Pe - значения параметра Пекле (5, 10, 20, 50, 200)

6.2.2. Опыты в гетерогенных средах

6.2.2.1. Суммарно опробуемые стратифицированные пласты пористых пород

Если диагностика опытных кривых диктует (разд 6.1) применение модели послойного переноса, то, при наличии данных о соотношениях фильтрационных расходов (или проницаемостей слоев), расчёт ведется послойно - аналогично гомогенным пластам

При интерпретации опытов по гетерогенной модели опробуемого пласта в целом, расчетными параметрами являются осредненная активная пористость пород (n) и коэффициент вариации проницаемости (W_k). Первое расчетное приближение целесообразно осуществлять с использованием методики для гомогенных пород (разд 6.2.1), причем ориентировочное значение параметра W_k определяется пересчетом из формулы

$$\delta_p = \frac{W_k^2}{2}, \text{ где } \delta_p - \text{расчётное значение константы гидродисперсии}$$

Далее для интерпретации опытов в потоке, формируемом от качения скважины, используется метод подбора параметров совмещением экспериментальных точек с типовыми кривыми, рассчитываемыми по формуле (5.7)

Обработка опыта по схеме с наливом индикатора базируется на решении (5.9), которое при $W_k < 0,5$ с погрешностью не более 4% переходит в формулу

$$\overline{C} = 0,5 \operatorname{erfc} \left(\frac{1-t}{\sqrt{2} H_{\text{пл}} t} \right). \quad (6.5)$$

Аналогично микродисперсионной модели, для обработки опыта может использоваться линеаризация выходной кривой в координатах $\xi \text{--} t$. Тогда $W_k^2 = \lg^2 \varphi / 2$ ($\lg \varphi$ - угол наклона прямой к оси ординат - времени)

Для обработки дуплетного опыта в стохастических стратифицированных средах рекомендуется использовать типовые графики [13]

6.2.2.2. Трещиновато-пористые породы

Основными расчетными характеристиками являются трещиноватость пород (n) и параметры массообмена $\lambda_m = S_b^2 D_m n_0$ (для химического индикатора) или $\alpha_1 = a_b S_b^2$ (для теплового индикатора)

Для обработки импульсных запусков индикатора в наблюдательные скважины при откачке используются типовые кривые на

рис. 6.4, так что опытные точки наносятся на график в координатах $\lg(\Gamma) - \lg(t)$. При этом в исходном соотношении (5.8) необходимо поделить

$$F = F(C, t) = 4Q\alpha/M$$

$$f = f(t, \bar{\lambda}) = \left[t, \sqrt{\bar{\lambda}}(t - 1)^{1/2} \right] \exp \left[-\bar{\lambda} / 4(t - 1) \right] \quad (6.6)$$

По сдвигу осей ординат (A) находится величина трещиноватости $n = 10^3 Q' / (\pi m r^2)$, а по шифру выбранной типовой кривой определяется параметр массообмена $\lambda_m = \lambda n^2 / t_0$ (для блоков изометрической формы).

Для интерпретации опытов с наливом при постоянном режиме подачи индикатора решение (5.10) представляется в форме

$$A\sqrt{t - t_0} = \xi = \inf \operatorname{erf}(\bar{C}), \quad (6.7)$$

где $t - t_0 = \sqrt{B_m} = t_0 \lambda_m^{-1/2} / 2n$, $t_0 = \pi r^2 n / q$. Обработка осуществляется путем нанесения опытных точек на график в координатах $\xi^2 - t$, что позволяет линеаризовать зависимость (6.7). По точке (t_0) пересечения прямой с осью времени определяется активная трещиноватость, а по углу наклона прямой к оси времени (φ) - параметр λ_m .

$$n = \frac{qt_0}{\pi r^2}, \quad \lambda_m = \frac{4n^2}{t_0^2 \lg(\varphi)} \quad (6.7a)$$

Большое число наблюдательных скважин позволяет использовать для интерпретации графики комбинированного прослеживания $t_c \div r^4$ (t_c - время регистрации значения концентрации $\bar{C}$ в наблюдательной скважине).

При обработке результатов пакетного или импульсного запуска используются "пиковые" значения $C_{\max}$ и $t_{\max}$.

$$n = q(t_{\max} - t_0) / (\pi r^2), \quad \lambda_m = 4n^2 \xi_{\max}^2 t_0 / t_0^2, \quad (6.8)$$

где $\xi_{\max} = \operatorname{inferfc}(\bar{C}_{\max})$; t_0 - длительность пакетного запуска.

Если в процессе опыта с наливом наблюдается нарушение плоскорадиальной структуры фильтрационного потока, обусловленное наложением естественного фильтрационного поля или проявлением плановой анизотропии пласта, то при расчетах миграционных параметров вносится поправка для характерных времен $t(t_{\text{от}})$ и $t_{\max}$ (разд. 5, более подробно в работе [13]).

Интерпретация результатов дуплетных опытов осуществляется в общем случае при помощи типовых графиков, представленных на

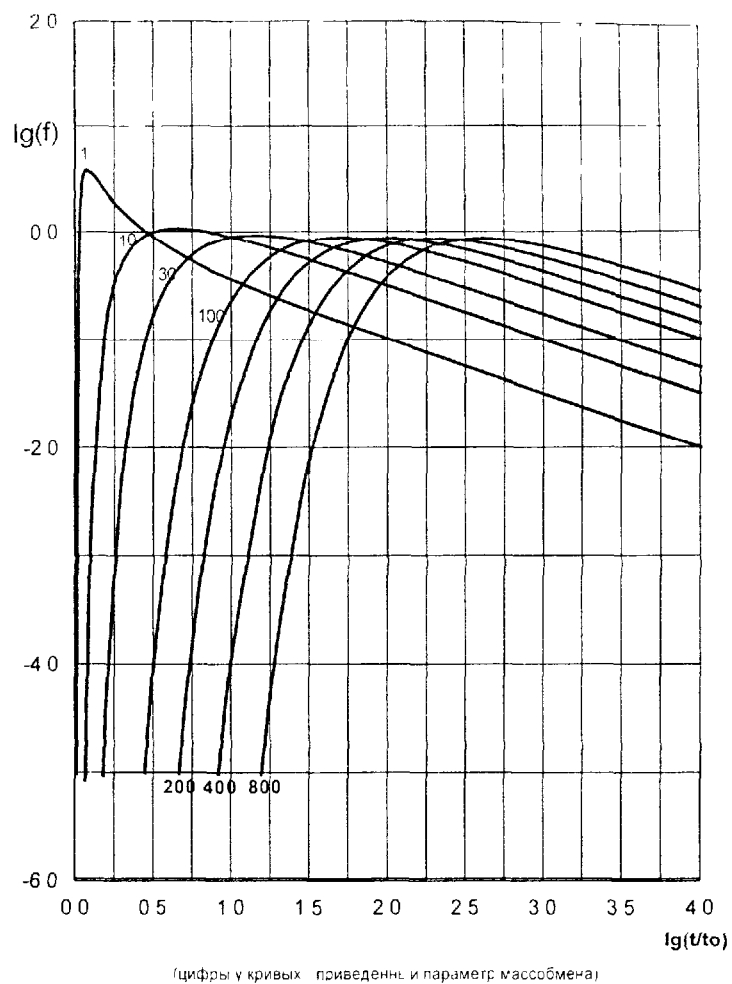


Рис. 6.4. Типовые кривые для интерпретации результатов извлечения в пад-по-даче-паузо скважины при откачке в гетерогенном трещинно-пористом пласте (схема неограниченной емкости)

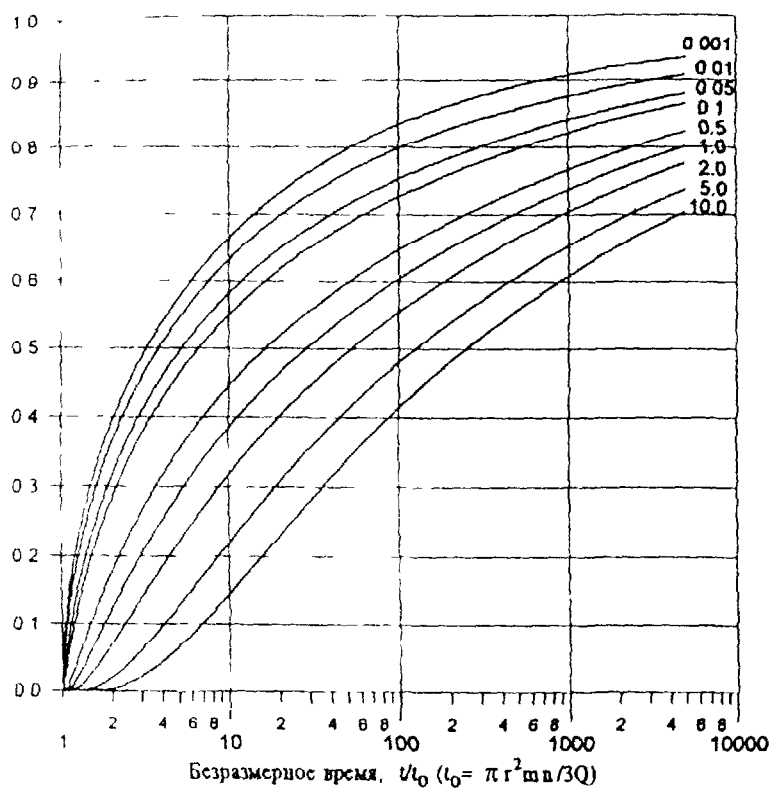


Рис. 6.5 Типовые кривые для интерпретации результатов дуплетных опробований трещиновато-пористых пластов, шифр кривых - значения $Wmto$

рис. 6.5. Однако, если в эксперименте зафиксирована выходная концентрация $\bar{C} = 0.5$, то для начальной обработки результатов опыта рекомендуется использовать приближенное решение (5.11), из него можно сразу найти ориентировочное значение параметра λ_m

$$\lambda_m \approx 0.04(q't^2)^{-1} t_{0.5}, \quad (6.9)$$

а затем, по более ранним участкам выходной кривой ($\bar{C} = 0.1 - 0.2$), подбирается удовлетворительное значение n с помощью формулы (5.11). Для второго приближения можно использовать непосредственно кривые на рис. 6.5, задаваясь фиксированным значением $n(t_{0.5})$, определяя $t = t/t_{0.5}/t_{0.5} = \pi^2 mn / 3Q$, затем опытные точки наносятся на типовый график в координатах $\bar{C} = \lg(t)$ и по эталонной кривой графика с шифром $(B_m t_{0.5})$ определяют B_m или $\lambda_m = B_m n^2$. Если выходная кривая не соответствует характеру типовых графиков, то принятые значения корректируются, и опытная кривая перестраивается заново.

