Библиотека СОК

В. М. ГОЛЬДБЕРГ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРАХ

В. М. ГОЛЬДБЕРГ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРАХ



МОСКВА «НЕДРА» 1976

Гольдберг В. М. Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах. М., «Недра», 1976, 153 с.

В книге излагаются вопросы гидрогеологических прогнозов качества подземных вод на водозаборах при разведке и оценке запасов пресных подземных вод в условиях подтягивания соленых вод к водозаборам. Рассматриваются гидрогеологические условия некоторых типов месторождений пресных подземных вод, контактирующих с солеными. Исследуется структура движения подземных вод к водозабору в различных гидрогеологических условиях. Приводятся и анализируются расчетные зависимости для прогноза времени движения соленых вод к водозабору. Рассматриваются условия смешения на водозаборе пресных и соленых вод и даются формулы для расчета изменения во времени минерализации воды на водозаборе. Обсуждаются вопросы методики гидрогеологических исследований месторождений пресных подземных вод, контактирующих с солеными. Оценивается достоверность прогнозов в зависимости от точности определения исходных параметров.

Книга рассчитана на широкий круг инженеров-гидрогеологов, занимающихся поисками и разведкой подземных вод для водоснабжения. Она может быть полезна при рассмотрении вопросов, связанных с охраной подземных вод от загрязнения, с подземным захоронением промстоков, и при решении других задач. Она может быть полезна также студентам-гидрогеологам при прохождении курсов «Динамика подземных вод» и «Поиски и разведка подземных вод».

Табл. 13, ил. 33, список лит. — 85 назв.

Г $\frac{20\,806-081}{043(01)-76}$ 54—75

© Издательство «Недра», 1976

ВАЛЕНТИН МИХАЙЛОВИЧ ГОЛЬДБЕРГ

Гидрогеологические прогнозы качества подземных вод на водозаборах

Редактор издательства *Г. Ф. Неманова*
Обложка художника *В. А. Длугий*
Технический редактор *О. Н. Ласточкина* Корректор *Т. М. Кушнер*

Сдано в набор 2/IX 1975 г. Подписано в печать 31/XII 1975 г. Т-22718
Формат 60 × 90¹/₁₆. Бумага № 2. Печ. л. 9,5. Уч.-изд. л. 8,41. Тираж 5000 экз.
Заказ № 508/5132-2. Цена 84 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19
Ленинградская типография № 6 Союзполиграфпрома при Государственном комитете Совета Министров СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
196006, Ленинград, Московский пр., 91

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных современных проблем является охрана окружающей среды от загрязнения. Особого внимания требуют вопросы борьбы с загрязнением вод (поверхностных и подземных).

Загрязнение подземных вод — это такие изменения качества воды (физических, химических и биологических свойств), которые делают ее частично или полностью не пригодной для использования. Критерием оценки степени загрязнения природных вод служат нормы предельно допустимых концентраций отдельных компонентов и общей минерализации воды.

Говоря о загрязнении подземных вод, следует иметь в виду прежде всего загрязнение пресных подземных вод, а также слабосоленых вод, минерализация которых не превышает 3—5 г/л. Пресные подземные воды — самый ценный и важный тип подземных вод — широко используются для хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Поэтому особого внимания требуют вопросы охраны подземных вод на водозаборах хозяйственно-питьевого назначения и прежде всего на крупных централизованных водозаборах.

Загрязнение подземных вод зависит от следующих факторов: наличия источников загрязнения, интенсивности отбора подземных вод, гидрогеологических условий водоносного горизонта. Наиболее подвержены загрязнению грунтовые воды и залегающие близко от поверхности горизонты напорных вод. Загрязнение подземных вод является следствием загрязнения среды в целом — поверхности земли (почвы), поверхностных вод, атмосферы. Загрязняющие компоненты с поверхности земли (почвы) вместе с атмосферными осадками инфильтруются в грунтовые воды. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод обусловливает загрязнение последних. Загрязнение атмосферы через пыль и атмосферные осадки передается поверхности земли и поверхностным водам, а оттуда — в подземные воды.

Основными загрязнителями подземных вод являются: а) промышленные отходы и прежде всего промышленные сточные воды; б) некондиционные природные воды; в) бытовые стоки и отходы; г) сельскохозяйственные удобрения и ядохимикаты.