При интерпретации односкважинного эксперимента, базирующейся на формуле (5.12), одновременно подбираются два комплексных параметра - δ_1/n^2 и λ_m/n^2 . Для ориентировочной оценки величины λ_m/n^2 используется формула

$$\Delta \bar{C} = e^{-\lambda_m t^{**}} \operatorname{erfc} \sqrt{\lambda_m t^{**}}, \quad (6.10)$$

где $\Delta \bar{C}$ отвечает снижению относительной концентрации индикатора в пласте в области, примыкающей к скважине, за время t^{**} (первый "выстаивания"). Значение $\Delta \bar{C} \approx 1 - \frac{C'' - C'}{C_i - C'}$, где C' - концентрация в

начальный период откачки (C'' - фоновое значение). Далее, по формуле (5.12) подбирается значение δ_1/n^2 , наилучшим образом аппроксимирующее выходную кривую.

6.3. Интерпретация опытно-фильтрационных индикаторных опробований

6.3.1. Изучение профиля проницаемости водоносного пласта индикаторными запусками

Интерпретация импульсных и пакетных запусков трассеров в наблюдательные скважины на последних этапах кустовых откачек (из совершенных опытных скважин) осуществляется исходя из предпосылки

постоянного переноса индикатора в условиях плановой фильтрации. При этом используются графики изменения концентрации трассера в откачиваемой воде

Если на таком графике достаточно четко выделяются отдельные "пики" концентрации, отвечающие времени $t_{\max}$ поступления меченой воды по слоям с существенно различающимися коэффициентами действительной скорости ($u_i = k_i/n_i$), то расчётные зависимости имеют вид

$$u_i \sim \pi T r^{-2} (Q t_{\max}) \quad \text{или} \quad T_i = \pi T r^2 m_i n_i / (Q t_{\max}), \quad (6.11)$$

где T - суммарная проводимость пласта, определённая по результатам кустовой откачки. При известных значениях активной пористости (n_i) найденных, например, из данных лабораторных определений или по аналогии, отсюда определяются послойные коэффициенты фильтрации k_i .

Для правильной диагностики запусков по изложенной схеме необходимы представления о временной последовательности привнесения трассера в скважину отдельными слоями, что реально при малом их числе (два-три) и при достаточно резко различающихся действительных скоростях движения по ним (в противном случае возможно появления "пииков" выходной кривой в результате взаимного наложения привнесения индикатора из ряда слоев). В этой связи точность оценок заметно повышается в двух важных частных вариантах изучаемой слоистой системы, когда она представлена а) водоносным пластом, содержащим тонкий прослой с резко увеличенной проницаемостью, или б) двухслойным пластом (при наличии разделяющего прослоя или без такового) с существенно разными фильтрационными свойствами слоев.

При близких показателях свойств пород в пределах многослойного пласта, выходная индикаторная кривая, имеющая сравнительно плавный и относительно симметричный характер, может трактоваться, в первом приближении, как отражение закона распределения коэффициента действительной скорости фильтрации k_i/n_i в пределах пласта. В частности, предполагая величины пористости для отдельных слоев близкими, получим значение коэффициента вариации W_k постоянной проницаемости

В условиях, когда отдельные элементы опробуемой толши характеризуются заметно различающимися химическими или температурными показателями подземных вод, большую помощь в расшифровке результатов откачек могут оказать расчетные модели, учитывающие смещение воды в центральной скважине. Таким путем наиболее четко контролируется соотношение расходов, поступающих из разных элементов разреза, вскрытого центральной скважиной. Однако при откачках из пластов с перетеканием такой подход мало эффективен - за исключением весьма долговременных опытов [13].

6.3.2. Оценка плановой фильтрационной анизотропии

Методы, основанные на запуске трассера, в целом гораздо чувствительнее к анизотропии, чем пьезометрия.

В первом приближении, о параметре плановой анизотропии ($\chi_h^2 = k_x / k_y$) можно судить по соотношению коэффициентов разбавления индикатора $\alpha_p = C_{\max} / C_0$ при пакетных запусках в пьезометры, расположенных на главных осях анизотропии: грубо говоря, для равноудаленных от точки запуска скважин $\chi_h^2 \sim \alpha_{px} / \alpha_{py}$. Однако дисперсия и массообмен между блоками и трещинами могут резко смещать эту оценку, особенно при большой разнице в удалениях точек запуска от точек наблюдения.

Прослеживание движения трассера по разным лучам скважин опытно-фильтрационных кустов позволяет повысить надежность оценок. При размещении наблюдательных (запускных) скважин куста на главных осях анизотропии (на расстояниях r_{x1} и r_{x2}) время фиксации пиков индикаторной волны ($t_{\max}$) в откачивающей скважине связано с коэффициентом анизотропии $\chi_h = \sqrt{(k_x / n_x) / (k_y / n_y)}$ соотношением

$$t_{\max 1} / t_{\max 2} = \chi_h'^2 (r_{x1} / r_{x2})^2 \quad (6.12)$$

При расположении скважин по лучам, образующим углы φ_1 с направлением минимальной проницаемости,

$$\frac{t_{\max 1}}{t_{\max 2}} = \frac{\chi_h'^2 \sin^2 \varphi_1 + \cos^2 \varphi_1}{\chi_h'^2 \cos^2 \varphi_2 + \cos^2 \varphi_2} \left(\frac{r_1}{r_2} \right)^2 \quad (6.13)$$

Если предположить расчётные значения n_x и n_y равными, то $\chi_h' = \chi_h^2 = k_x / k_y$, в противном случае оценка χ_h получается несколько завышенной.

Постановка опытов должна сводить к минимуму возможное искажение результатов, возникающее вследствие наложения на опытное возмущение естественного фильтрационного потока (разд. 5.4.1). В то же время, для количественной оценки показателя χ_h необходимы чёткие представления о структурных особенностях пласта, определяющих выбор пространственных осей анизотропии. Для этого привлекается информация о геолого-структурных особенностях опытного участка. На малых глубинах может оказаться полезным применение методов поверхностной геофизики, в частности, метода заряженного тела [13,20].

6.3.3. Изучение параметров субвертикальной фильтрации.

Если в процессе проведения полевых экспериментов в пласте формируются фильтрационные потоки со значительной вертикальной составляющей скорости, то создаются предпосылки для изучения параметров фильтрации и массопереноса вкrest напластования пород [13], в частности, коэффициента профильной анизотропии фильтрационных свойств пород $\chi_1^{-2} = k_z / k_{\perp}$ (k_z и $k_{\perp}$ - компоненты коэффициента фильтрации)

Для интерпретации опытов используются приведенные ранее приближенные решения (5.14) и (5.15). Эти решения допускают линеаризацию выходных кривых. В частности, для вертикального дуплета линеаризация опытных данных производится в координатах $(1 - \bar{C})^{-2} \div 1/l$ по величине l_0 (тангенс угла наклона прямой к оси абсцисс) находится отношение χ_1^{-2}/n . Одновременно может проводиться контрольная оценка значений коэффициента фильтрации k_z - по соответствующим зависимостям для стационарной фильтрации, легко получаемых с использованием принципа суперпозиции решений для несовершенных скважин [19]

Результаты опытов могут искажаться естественным фильтрационным потоком, так что желательно выдерживать критерий:

$$Q/(\pi v_c h^2) > 2 \div 3, \quad (6.14)$$

где h - расстояние между центрами фильтров скважин.

Если в выходной индикаторной кривой наблюдаются несколько пиков, то это, как правило, свидетельствует о плохом техническом состоянии запускной скважины (утечки в различных интервалах по длине колонны) или о невозможности рассмотрения миграции в рамках представлений о сплошной среде

Рассмотренные в этом разделе модели допускают обобщение на случай опробования гетерогенных трещиновато-пористых толщ [7], однако на практике подобными решениями (даже в графическом виде) пользоваться очень трудно ввиду их низкой чувствительности по отношению к комплексному массообменному параметру.

6.4. Оценки влияния природных и технических факторов, искажающих результаты индикаторных опробований

6.4.1. О возможном несоответствии структуры миграционного потока модельным представлениям.

Наиболее серьезное влияние на точность обработки опытов по приведенным выше зависимостям оказывают естественный фильтрационный поток, профильная неоднородность пород (в пределах интервала опробования) и анизотропия их фильтрационных свойств.

Роль этих факторов при их обособленном проявлении рассматривалась в работе [13]. В ней показано, что в экспериментальных схемах с наличием индикатора при пренебрежении естественным потоком уровень погрешностей оказывается довольно высоким уже при $\bar{v} = v_e r m' Q > 0,05$ (v_e - скорость естественного потока). Проявление плановой анизотропии ощутимо искажает опытные результаты при $\chi_{\text{пл}}^2 = k_{\text{пл}}' / k_{\text{пл}} < 0,7 - 0,8$ ($k_{\text{пл}}$ - минимальное значение коэффициента фильтрации). Максимальный уровень погрешностей наблюдается для расчётных точек луча, направленного против естественного потока или ориентированного по главной оси анизотропии с минимальной проницаемостью.

При дуплетной схеме опробования роль естественного потока проявляется не только во временном сдвиге опытных кривых, но и в дополнительном разубоживании индикатора в откачивающей скважине за счет притока в нее фоновой воды. Для анализа влияния последнего фактора можно воспользоваться стационарным решением соответствующей краевой задачи миграции, графики которого приводятся в работе [13]. Следует отметить два предельных случая

1) при расположении нагнетательной скважины выше по потоку подземных вод относительно откачивающей (находящейся с ней на одной линии тока) влияние естественного потока на результаты опыта минимально;

2) в противоположном случае, когда откачивающая скважина находится выше по потоку, критерий пренебрежимости влияния последнего на результаты опыта имеет вид $\bar{v} = v_e r m' Q < 0,05 - 0,1$. Соответствующий критерий может оказаться более жестким, если в расчетах используются концентрации $\bar{C} > 0,6 - 0,7$.

При известной (произвольной) ориентации оси дуплета относительно главных осей фильтрационной анизотропии, для обработки опыта (при $v_e = 0$) можно использовать выражение (5.11), в котором

$$I_0 = \pi r^2 m n (\cos^2 \varphi + \chi_h \sin^2 \varphi) / (3Q\sqrt{\chi_h}), \quad (6.15)$$

где φ - угол между осью дуплета и направлением минимальной проницаемости.

Искажающие эффекты связаны также с влиянием естественного фильтрационного потока в неоднородных трещиноватых средах. Нагнетание индикаторной жидкости в отдельные трещины или трещинные зоны, гидродинамически слабо связанные с соседними зонами, может приводить в этом случае к внедрению природных вод в область, которая при планово-двумерном рассмотрении миграционной задачи считается "водораздельной". Наблюдательные скважины, находящиеся в этой области, будут фиксировать конвективный разрыв границы раздела между нагнетаемой и пластовой водой, что может ошибочно трактоваться как проявление двойной пористости трещиноватых пород [7].

6.4.2. Гидрохимическая инерционность наблюдательных скважин.

Разбавление индикатора в наблюдательной скважине и часто пониженная проницаемость прискважинной зоны приводят к тому, что концентрация индикатора в пласте C (непосредственно на внешней стенке скважин) отличается от концентрации в скважине C_s ; период времени, в течение которого отмечается такое несоответствие, соизмерим подчас с длительностью самого опыта. В этом случае говорят о гидрохимической инерционности наблюдательных скважин, используемых для регистрации индикатора. Степень инерционности может характеризоваться безразмерным параметром:

$$\alpha = \pi r_w / (2 \xi r n), \quad (6.16)$$

где r_n - радиус наблюдательной скважины; ξ - коэффициент искажения потока вблизи скважины; для закольматированных скважин ξ изменяется в зависимости от состояния прискважинной зоны от 0 до 2 (при $\xi = 2$ - скважина без скин-эффекта).

Недоучёт инерционности для гомогенных пород ведет к заметному завышению расчётных значений показателей переноса: пористости в определении активной пористости ε_a и константы микродисперсии ε_d имеют порядок:

$$\varepsilon_a = (n_p - n)/n \sim \alpha, \quad \varepsilon_d = (\delta_p - \delta)/\delta = 2\alpha^2 r/\delta \quad (6.17)$$

(n_p и n , δ_p и δ - расчётное и истинные значения пористости и константы микродисперсии).

Из соотношений видно, что в трещиноватых породах (здесь обычно $\alpha > 0.5$ -1) инерционностью, как правило, пренебрегать нельзя.

погрешности в определении параметров реально могут достигать сотен процентов. То же можно сказать и о пьезометрах с высокими значениями “скин-эффекта” в песчаных грунтах, причём влияние инерционности особенно велико при оценке параметра микродисперсии.

Для гетерогенного трещиновато-пористого пласта с низкими массообменными свойствами максимальные погрешности в оценке активной трещиноватости могут быть найдены по первой формуле (6.17) При выполнении условия

$$\eta = \alpha_m \xi r^3 / (r_w q) > 5, \quad (6.18)$$

погрешности снижаются до 15-20 %, однако, лишь при использовании точек индикаторной кривой со значениями относительной концентрации $\bar{C} > 0,2-0,3$. В отличие от опытов в скальных трещиноватых породах, при опробовании трещиновато-пористых комплексов с высокими поглощающими характеристиками блоков влияние инерционности наблюдательных скважин может заметно сглаживаться (целенаправленным варьированием опытными параметрами - расходом нагнетания, расстоянием между скважинами).

Для теплового индикатора большая диффузионная составляющая (в сравнении со случаем химического индикатора) сводит отрицательное влияние инерционности скважин к минимуму, но, при условии незначительного различия между температурой трещины и средней температурой блоков в пункте наблюдения, иначе, - оценки получаются близкими к случаю солевого индикатора в гетерогенной среде.

6.5. О привлечении математических моделей к планированию и интерпретации ОМО.

Математические (численные и численно-аналитические) методы моделирования фильтрации и массопереноса находят все более широкое применение в гидрогеологической практике. Начинается внедрение этих методов и в сферу анализа данных индикаторных опробований, хотя специализированных программ явно недостаточно и большинство из них мало известно в производственных организациях. Тем не менее при корректной схематизации гидрогеологических условий и правильной математической формулировке задачи, такой анализ может базироваться и на достаточно разработанных программных средствах, предназначенных для моделирования традиционных задач геофильтрации и миграции в двух- и трехмерной постановке. Основное внимание здесь должно быть уделено вопросам надежности аппроксимации на сеточных моделях эксплуатационных и наблюдательных скважин. Во всяком случае, не вызывает сомнения, что работы в этом направлении должны включать:

1) модельное планирование индикаторных экспериментов, что предполагает

а) сопоставление эффективности различных опытных схем (“проигрывание” на едином модельном “шаблоне” различных вариантов воздействия на пласт (например, кустовое нагнетание, с одной стороны, и дуплетный эксперимент, - с другой);

б) выбор режимов опробования и схем размещения наблюдательных скважин;

2) собственно интерпретация выходных кривых с прямой оценкой и учетом факторов, трудно поддающихся описанию в рамках аналитических моделей (например, влияние фильтрационной неоднородности, взаимодействие опытного возмущения и бытового потока подземных вод, колебание концентрации индикатора и дебита его нагнетания в ходе опыта и некоторые другие);

3) анализ чувствительности эксперимента по отношению к определяемым параметрам в рамках различных экспериментальных схем.

ПРИЛОЖЕНИЕ I. Лабораторные индикаторные эксперименты как альтернатива опытным опробованиям.

1. Общие положения и предпосылки к дифференциации экспериментальных схем.

Лабораторные методы изучения массопереноса имеют как самостоятельное значение, т.е. их результаты могут непосредственно использоваться при построении моделей и в прогнозных расчетах, так и вспомогательное - при расшифровке данных полевых экспериментов и наблюдений. Важно подчеркнуть, что в целом роль лабораторных испытаний в общем комплексе экспериментальных работ здесь намного заметнее, чем при геофильтрационных исследованиях. Более того, лабораторные опыты миграционной направленности могут рассматриваться как эффективная альтернатива полевым экспериментам. В частности, они обычно являются базовыми для оценки физико-химических взаимодействий в пористых образованиях, массовое изучение которых полевыми опробованиями мало реально.

Перед лабораторными исследованиями ставятся несколько взаимосвязанных задач: определение миграционных параметров для нейтральных стоков; выявление физико-химической природы процессов преобразования сточных растворов; оценка параметров, контролирующего протекание межфазовых физико-химических реакций, изучение диффузионных и осмотических процессов; изучение влияния состава стоков и напряженного состояния пород на фильтрационные свойства последних. Опыты осуществляются с нецементированными гранулярными породами водоносных горизонтов, с глинистыми породами разделяющих пластов, с пористыми блоками трещиноватых коллекторов, с естественными и техногенными отложениями, экранирующими бассейны промстоков. При опытах с породами первой из упомянутых категорий можно пытаться ориентироваться на дисперсионно-конвективный режим массопереноса в образце, а в большинстве остальных случаев - на молекулярно-диффузионный режим, по крайней мере при коэффициентах фильтрации, меньших 0,1 м/сут. Эксперименты в слабопроницаемых породах могут, однако, заметно усложняться из-за необходимости достаточно тонких способов индикации, не смешивающих существенно заданных или измеряемых условий на торцах образца: время накопления объема пробы должно быть намного меньше общего времени регистрации расчётного участка опытной кривой. Поэтому, в частности, может представиться целесообразным применение косвенных (без отбора проб)

методов непрерывного прослеживания – резистивиметрического, потенциометрического, фотометрического, и т.п.

На первом этапе проводятся опыты с инертными компонентами. Полученные результаты используются при анализе экспериментов направленных на оценку параметров физико-химических взаимодействий реальных сточных растворов с породами. Соответствующие эксперименты могут вестись в “статическом” (без конвекции) или динамическом режиме.

Достоверность получаемых результатов во многом определяется сохранностью естественной структуры грунтов. Если же образцы ненарушенной структуры отобрать не удастся, то необходимо по крайней мере их предварительное уплотнение под “бытовыми” нагрузками¹, при этом для глинистых пород важно обеспечить состав поровых вод примерно идентичный естественному. Опыты на “порошках” из твердых пород или на глинистых “пастах” часто оказываются непредставительными. Подчеркнем поэтому, что не следует отождествлять рекомендуемые ниже “статические” модификации опытов с экспериментами на порошках, подготовка образца, создавая дополнительные свободные поверхности для сорбции, резко увеличивает ее и или делает необратимой.