Во многих случаях причиной загрязнения подземных вод, главным образом пресных подземных вод, являются природные некондиционные воды (поверхностные и подземные). Под некондиционными (по отношению к пресным подземным водам) понимаются воды повышенной минерализации и содержащие отдельные компоненты сверх допустимых норм для питьевых вод. К природным некондиционным водам относятся прежде всего естественные соленые воды (воды с повышенным содержанием хлоридов), воды с повышенным содержанием железа, сульфатов, фтора, воды повышенной жесткости и др.

Так, с морскими водами связано засоление пресных подземных вод в прибрежных районах. Наличие в пласте подземных вод повышенной минерализации может привести к подтягиванию последних к водозабору и ухудшению качества пресных подземных вод.

В настоящей работе вопрос о качестве воды на водозаборе рассматривается прежде всего в связи с природными некондиционными водами, которые в дальнейшем для краткости именуются солеными водами. Однако приводимые решения могут быть использованы и для прогноза качества воды в связи с загрязнением пресных подземных вод, хотя в этом случае могут возникнуть дополнительные вопросы, относящиеся к области физико-химической гидродинамики и требующие специального рассмотрения.

Ухудшение качества пресных подземных вод на водозаборе обусловлено подтягиванием к нему загрязненных (соленых) вод. Характер подтягивания соленых вод к водозабору зависит от граничных условий водоносного горизонта, наличия или отсутствия естественного движения подземных вод, фильтрационной неоднородности пород и типа водозабора (одиночный или сосредоточенный площадной водозабор, линейный ряд скважин).

При работе водозабора в условиях естественного движения подземных вод в результате сложения потока подземных вод к водозабору и естественного потока подземных вод формируется область питания водозабора. В этих условиях подтягивание соленых вод к водозабору возможно только в том случае, если они захватываются областью питания водозабора. Следовательно, для обоснованного прогноза возможности подтягивания соленых вод к водозабору необходимо знать особенности движения жидкости к водозабору в различных гидрогеологических условиях, т. е. структуру потока подземных вод к водозабору.

Одним из основных моментов прогноза качества воды на водозаборе является оценка времени подтягивания соленых вод к нему. В большинстве случаев достаточно ограничиться прогнозом поступления первых порций соленой воды по кратчайшему расстоянию от водозабора до границы соленых вод.

После поступления первых порций соленых вод начинает ухудшаться качество воды на водозаборе. В этих условиях необходим прогноз, как быстро будет изменяться качество воды во вре-

мени и когда оно достигнет допустимой нормы. Может оказаться, что в результате смешения на водозаборе пресных и соленых вод качество отбираемой воды, хотя и будет изменяться, однако в течение срока эксплуатации водозабора не превысит допустимой нормы для питьевых вод. В этом случае водозабор может работать с частичным подсасыванием соленых вод.

Следует отметить, что частичное использование слабо солоноватых вод в смешении с пресными водами при условии, что минерализация смеси не превысит допустимой нормы, позволяет увеличить эксплуатационные запасы подземных вод, что имеет существенное значение в районах, бедных пресными водами.

Значительные исследования, связанные с обоснованием охраны подземных вод от загрязнения, прогнозами миграции загрязнения в подземных водах и расчетами зон санитарной охраны водозаборов, выполнены Ф. М. Бочевером, В. Д. Бабушкиным, Н. Н. Веригиным, Е. Л. Минкиным, А. Е. Орадовской, В. М. Шестаковым, А. С. Белицким и др. Результаты этих исследований, а также данные других авторов (В. Н. Щелкачев, В. П. Пилатовский, И. А. Чарный, М. А. Гусейн-Заде и др.) использованы в настоящей работе.

Основная задача книги — изложение вопроса о прогнозе качества подземных вод на водозаборе в результате смешения пресных и соленых вод.

В работе не рассматриваются вопросы физико-химического взаимодействия загрязненных вод с «чистыми» подземными водами и породой и влияния этого взаимодействия на процесс миграции загрязнения в подземных водах.

ГЛАВА I

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ВЗАИМОСВЯЗИ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД С СОЛЕНЫМИ ВОДАМИ

Необходимость прогноза качества подземных вод на водозаборах возникает в тех случаях, когда в непосредственной близости от водозабора или на некотором удалении от него пресные подземные воды контактируют с некондиционными по составу водами, не отвечающими требованиям, предъявляемым к хозяйственно-питьевым водам. Под некондиционными водами (с точки зрения их хозяйственно-питьевого назначения) понимаются воды повышенной минерализации (в частности, с повышенным содержанием хлоридов — соленые воды), воды с повышенным содержанием фтора, сероводорода, железа, сульфатов и других компонентов, содержание которых превышает допустимые нормы для питьевых вод. К некондиционным относятся также воды, загрязненные промышленными и бытовыми отходами, сельскохозяйственными удобрениями, ядохимикатами и т. д.