2. Определение параметров сорбции и полного обмена.

При опробовании хорошо проницаемых песчаных грунтов для оценки параметров изотермы сорбции опыт заключается в медленной фильтрационной пропитке образца исследуемым раствором до установления физико-химического равновесия между адсорбатом и адсорбентом – до тех пор, пока на выходе из образца не фиксируется постоянная концентрация, равная входной.

Формула для оценки концентрации вещества на породе (в единице её объема) q , равновесной заданной концентрации раствора c имеет вид

$$q = (cV - \sum c_i V_i) / V_n - nc, \quad (1.1)$$

где V и V_n – объем фильтрационной колонны и раствора, поступившего в нее за время опыта; c_i – текущая концентрация (в пределе стремится к значению c), непрерывно измеряемая на выходе из колонны в порциях объемом V_i . Активная пористость n может быть определена по аналогичной схеме с инертным индикатором (его входная концентрация c_n)

$$n = V / V_n - (\sum c_n V_i) / (c_n V_n). \quad (1.2)$$

¹ Это однако не гарантирует от серьезных погрешностей

Если насыщение происходит достаточно медленно, так что кинетикой сорбции допустимо пренебречь¹, то по сдвигу выходных кривых на индикаторных графиках ($c \neq 1$), построенных для инертного и сорбирующегося компонентов, может быть непосредственно оценен параметр распределения K_d (линейная изотерма). Для точки $\bar{c} = 0,5$ этот сдвиг составляет

$$\Delta t_{0,5} = l K_d v, \quad (1.3)$$

где l - длина опытной колонны, v - скорость фильтрации.

В слабопроницаемых глинистых грунтах или в пористых блоках трещиноватых пород эксперименты осуществляются в режиме длительной (обычно несколько десятков суток) молекулярно-диффузионной пропитки образца, что позволяет обычно пренебречь влиянием кинетики сорбции. При этом глинистые породы, а также образцы цементированных, но набухающих (с большим содержанием глинистых минералов) пород помещают в жесткую кассету, препятствующую разрушению их структуры.

Количество вещества, идущего на насыщение образца (объемом V_0) и характеризующее сорбционную способность (при данной концентрации), определяется по разности между исходной c_0 и равновесной концентрациями раствора:

$$q = V(c_0 - c) / V_0 = n_0 c, \quad (1.4)$$

где n - общая (доступная для диффузии) пористость. Для повышения чувствительности опыта рекомендуется, чтобы ёмкость свободного раствора не слишком сильно превышала ёмкость порового пространства образца.

По аналогичной схеме, но с инертным компонентом, рассчитывается пористость пород:

$$n_0 = V(c_{in} - c_0) / (V_0 c_0), \quad (1.5)$$

впрочем, чаще всего можно ограничиться оценкой параметра n_0 весовым способом.

Достаточно тривиальной является схема статических экспериментов по изучению поверхностной сорбции, характеризующей концентрирование вещества на стенках трещин в комплексах трещиноватых и трещиновато-пористых пород. Оценка прироста массы вещества на поверхности образца Δq (г/см²) при замеренном изменении концентрации вещества в растворе Δc (г/см³) позволяет рассчитать показатель сорбционного распределения $k_d = \Delta q / \Delta c$ (см). Основные сложности связаны с отбором и подготовкой представительных образцов.

¹ По утверждению тому должна служить параллельность кривых, полученных для сорбируемого и инертного индикаторов.

поверхность которых отражала бы состав вторичных минералогических образований, покрывающих стенки трещин в реальных коллекторах подземных вод.

Во всех рассмотренных вариантах опыты при различных исходных концентрациях позволяют установить вид и параметры изотермы сорбции $q = f(c)$.

Обратим внимание, что традиционная методика лабораторных испытаний не делает различий между сорбцией и осаждением.

При исследовании ионного обмена прежде всего определяют общую емкость поглощенного комплекса и его компонентный состав - по результатам обработки образцов стандартными растворами метиленового голубого, софронина-Т или солями аммония. Для того, чтобы учесть привнос катионов за счет растворения солей, необходимо параллельно определять содержание в породе хорошо растворимых соединений - методом водной вытяжки. Подготовительный этап опытов заканчивается "восстановлением" ионообменного комплекса испытуемых образцов, т.е. замещением разнообразных катионов, входящих в состав емкости поглощения, катионами одного элемента. Это позволяет в дальнейшем заметно упростить интерпретацию опытных результатов, используя балансовые оценки.

При изучении параметров ионообменных реакций оптимальным является опытный режим с поддержанием постоянной ионной силы раствора: в этих условиях коэффициенты активности катионов в различных растворах, которыми обрабатываются образцы, остаются постоянными, что позволяет пользоваться при расчётах величинами аналитически определяемых концентраций c_i и q_i . Постоянство значений коэффициента K_{i2} , оцениваемых в различных диапазонах изменения концентраций c_i , свидетельствует о корректности опытной схемы. При этом дополнительно рассчитывается кажущийся коэффициент распределения $K_i = f(c_i)$, колебания которого характеризуют степень нелинейности процесса. Возможно, однако, искажение опытных результатов, обусловленное наложением физической сорбции и растворения. В этом смысле, безусловные преимущества имеет учёт суммарного вклада ряда подобных обменных механизмов через эмпирические константы изотермы обмена. Эксперимент заключается в обработке образцов растворами с различной концентрацией исследуемого компонента. По результатам строится график зависимости содержания компонента в предварительно восстановленной твердой фазе от содержания его в растворе и определяются параметры полученной изотермы.

Как и в сорбционных опытах, при изучении ионообменных процессов недопустимо нарушение естественной структуры образца, например, использование стандартной методики на порошках приводит к

получению параметров, характеризующих обменные свойства пород с существенным завышением. Для регистрации содержания компонентов в растворе рекомендуется пользоваться ионоселективными электродами, так как они удобны в обращении, надёжны, а главное, позволяют проводить анализ в очень малых объёмах исследуемого раствора, что особенно важно при изучении обменных процессов в блоках пористых пород ненарушенного сложения.

3. Изучение диффузионных параметров.

В настоящее время схемы опытов по определению значений коэффициента молекулярной диффузии, инвариантных к исследуемому диапазону изменения концентрации, достаточно разработаны. Наиболее простые и доступные из этих схем ориентируются на использование лабораторных установок типа диффузионной ячейки. В зависимости от схемы опыта и его временных диапазонов, могут достигаться различные характерные режимы массопереноса через образец – нестационарный, квазистационарный и стационарный. С этой точки зрения, достаточно универсальной является двухкамерная лабораторная установка. Например, она позволяет поддерживать в течение всего опыта постоянную концентрацию индикатора c_{01} на входной границе образца, в то время как в регистрационной камере (объёмом V_{k2}), где накапливается индикатор, производится фиксация текущих его концентраций c_2 – любым методом, не требующим отбора проб. Результаты опыта – при легко осуществимом условии $c_{01} \gg c_2$ – должны отвечать линейной зависимости

$$c = c_2/c_{01} = \beta(D_M t/l_0^2 - n_0/b), \quad (1.6)$$

где $\beta = F_0/l_0 V_{k2}$ – постоянная прибора (l_0 и F_0 – длина образца и площадь его поперечного сечения); $t > t_{ak} = l_0^2 n_0/(2D_M)$. Отсюда по тангенсу угла φ наклона прямой к оси времени на графике $c \div t$ находится параметр

$$D_M = l_0^2 \operatorname{tg} \varphi \beta. \quad (1.7)$$

Возможна и другая модификация опыта, предполагающая проведение наблюдений за изменением концентрации в обеих камерах, в одну из которых в начальный момент инжектируется фиксированная масса индикатора. Обработку опыта (при достижении квазистационарного режима переноса в образце) проводят путем нанесения экспериментальных

точек на график в координатах $\ln \left(\frac{c_{01} - c_{02}}{c_1 - c_2} \right) \div t$, где c_{01} и c_{02} –

исходная (в запускной камере) и фоновая концентрации компонентов, а c_1 и c_2 – текущие значения концентрации в камерах. Для достаточно больших значений времени график должен иметь линейный вид: по тангенсу угла наклона φ прямой к оси времени определяется искомый параметр.

$$D_M = .1tg(\varphi),$$

где $.1 = (V_{k1} + V_{k2}) / L_n F_n$ - постоянная прибора; L_n и F_n - длина и площадь поперечного сечения образца; V_{k1} и V_{k2} - объёмы камер.

Наконец, стационарная постановка опыта предполагает поддержание на обеих границах образца постоянных концентраций, а расчет параметра D_M производится по установившемуся значению массового потока через образец (в соответствии с законом Фика)

В опытах с твердыми разностями пород (пористыми блоками), целесообразно ориентироваться на режим молекулярно-диффузионного насыщения образца, погруженного в сосуд с раствором (объемом V , соизмеримым с объемом $n_p V_p$ порового пространства). Жидкость в сосуде в процессе опыта постоянно перемешивается, и поэтому текущая концентрация вещества в растворе c равна концентрации вещества на поверхности образца. Для опытных оценок используют результаты наблюдений за уменьшением концентрации (от исходного значения c_0) компонентов в жидкости, окружающей образец, - по датчикам, не требующим отбора проб. В качестве расчетной используется формула

$$c = c_0 \exp(\alpha^2 t) \operatorname{erfc}(\alpha t^{1/2}), \quad (1.9)$$

справедливая при $D_M / (m_k^2 n_p) \ll 0.2$. $\alpha = \omega (D_M n_p)^{1/2} / V$ (ω - площадь поверхности образца). При $\alpha^2 t < 0.1$ функция c имеет асимптотическое представление:

$$c = c_0 \left(1 - 2\alpha \sqrt{t / \pi} \right), \quad (1.10)$$

позволяющее обрабатывать опытные результаты по графику зависимости $(1 - c/c_0) \div t^{1/2}$, который должен иметь прямолинейный вид. По тангенсу угла φ наклона прямой к оси абсцисс рассчитывается коэффициент молекулярной диффузии:

$$D_M = \pi V^2 \operatorname{tg}^2 \varphi / (4 \omega^2 n_p).$$

Дополнительную информацию об интенсивности молекулярной диффузии дает оценка концентрации индикатора в поровых растворах, экстрагируемых из блоков после прекращения опыта.

ПРИЛОЖЕНИЕ II. Основные положения гидрогеологических прогнозов качества подземных вод на водозаборах.

Главной задачей такого рода прогнозов является оценка защищенности подземных вод на водозаборах от загрязнения, в частности, обоснование размеров и границ зон их санитарной охраны. На водозаборах подземных вод, находящихся в стадии разведки, прогнозные (разведочные) оценки позволяют выявить круг наиболее важных гидрогеологических, в частности, миграционных, параметров, подлежащих первоочередному опытному изучению.

Основу прогнозов качества подземных вод на водозаборах в условиях техногенного загрязнения составляют гидрогеохимические построения (базирующиеся на изучении устойчивости природных физико-химических равновесий) [8], а также анализ геомиграционных процессов [1,5,13,18,19], оперирующий представлениями о механизмах, параметрах и расчётных схемах массопереноса. В настоящем разделе рассматривается методика геомиграционного прогнозирования, которое информационно обеспечивается комплексом опытно-миграционных работ (опробований).

Рекомендации к построению прогнозных расчетных схем в типовых условиях

Прогнозные оценки изменений качества подземных вод на водозаборах выполняются для условий миграции растворенных веществ от поверхностных источников загрязнения, а также для условий загрязнения (засоления) водоносных горизонтов глубинными высокоминерализованными растворами, подтягивающимися к эксплуатационным скважинам. Здесь мы остановимся на аналитических методах расчетов, имея в виду, что в ряде случаев они могут дополняться исследованием геофильтрации и миграционных процессов на численных (математических) моделях.

Оценка качества подземных вод на водозаборах, попадающих в область влияния поверхностных источников загрязнения

Первые этапы прогнозирования связываются с оконтуриванием областей захвата потоков загрязненных вод водозаборными устройствами. В общем случае с этой целью строится сетка движения подземных вод, на которой выделяются так называемые нейтральные линии тока, гидравлически разделяющие воды с различным качеством. Так как соответствующие границы могут быть существенно размыты за счет

поперечной дисперсии, то подобные гидродинамические построения впоследствии проверяются дополнительными миграционными расчетами.

В идеализированных условиях, когда, например, водозабор сводится к линейной или контурной системе скважин (“большому колодцу”), а поток подземных вод в ненарушенных условиях близок к плоскопараллельному, параметры области захвата могут быть рассчитаны по аналитическим зависимостям [6, 9, 11]. Так, при функционировании линейного водозабора (длина ряда скважин $2b_0$) в неограниченном по простиранию пласте (рис.11.1) положение нейтральной линии тока характеризуется координатами: а) x^0 , определяющей расстояние до предельного контура захвата вод ниже по потоку от водозабора; б) $\pm y_0/2$, определяющими ширину зоны захвата на линии водозаборных скважин (ориентированной ортогонально направлению естественного потока, имеющего удельный расход $q_c = v_c m$); в) $\pm y(\infty)/2$, определяющими ширину зоны захвата на весьма большом удалении от водозабора:

$$x^0 = \frac{b_0}{\operatorname{tg}(2\pi b_0 q_0 / Q_0)} \quad , \quad y_0 = 2b_0 + \frac{Q_0}{2q_c} \quad , \quad y(\infty) = 2b_0 + \frac{Q_0}{q_c} \quad (11.1)$$

При $2b_0 \rightarrow 0$ приходим к случаю “точечного” водозабора.

Далее в пределах выделенных областей проводят детальные миграционные расчёты. Рассмотрение соответствующих прогнозных задач обычно предполагает анализ процесса переноса загрязнений последовательно в рамках плановых и профильных двумерных (или квазитрёхмерных) расчетных моделей; иногда целесообразны и трёхмерные модели.

Обращение к плановым миграционным моделям позволяет прогнозировать развитие процессов загрязнения подземных вод под влиянием наиболее значимых факторов массопереноса - конвекции и дисперсии. Однако тем самым априори полагается, что загрязняющие компоненты равномерно и очень быстро (в сравнении со временем развития процесса в целом) распространяются по всей мощности пласта; а это не всегда так, если принять во внимание реальную неоднородность (слоистость) пород и несовершенство источников загрязнения по степени вскрытия пластов, особенно, если загрязнение привносится с поверхности инфильтрационными - атмосферными - водами.

Надёжность прогнозов в рамках данной модели возрастает с ростом гидродинамической активности источников загрязнения: в этом случае достаточно быстро происходит конвективный разнос загрязнения по мощности пласта. В образующихся таким образом **о р е о л а х** **р а с -**
т е к а н и я процесс контролируется практически полностью конвекцией вдоль линий тока ψ_c .

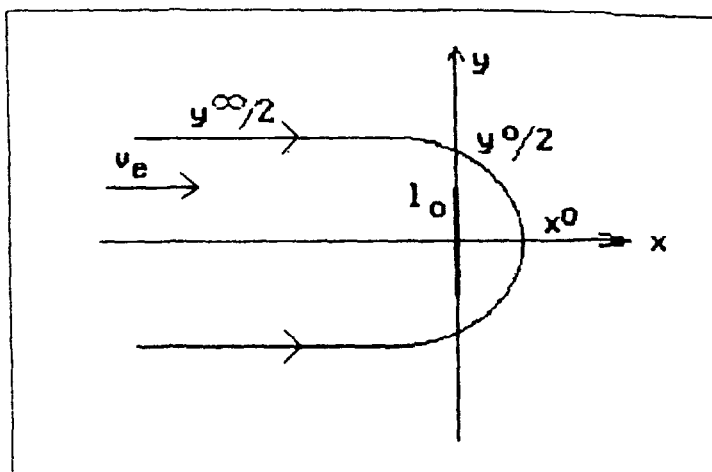


Рис II.1. Характерные точки нейтральной линии тока для условий гидродинамического взаимодействия линейного водозабора с естественным фильтрационным потоком.

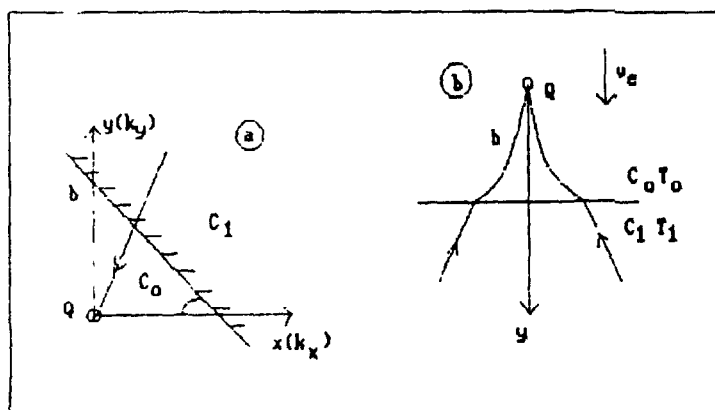


Рис II.2. Типовые схемы для условий подтягивания высокоминерализованных вод к водозаборному узлу:
а - плано-анизотропный пласт,
б - плано-неоднородный пласт.

Для того, чтобы определить пространственное положение концентрационного фронта поршневого вытеснения в момент t_0 , необходимо предварительно построить гидродинамическую сетку движения и рассчитать скорость фильтрации вдоль характерных линий тока. Тогда длины пробега меченных частиц вдоль выделенной линии тока l_0 находятся посредством суммирования элементарных интервалов пути $\Delta l_j = v_{j, \text{ср}} \Delta t_j / n$

$$l_0 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^k v_{j, \text{ср}} \Delta t_j \quad (11.2)$$

здесь n - пористость (трещиноватость) пласта; $j = 1, 2, \dots, k$ (k - принятое при расчётах число интервалов пути и времени); $v_{j, \text{ср}}$ - осреднённое значение скорости на этих интервалах.

Наоборот, временная координата фронта поршневого вытеснения t_0 , т.е. время его продвижения вдоль траектории меченной частицы на расстояние l_0 (например, равное отрезку пути от источника загрязнения до водозабора) определяется из кинематического выражения:

$$t_0 = n \sum_{j=1}^k \Delta l_j / v_{j, \text{ср}} \quad (11.3)$$

Рассчитывая миграцию загрязнённых растворов в пределах различных лент тока, замыкающихся на водозаборах, легко учесть и роль процессов разбавления этих растворов чистыми пластовыми водами.

Расчёты по лентам тока дополняются оценками роли продольных гидродисперсионных эффектов, приводящих к смешению сточных и пластовых вод на фронте взаимодействия - в зоне длиной Δl_m . С этой целью используется приближённое равенство:

$$\Delta l_m \approx 6,6 \sqrt{\delta_1 l_0} \quad (11.4)$$

Подобная детализация особенно важна при анализе миграции в трещиноватых пластах, обладающих высокими рассеивающими свойствами

Для анализа миграции от пассивных в гидродинамическом отношении источников, дающих ореолы рассеяния, привлекаются плановые модели, учитывающие эффекты поперечной дисперсии. Характерной особенностью этих решений является наличие у них стационарных асимптотик (2.8)-(2.10), описывающих, таким образом, предельные масштабы загрязнения водоносных пластов.