При разведке и оценке запасов пресных подземных вод особенно часто встречаются случаи контактирования пресных подземных вод с солеными водами как подземными, так и поверхностными.

Наиболее характерны в этом отношении месторождения пресных подземных вод в прибрежных морских районах и линзы пресных вод в засушливых и пустынных областях. Взаимосвязь пресных и соленых вод устанавливается как в горизонтах грунтовых вод, так и в более глубоких напорных горизонтах. Например, в Степном Крыму пресные подземные воды понтических, сарматских и меотических отложений практически повсеместно контактируют с солеными водами: в одних случаях пресные воды сменяются по площади солеными водами, в других отмечается гидрохимическая зональность по разрезу (пресные воды полностью или частично залегают на соленых водах). Достаточно широкое развитие соленых вод в основных эксплуатационных водоносных горизонтах наблюдается в Прибалтике, Волго-Уральской области, Молдавии, Украине и других районах страны.

При разведке и оценке запасов пресных подземных вод, контактирующих с солеными водами, первостепенное значение имеет

изучение движения соленых вод к водозабору и изменение качества воды в нем.

Ниже кратко рассматриваются условия внедрения соленых вод в пресные подземные воды на примере месторождений пресных подземных вод морских побережий и линз пресных вод засушливых областей и дается схематизация природных условий для прогноза движения подземных вод к водозабору.

ПРЕСНЫЕ ВОДЫ МОРСКИХ ПОБЕРЕЖИЙ. ВНЕДРЕНИЕ МОРСКИХ ВОД

Специфической особенностью пресных подземных вод в районах морских побережий является непосредственная или косвенная взаимосвязь их с морскими водами. Это обусловливает проникновение морских вод в горизонты пресных подземных вод, подтягивание соленых вод к водозабору и ухудшение качества подземных вод.

Внедрение соленых морских вод в пресные подземные воды — актуальная проблема, имеющая первостепенное значение для многих стран, например США, Голландии, Италии, Японии и др. В США изучение вторжения морских вод является одной из основных гидрогеологических задач.

Общие сведения о внедрении морских вод в пресные подземные воды

Большой опыт изучения этого явления имеется в США, где многие крупные города расположены на побережьях Тихого и Атлантического океанов. Вторжение морских вод в горизонты пресных подземных вод отмечается в штатах Нью-Йорк, Нью-Джерси, Делавэр, Мэриленд, Луизиана, Джорджия, Флорида, Калифорния, Орегон, Коннектикут, Техас, Род-Айленд и др.

В работах А. Джонсона, И. Апсона, И. Гофмана, Д. Джерати, Г. Кранделла, Н. Лужецинского, В. Шварценского, Д. Избистера, Н. Перлмуттера и др. [33] отмечаются большие трудности в водоснабжении на о-ве Лонг-Айленд (штат Нью-Йорк), в юго-восточной части которого расположены два района г. Нью-Йорка — Бруклин и Куинс, вследствие вторжения морских вод в водоносные горизонты в процессе эксплуатации последних. До 1917 г. пресную воду на Лонг-Айленде получали из неглубоких колодцев и поверхностных водоемов. По мере роста потребности в воде сооружались глубокие колодцы и скважины, оборудованные мощными турбинными насосами. Интенсивная откачка привела к подтягиванию морских вод и засолению основных водоносных горизонтов — четвертичного и мелового. Было установлено, что в четвертичный водоносный горизонт морские воды проникают непосредственно по пласту, так как в небольшом удалении от берега этот горизонт выклинивается. Что же касается

мелового водоносного горизонта, то морские воды попадают в него главным образом путем фильтрации через перекрывающие этот горизонт глины формации Реритан. Эти глины недостаточно выдержаны по площади и содержат песчаные линзы. Установлено, что по мере продвижения в глины минерализация соленых вод уменьшается.

С целью контроля за эксплуатацией подземных вод Лонг-Айленда начали проводить специальные режимные наблюдения. Во избежание дальнейшего продвижения фронта соленых вод были устроены так называемые «диффузионные колодцы», в которые подается пресная вода, образующая барьер на пути движения соленых вод. Отмечается, что по мере дальнейшего увеличения потребности в воде необходимо определить эксплуатационные запасы подземных вод, которые можно отобрать без подсасывания соленых вод или с некоторой частью соленых вод, но при условии незначительного изменения солености откачиваемой воды.