Профильные миграционные модели отражают возможность дифференциации компонентов вдоль вертикали, вызванной

1) профильной фильтрационной неоднородностью водоносных толщ ;

2) профильной двумерностью фильтрационного потока, в частности, деформацией его профильной структуры вблизи бассейна промстоков, существенно несовершенного по степени вскрытия водоносного комплекса;

3) поступлением вод иного состава по площади распространения водоносного пласта путем инфильтрации и перетекания;

4) плотностной конвекцией (требующей нередко применения более сложных трёхмерных моделей).

Исследование задач миграции в профильной постановке имеет первостепенное значение для комплексов стратифицированных пористых пород, в которых выделяются выдержанные по пространству зоны с заметно различающейся проницаемостью. Эти зоны рассматриваются в качестве базовых элементов при построении детерминированных моделей миграции, описывающих начальные этапы загрязнения подземных вод (расчетные схемы послойного переноса, неограниченной и сосредоточенной ёмкости - разд.2.3.1).

На весьма длительных этапах миграции поперечная дисперсия и перетекание приводят к выравниванию концентрационного профиля в пласте, что допускает рассмотрение процесса в рамках усреднённой асимптотической (конвективно-дисперсионной) модели (2.4). Параметрами её являются суммарная ёмкость пород - m^* (параметр, близкий к средневзвешенной по мощности пласта пористости) и коэффициент продольной макродисперсии δ_L^* , в котором эффективно учитываются кинетические механизмы межслоевого взаимодействия и соотношение мощностей хорошо и слабофильтрующих слоев (разд. 2.3.1). На применимость данной расчётной схемы накладывается довольно жесткое ограничение, связанное с большой длительностью рассматриваемых периодов миграции, нередко сопоставимых с периодом эксплуатации объекта.

Анализ переноса в трещиновато-пористых породах, пласты которых не имеют выдержанных по площади водоупорных профильных зон, проводится на базе расчётных моделей, рассмотренных в разд.2.3.2. При этом предварительная плановая и профильная фрагментация фильтрационного потока линиями тока Ψ_i позволяет, пренебрегая в первом приближении поперечной дисперсией между фрагментами, использовать квазиодномерные варианты этих схем, вводя в соответствующие аналитические зависимости характерное время $t_0(\Psi_i)$. При $t_0 > \eta > 10$ приходим к асимптотическому решению (2.4), в котором необходимо параметры m и δ заменить их "гетерогенными" аналогами:

$$n^* = n + n_0, \quad \delta^* = v/\alpha_m n_0 \quad (11.5)$$

Резко усложняет пространственное распределение стоков плотностная конвекция, вызывающая образование их внедряющихся “языков” в нижней (или в верхней) части пласта. Кроме того, она приводит к сравнительно быстрым вертикальным перемещениям стоков, которые могут влиять на интенсивность поперечного (вкrest напластования) конвективно-дисперсионного переноса.

В случае гидродинамически активного источника загрязнения деформация границы раздела разнотных жидкостей учитывается наиболее просто в условиях поршневого (профильно-двумерного) вытеснения, когда допустима плановая фрагментация потока линиями гока. Длина проекции “языка” минерализованных вод на горизонтальную плоскость в пласте постоянной мощности (m) определяется выражением

$$\Delta l_p \approx 1,5 \sqrt{T \Delta \bar{\rho} t / n}, \quad (11.6)$$

где $\Delta \bar{\rho} = (\rho_0 - \rho^0)/\rho^0$ - плотностной градиент (ρ_0 и ρ^0 - плотность минерализованных и пластовых вод), T - проводимость пласта. При этом положение средней точки контакта l_0 может быть найдено по формуле (11.2)

Особой спецификой отличается постановка задачи, отражающая условия сосредоточенного поступления тяжелых или лёгких стоков с интенсивностью, сопоставимой с расходом естественного фильтрационного потока. процесс приобретает ярко выраженный трёхмерный характер и в общем случае для его анализа целесообразно применять математическое моделирование. Иногда трёхмерные модели остаются единственной возможностью и для отражения профильной анизотропии или неоднородности вблизи несовершенной границы пласта (например, реки).

Прогноз миграции к водозаборам высокоминерализованных природных вод из подземных бассейнов

Откачка подземных вод в условиях плановой гидрохимической зональности

При наличии в эксплуатируемом пласте плановой границы раздела пресных ($C = C_0$) и соленых ($C = C_1$) вод, произвольным образом ориентированной относительно осей фильтрационной анизотропии (рис. 11.2,а), решение для функции C имеет вид:

$$C = C_0 + (C_1 - C_0) f(l, l_0), \quad (11.7)$$

$$\text{где} \quad f(t, t_0) = (1/\pi) \arccos \sqrt{t_0/t} \quad (\text{II } 8)$$

$$t_0 = \frac{\pi m b^2 \chi_h n}{Q(1 + \chi_h^2 l g^2 \beta)}.$$

t_0 - время прихода первых порций соленой воды по “кратчайшей” линии тока; $\chi_h = (k_v/k_h)^{1/2}$ - коэффициент анизотропии; β - расстояние до границы раздела жидкостей вдоль оси большей проницаемости В пределе. $C_{\max} = (C_0 + C_1)/2$.

В плано-неоднородном по фильтрационным свойствам пласте гидрогеохимическая граница нередко совпадает с границей раздела двух зон (рис. II.2,б), различающихся гидравлической проводимостью, причём более минерализованные ($C = C_1 > C_0$) воды сосредоточены в зоне с низкой (T_1) проводимостью ($T_1 < T_0$). Соответствующее этому случаю решение (при $\chi_h = 1$ и $v_e = 0$) представлено графически на рис. II 3. Как видно, максимальная (при $t \rightarrow \infty$) концентрация при этом определяется соотношением проводимостей:

$$C_{\max} = C_0 + (C_1 - C_0) / (1 + \bar{T}) \quad (\text{II.9})$$

где $\bar{T} = T_0 / T_1$

Характер гидрогеохимических прогнозов существенно зависит от скорости (v_e) и направления естественного (регионального) фильтрационного потока. Так, при выполнении условия

$$\pi m b v_e / Q > 1 / (1 + \bar{T}) \quad (\text{II.10})$$

“подпор” естественного потока (он направлен к границе, так что $v_e > 0$ - см рис II 2,б) столь значителен, что подтягивания высокоминерализованных вод к водозаборному узлу не происходит. В противном случае, по истечении периода $t = t_0$ (t_0 - время подтягивания первых порций солёных вод - см рис II.4), изменение концентрационной функции вполне ощутимо и носит экстремальный характер: как видно из графика на рис. II 4, величина максимальной концентрации $C_{\max} = (C_{\max} - C_0) / (C_1 - C_0)$ контролируется соотношением проводимостей $T = T_0 / T_1$ и безразмерным параметром $v_e = 2\pi m b v_e / Q$. После достижения предела $C_{\max}$ концентрационная функция асимптотически стремится к своему фоновому значению C_0 ; происходит постепенное “вымывание” солей из зоны, ограниченной нейтральной линией тока.

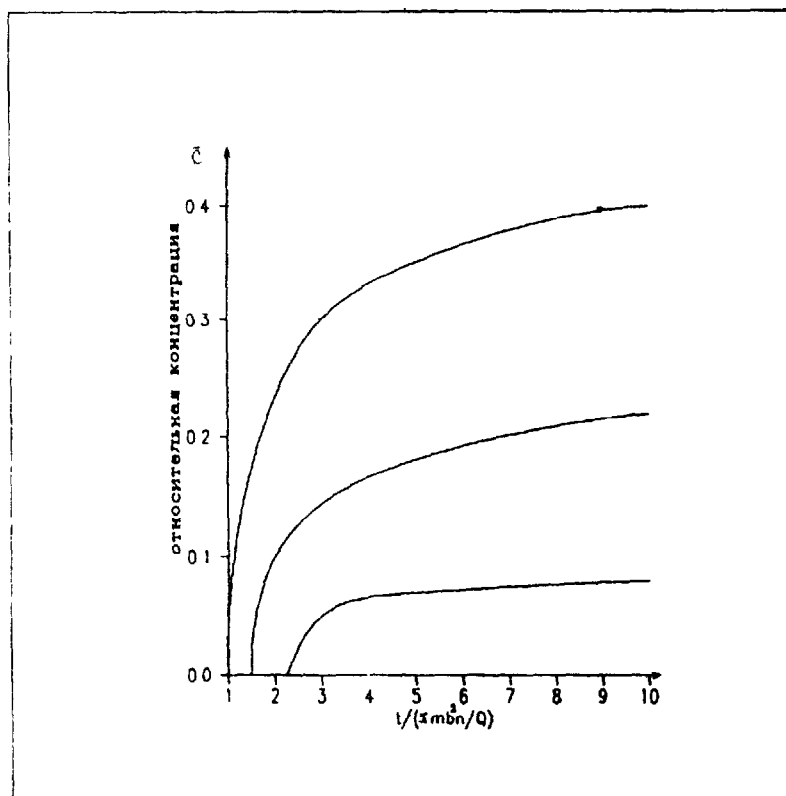


Рис II 3 График для оценки изменения относительной минерализации при водоотборе из плано-неоднородного пласта ($V_e = 0$).

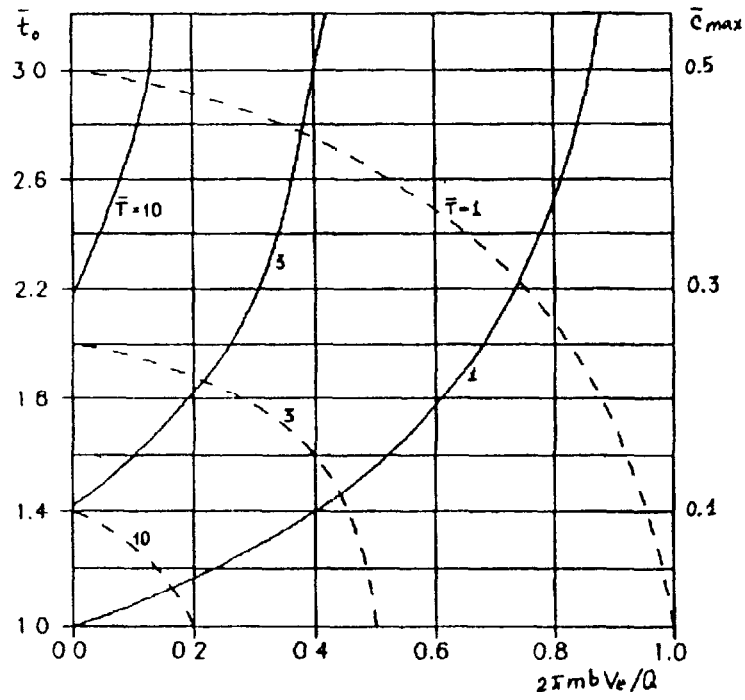


Рис II.4 График для оценки относительного времени прихода первых порций соленой воды t_0 (сплошные линии), и максимальной минерализации C_{max} (пунктирные линии) при отборе из плано-неоднородного пласта.

$$t_0 = Q t_0 / \pi m b^2 n, T = T_0 / T_1, V_e > 0$$

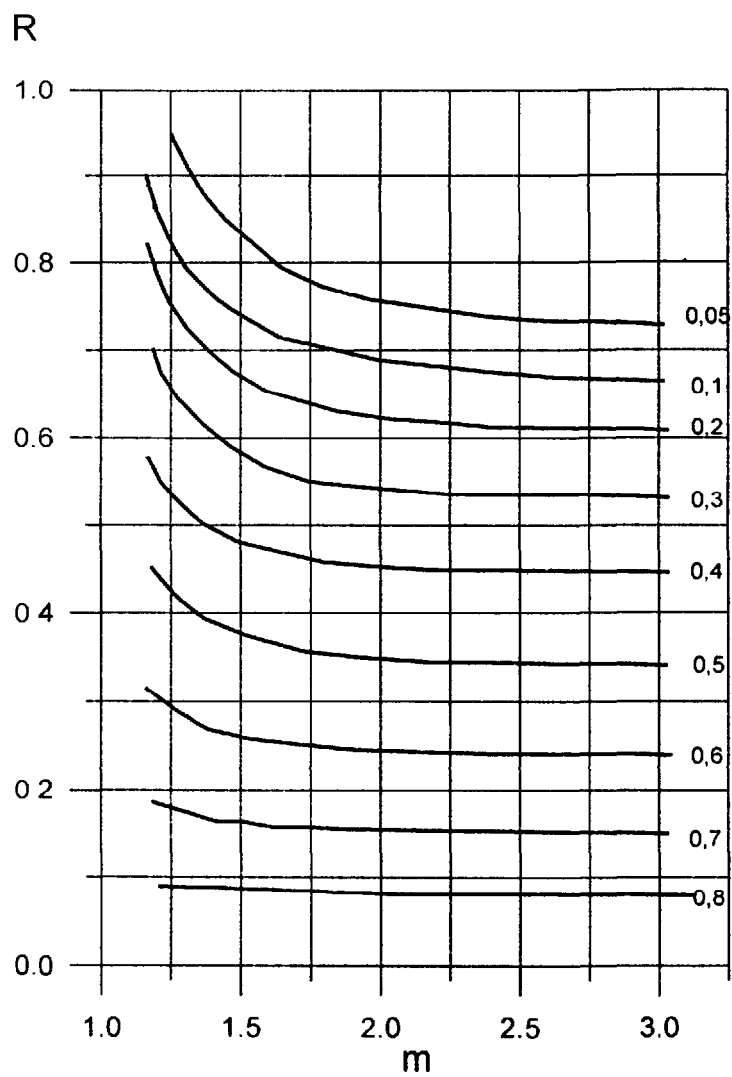


Рис. II.5. График безразмерной функции $R(m, l)$

Откачка подземных вод в условиях профильной гидрогеохимической зональности

Для “большого колодца” в однородном, ограниченном (по мощности) пласте с исходной горизонтальной границей солёных (с концентрацией маркирующего компонента C_1) и пресных (фоновая концентрация C_0) вод, решение соответствующей задачи имеет вид (II.7), где:

$$f(t, t_0) = (1 - \bar{h}) \left[1 - (t_0 / t)^a \right] \quad , \quad (II.11)$$

$$a = 3^{(\bar{h}-1)} \quad , \quad \bar{h} = h_0 / m \quad ,$$

$$t_0 = \pi n h^3 R(\bar{m}, \bar{l}) / (Q \chi_v^2) \quad - \quad (II.12)$$

время подтягивания контура минерализованных вод к водозаборному узлу; здесь h_0 - расстояние от кровли пласта до исходного горизонтального контакта пресных и минерализованных вод; $R(\bar{m}, \bar{l})$ - аналитическая функция (рис. II.5), учитывающая ограниченность пласта по мощности и размер интервала водоотбора; $\chi_v^2 = k_z/k$, коэффициент анизотропии; $\bar{m} = m / h_0$, $\bar{l} = l / h_0$ (m - мощность пласта, l - заглубление водозаборного узла).

Формула (II.7) справедлива и для условий откачки из пласта двухслойного строения, верхняя, наиболее проницаемая (с коэффициентом фильтрации k_0 и мощностью m_0), зона которого полностью вскрывается фильтрами скважин ($l = m_0$). При этом величина $f(t, t_0)$ заменяется на $f'(t, t_0) = k_1 f(t, t_0) / k_0$, а время t_0 подтягивания солёных вод с глубины $z = h_0 > (3-5)m$ определяется по формуле (II.12), где необходимо положить $R \sim 1/3(1 + k_1 / k_0)$.

Если различия в минерализациях C_0 и C_1 существенны, то в расчёт должна вводиться поправка на влияние плотностного градиента ($\Delta \bar{\rho} = (\rho_1 - \rho_0) / \rho_0$). В частности, при откачке из изотропного ($k_y = k_z = k$) пласта достаточно большой мощности ($h_0 \ll m$) изменение плотности по глубине учитывается в характерном времени процесса:

$$t_0 = \frac{h_0^3}{(3Q / 2\pi n) - (k h_0^2 \Delta \bar{\rho} / 2n)} \quad (II.13)$$

Откачка некондиционных вод, перетекающих через разделяющую толщу

В рассматриваемой системе источником солей служит водоносный пласт (с проводимостью T_2), отделённый от основного эксплуатируемого горизонта (с проводимостью T_1) слабопроницаемой толщей, имеющей мощность m_p и коэффициент фильтрации k_p . Решение миграционной задачи дается формулой:

$$\bar{C} \approx (1 + \bar{T})^{-1} \exp(-4 / v^2) (1 + 4 / v^2), \quad (II.14)$$

где безразмерные комплексы равны $v = \sqrt{Qt / \pi m_p n_1 B^2}$ ($B^2 = T_1 m_p / k_p$) - параметр перетекания, n - пористость основного горизонта) и $\bar{T} = T_1 / T_2$. В соответствии с этим решением, максимальная минерализация отбираемых вод определяется соотношением проводимостей взаимодействующих горизонтов $C_{\max} = C_1 + (C_2 - C_1) / (1 + \bar{T})$, где C_1 и C_2 - исходная минерализация воды в эксплуатируемом и питающем горизонтах, соответственно.

Общие подходы к прогнозу защитной роли зоны аэрации

Недоучет защитной роли зоны аэрации может приводить к качественно неверным (негативным) представлениям. Эта роль сводится к буферному, демпфирующему эффекту - при полной иммобилизации одних загрязнений или частичном перехвате и удлинении времени миграции других. Вместе с тем, грунты и влага в самой зоне аэрации могут в результате превращаться в источники длительного загрязнения нижележащих водоносных горизонтов, поступающих в них с последующими циклами естественного инфильтрационного питания или с техногенными водами.

Основные типовые ситуации гипотетических или проектируемых (т.е. еще не действующих) источников загрязнения выглядят следующим образом:

- 1) потенциальный источник загрязнения представляет собой длительно функционирующий бассейн промстоков;
- 2) загрязнения поступают с атмосферными осадками (в частности, при их просачивании через поверхностные или подземные хранилища твердых отходов) или с техногенными стоками, не образующими сколь-нибудь длительных скоплений (случайные разливы загрязнителей).