В работе И. Апсона [33] прослеживается проникновение океанических вод в глубь материка в верхнемеловые, эоценовые, олигоценовые, миоценовые, плиоценовые и плейстоценовые водоносные породы в пределах штатов Мэриленд, Делавэр, Нью-Джерси и Нью-Йорк. На рис. 1 приведен разрез, взятый из этой работы, на котором указаны «языки» соленых вод, внедрившихся в пресноводный горизонт. Проникновение морской воды в эксплуатируемые водоносные пласты представляет серьезную проблему и в других местах побережья США.

Соленые воды внедрились на восточном и западном берегах Флориды. Э. Рейдер, И. Пирс и Д. Паркер отмечают, что в районе Майами (Юго-Восточная Флорида) опасность вторжения соленых морских вод возникла еще в 20-х годах. Основным источником водоснабжения здесь является горизонт грунтовых вод, представленный высоко проницаемыми разнозернистыми песками. Разгружаются грунтовые воды в прибрежной области.

На рис. 2 показано прогрессирующее внедрение морских вод за период с 1904 по 1952 г. Продвижение соленой воды было настолько интенсивным, что уже в 1925 г. водозаборные сооружения г. Майами пришли в полную негодность вследствие высокой минерализации воды. В районе Большого Майами до 1942 г. скорость продвижения границы соленых вод в глубь суши составляла около 70 м в год, а в 1942—1944 гг.(засушливые годы) — в среднем 270 м в год. К этому времени фронт соленых вод распространился на 18—20 км в глубь территории от устья канала Майами.

Гидрогеологические исследования показали, что наиболее интенсивно морские воды внедряются в глубь территории по руслам рек и каналов, а затем инфильтруются в грунтовые воды.

В последующие годы была осуществлена широкая программа мероприятий по защите пресных подземных вод путем строительства плотин и дамб. В результате принятых мер засоление грунтовых