В первой ситуации перенос загрязнений идёт преимущественно в фильтрационном режиме (в условиях полного водонасыщения), а во вто-

рой - в режиме свободной субвертикальной инфильтрации (при неполном водонасыщении), имеющем серьезную специфику применительно к прогнозным построениям. Последние могут базироваться на двух возможных подходах

1) оценки по величине удельной инфильтрации (определяемой обычно решением обратных задач по данным наблюдений) и

2) расчет по вертикальной проницаемости пород зоны аэрации, в первую очередь - относительно водоупорных элементов разреза при полном их водонасыщении (которая может определяться как по данным наблюдений, так и опытными опробованиями)

Достоинства и недостатки этих подходов, во многом определяемые качеством исходной информации, обычно вынуждают рассматривать и использовать их как взаимодополняющие. Учитывая сложное, невыдержанное по площади строение зоны аэрации, первый подход представляется единственно реальным для региональных, крупномасштабных и долгосрочных оценок, в сугубо локальных же прогнозах обычно предпочтительнее второй подход, за исключением, разве что, тех редких случаев, когда локальные и дифференцированные по времени значения инфильтрационного питания получены прямыми наблюдениями (в частности, лизиметрическими) или длительными опробованиями

Литература

1. Алексеев В.С., Коммунар Г.М., Шержуков Б.С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах. - Итоги науки и техники. Гидрогеология и инженерная геология. М., 1989, - 144 с.
2. Боровский Б.В., Дробноход Н.И., Язвин Л.С. Оценка запасов подземных вод. Киев, Выща школа, 1989, - 407 с.
3. Боровский Б.В., Ершов Г.Е., Шубин С.Л. Специальные опытно-миграционные работы для моделирования техногенного загрязнения подземных вод в водоносных горизонтах большой мощности. В сб.: Доклады международного рабочего семинара по гидрогеологическому моделированию и экологической геологии 21-27.08.94. Ждарские Врхи. М., Геософт-Истлинк. 1994, с. 97-108.
4. Бочвер Ф.М., Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Защита подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1979, - 254 с.
5. Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород/Н.Н. Веригин, С.В. Васильев, В.С. Саркисян, Б.С. Шержуков. М., Недра, 1977, - 271 с.
6. Гольдберг В.М., Газда С. Гидрогеологические основы охраны подземных вод от загрязнения. М., Недра, 1984, - 262 с.
7. Коносавский П.К., Мироненко В.А., Румынин В.Г. Разработка и апробация моделей индикаторного опробования комплексов трещиноватых пород. - Геозкология, 1993, №3, с.104-124.
8. Крайнов С.Р., Швец В.М. Основы геохимии подземных вод. М., Недра, 1980, - 285 с.
9. Лапшин Н.Н., Орадовская А.Е. Рекомендации по гидрогеологическим расчётам зон санитарной охраны подземных источников хозяйственно-питьевого водоснабжения. М., изд. ВОДГЕО, 1983, - 102 с.
10. Методические рекомендации по применению флуоресцентных индикаторов при гидрогеологических работах. Сост. В.С. Гончаров, С.И. Латышев и др. М., ВСЕГИНГЕО, 1982.- 89 с.
11. Минкин Е.Л. Гидрогеологические расчёты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. М., Недра, 1967, - 124 с.
12. Мироненко В.А. О требованиях и подходах к реабилитации подземных вод на загрязнённых территориях. В сб.: Теория и методика полевых гидрогеологических исследований. Четвёр-

- тые Толстихинские чтения: научные материалы/Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1995, с.25-34.
13. МIRONENKO В.А., РУМИНИН В.Г. Опыт-но-миграционные работы в водоносных пластах. М., Недра, 1986, - 240 с.
 14. МIRONENKO В.А., МОЛЬСКИЙ Е.В., РУМИНИН В.Г. Изучение загрязнения подземных вод в горнодобывающих районах. Л., Недра, 1988, - 250 с.
 15. РОШАЛЬ А.А. Методы определения миграционных параметров. В кн.: Гидрогеология и инженерная геология. Обзор ВИЭМС. М., 1980, - 62 с.
 16. РОШАЛЬ А.А. Полевые методы определения миграционных параметров. В кн.: Гидрогеология и инженерная геология. Обзор ВИЭМС, М., 1981, - 61 с.
 17. Решение задач охраны подземных вод методами численного моделирования. - под общ. редакцией В.А. МIRONENKO. М., Недра, 1992, - 380 с.
 18. ТЮТЮНОВА Ф.И. Гидрогеохимия техногенеза. Наука, 1989, 380с.
 19. ШЕСТАКОВ В.М. Гидрогеодинамика. - 3-е изд. - М., изд-во МГУ, 1995 - 368 с.
 20. Ядерно-геофизические методы в гидрогеологии и инженерной геологии/ В.Т. ДУБИНЧУК, В.А. ПОЛЯКОВ, Н.Д. КОРНИЕНКО и др. - М.: Недра, 1988.-223 с.: ил.
 21. Aldous P.J., Smart P.L. Tracing Ground-Water Movement in Abandoned Coal Mined Aquifer Using Fluorescent Dyes/ Ground Water, 1988, v.26,pp. 172-178.
 22. Guven O., Molz F.J., Melville J.G. An analysis of Dispersion in a Stratified aquifer / Water Resources Research, v.21, №10, 1984, pp.1337-1354.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Краткая характеристика процессов миграции и основных миграционных параметров	4
1 1 Основные понятия и элементарные механизмы миграции	4
1 2 Основные модели и типовые расчетные схемы миграции	8
1 2 1 Структурные и литолого-генетическая дифференциация изучаемых объектов	8
1 2 2 Модели фильтрации для гомогенных пород	13
1 2 2 1 Квазиодномерные расчетные схемы	13
1 2 2 2 Пространственные расчетные схемы	16
1 2 2 3 Подходы к учету физико-химических процессов	17
1 2 2 4 Учет анизотропии пород	18
1 2 3 Макродисперсия в гетерогенных водоносных пластах	18
1 2 3 1 Комплексы пористых пород	19
1 2 3 2 Комплексы трещиновато-пористых пород	21
1 2 3 3 Учет физико-химических процессов	22
2 Загрязнение подземных вод на водозаборах и основные определяющие его факторы	23
2 1 Загрязнение подземных вод и его критерии	24
2 2 Типы загрязняющих растворов	25
2 3 Типы источников загрязнения подземных вод	28
2 4 Типизация водозаборов по условиям возможного загрязнения	29
3 Общая характеристика индикаторных опробований как вида гидрогеологических работ	34
3 1 Виды и задачи индикаторных опробований, их сочетание с другими видами работ	34
3 1 1 Задачи опытно-миграционных опробований (ОМО)	35
3 1 2 Задачи опытно-фильтрационных индикаторных опробований (ОФИО)	37
3 1 3 Сочетание индикаторных опробований с другими видами работ	38
3 2 Основные экспериментальные схемы и их информативность	41
3 2 1 Экспериментальные схемы ОМО	41
3 2 2 Экспериментальные схемы ОФИО	44
3 2 3 Режимы запуска индикаторов	49
3 2 4 О нетесобразных условиях постановки ОМО в свете влияния масштабных эффектов	50
4 Планирование и проведение индикаторных опробований	53
4 1 Рекомендации к планированию общей схемы миграционного эксперимента и опытного куста	53

работ	4.1.1. Необходимая информация и проведение соответствующих	54
	4.1.2. Предпосылки к выбору опытных участков	57
	4.1.3. Предпосылки к выбору индикатора	58
	4.1.4. Выбор вида фильтрационного возмущения при опробовании и	62
конструкции опытного куста	4.1.5. Предварительное обоснование пространственно-временного	66
масштаба опробования	4.1.6. Обоснование интервалов опробования и конструкции	70
скважин	4.2. Проведение индикаторных опробований	72
	4.2.1. Предварительное гидродинамическое опробование скважин	72
опытно-модернизационных кустов	4.2.2. Запуск трассера и наблюдения за его миграцией	74
	5. Расчетные модели для базовых экспериментальных схем	77
индикаторного опробования	5.1. Расчетные модели для ОМО в однородных породах	78
	5.1.1. Импульсные запуски индикатора в наблюдательные сква-	78
жины при откачках	5.1.2. Опыты в плоско-радиальном потоке формируемом	78
однородной наблюдательной скважиной	5.1.3. Опыты по дуговой (двухскважинной) схеме	80
	5.1.4. Однскважинный эксперимент	80
	5.2. Расчетные модели для ОМО в комплексах гетерогенных	81
пород	5.2.1. Импульсные запуски индикатора в наблюдательные сква-	81
жины при откачках	5.2.2. Опыты в плоско-радиальном потоке формируемом	83
однородной наблюдательной скважиной	5.2.3. Опыты по дуговой (двухскважинной) схеме	83
	5.2.4. Однскважинный эксперимент	84
	5.3. Расчетные модели для базовых экспериментальных схем	84
(ОФНО)	5.3.1. Оценка плановой фильтрационной анизотропии	84
	5.3.2. Опробования в субвертикальном потоке	85
	6. Основы интерпретации результатов индикаторных опробо-	86
ваний	6.1. Диагностика результатов ОМО и выбор расчетной модели	86
	6.1.1. Комплексы пористых пород	87
	6.1.2. Комплексы трещиноватых пород	88
	6.2. Методика количественной интерпретации и анализа резуль-	91
татов ОМО	6.2.1. Опыты в квазиоднородных средах	91
	6.2.2. Опыты в гетерогенных средах	95

6 2 2 1 Сухимно опробуемые стратифицированные и пасты пористых пород	95
6 2 2 2 Трещиновато-пористые породы	95
6 3 Интерпретация опытно-фильтрационных индикаторных опробований	99
6 3 1 Оценка профиля проницаемости во доносного пласта	99
6 3 2 Оценка плановой фильтрационной анизотропии	101
6 3 3 Изучение параметров субвертикальной миграции	102
6 4 Оценка влияния природных и технических факторов искажающих результаты индикаторных опробований	103
6 4 1 О возможном несоответствии структуры потока модельным представлениям	103
6 4 2 Гидрохимическая неоднородность пластовых скважин	104
6 5 О привлечении математических моделей к планированию и интерпретации ОМО	105
Приложение I Лабораторные индикаторные эксперименты как альтернатива опытным опробованиям	107
1 Общие положения и предпосылки к дифференциации экспериментальных схем	107
2 Определение параметров сорбции и ионного обмена	108
3 Изучение диффузионных параметров	111
Приложение II Основные положения гидрогеологических прогнозов качества подземных вод на водозаборах	113
Литература	126

АОЗТ «ГИДЭК»

Компьютерная верстка Паранская Н.В.

Подписано в печать 23.04.98г. Формат 60х84¹/₁₆

Печать офсетная. Тираж 500 экз.