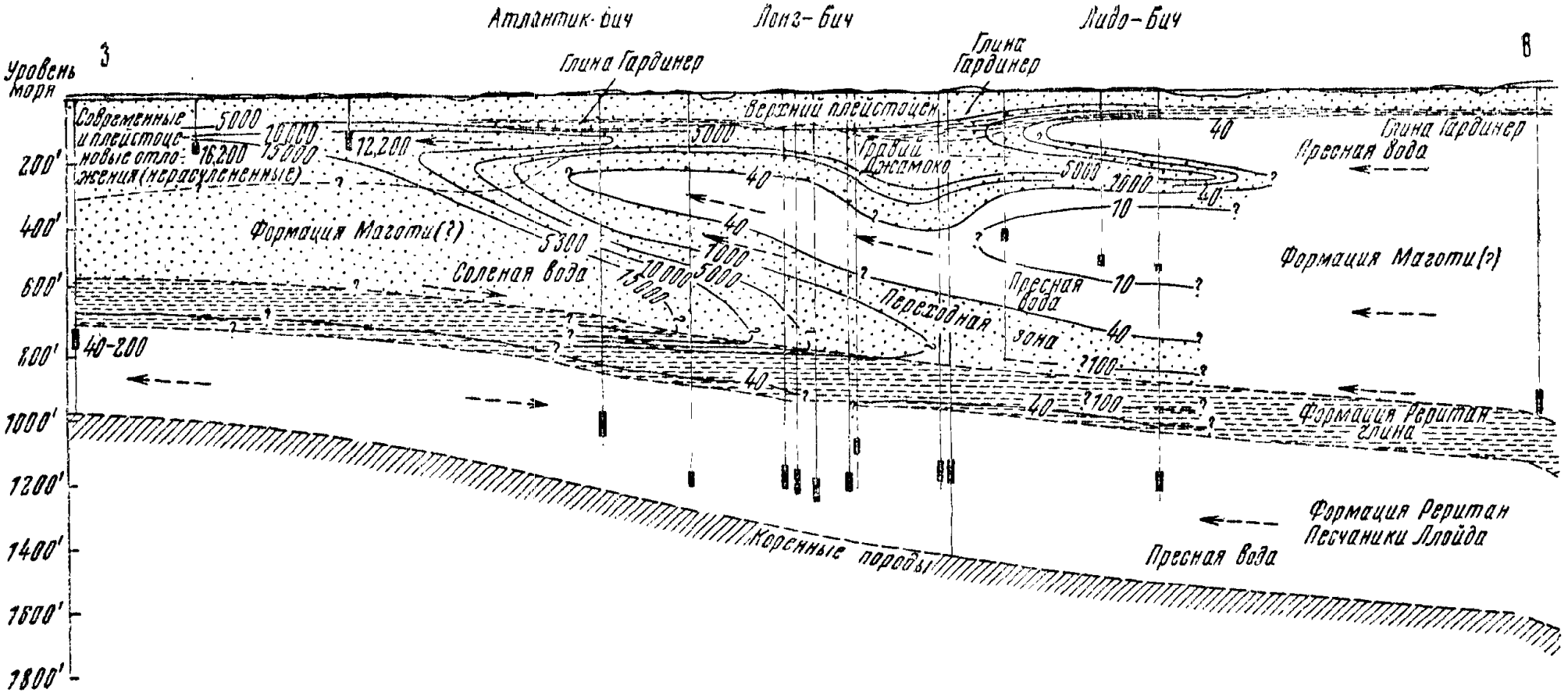


Рис. 1. Вторжение морских вод в пресные подземные воды четвертично-мелового комплекса на побережье Атлантического океана в штате Нью-Джерси, США (по И. Апсону).

Точками показана внедрившаяся морская вода

вод не только не распространяется дальше, но даже началось медленное отжатие соленых вод пресными в сторону моря.

Подток соленых вод является основной проблемой при организации водоснабжения на морском побережье между Оушен-Сити (штат Мэриленд) и Рехобот-Бич (штат Делавэр) на северо-востоке США. Здесь соленые океанические воды также проникают в глубь территории по руслам рек и каналов, а затем инфильтруются в грунт. Эксплуатируемые водоносные горизонты приурочены к отложениям плейстоцена и миоцена. Последние перекрыты слоем глин. Однако этот водоупорный слой не выдержан по площади, в нем имеются «окна», через которые морская вода проникает

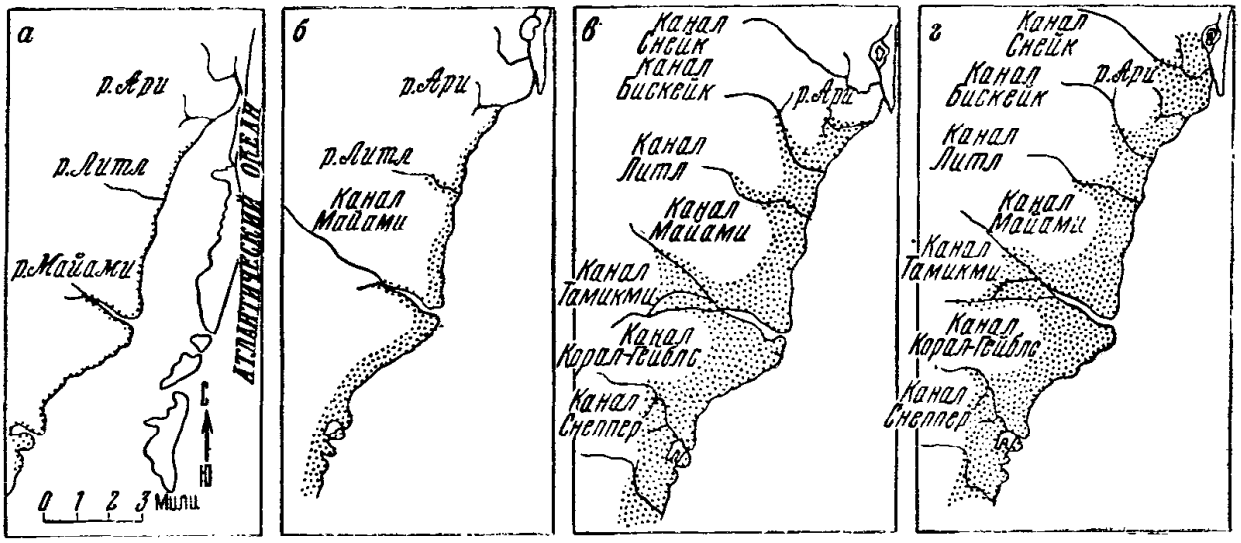


Рис. 2. Прогрессирующее вторжение морских вод на юго-восточном побережье Флориды (США) за 1904—1952 гг. (по Рейдеру).
Точками показана внедрившаяся морская вода

в горизонт подземных вод. В плейстоценовый водоносный горизонт в районе Рехобот-Бич соленые воды могут поступать непосредственно из океана, поскольку на этом участке имеется прямая гидравлическая связь подземных вод плейстоцена с океаническими водами.

Опасность внедрения соленых морских вод существует в районе Провиденс, штат Род-Айленд. Водоснабжение этого района полностью базируется на подземных водах. Наиболее водообильным является песчано-галечниковый горизонт грунтовых вод, непосредственно связанный с морскими водами. В штате Орегон внедрение морских вод в пресные грунтовые воды песчаных дюн отмечается около Флорены и к северу от залива Кус-Бей. Борьба с внедрением соленых вод — давняя проблема в штате Калифорния, что отмечается П. Бауманном, М. Банксом, В. Рихтером, Д. Хардером, Д. Поландом, А. Гариетом, А. Синотом, А. Каррено и др. Во многих прибрежных районах Калифорнии (Лос-Анджелес, Торранс-Санта-Моника, Санта-Доминго и др.) вследствие интенсивной эксплуатации подземных вод и понижения их уровня морские воды внедрились в осадочные отложения полуострова.

До 1900 г. грунтовые воды в Калифорнии не использовались. Последующий непрерывный рост отбора воды в сочетании с влиянием долголетней сухой погоды в 30-х годах обусловили в прибрежных районах значительное падение уровня грунтовых вод ниже уровня моря и внедрение морских вод в грунтовые воды. Подземные воды имеют непосредственный контакт с морем, первоначальный уклон поверхности пресных вод до начала эксплуатации был направлен в сторону моря. К 1955 г. внедрение соленых вод наблюдалось в 20 участках, примыкающих к прибрежной полосе. В районе Бюмент — Порт-Артур проникновение морских вод приняло такие размеры, что отбор подземных вод сократился в 20 раз.

Для предотвращения дальнейшего продвижения океанических вод в глубь территории рекомендуются уменьшение водоотбора подземных вод, повышение их уровня посредством налива пресной воды в специальные колодцы, устройство искусственного подземного барьера путем закачки пресных вод и другие защитные мероприятия. Искусственный «пресноводный» барьер создан в районе Лос-Анджелеса и представляет собой линейный ряд скважин, пробуренных на расстоянии 150—200 м друг от друга и общей длиной около 17 км (по А. Браингтону и П. Бауманну).

По данным Д. Поланда, А. Гариета и А. Синота, интенсивное замещение пресных вод солеными отмечается и в других местах штата Калифорния, например в районе Торранс-Санта-Моника. По состоянию на 1959 г. уровень пресных подземных вод здесь на 21 м ниже уровня океана. Ежегодный отбор подземных вод с 1904 по 1948 г. увеличился с 12,3 до 96,2 млн. м³. Питание подземных вод осуществляется за счет инфильтрации атмосферных осадков, поливных вод из ирригационных каналов и речных вод из рек Лос-Анджелес, Баллона и ее притоков. В эксплуатируемые водоносные горизонты ежегодно поступает 40—50 млн. м³ воды. Таким образом, восполнение ресурсов подземных вод является неполным. Для предотвращения проникновения морских вод в глубь побережья намечается создание «пресноводного барьера». Исследованиями установлено также наличие проседания поверхности земли (до 1,5 м), которое происходит вследствие значительного снижения напоров в водоносном горизонте.

Многочисленные примеры проникновения морских вод в прибрежных районах США приводятся в работе Д. Тодда, посвященной проблеме засоления пресных подземных вод [33]. Внедрение морских вод отмечается и в других странах.

Подтягивание соленых вод имеет место в ряде районов Мексики. В долине Мексикали (дельта р. Колорадо) для водоснабжения и орошения интенсивно используются грунтовые воды. В 1957 г. извлекали около 760 млн. м³ в год подземных вод, а в 1963 г. их потребление возросло до 1240 млн. м³ в год. Такое увеличение отбора грунтовых вод привело к снижению их уровня и

подсасыванию соленых вод со стороны моря, в результате чего часть скважин вышла из строя.

В Канаде внедрение соленых морских вод отмечается в прибрежных провинциях Новая Шотландия, Нью-Брансуик и на о-ве Принца Эдуарда. Установлено, что уровень подземных вод колеблется синхронно морским приливам.

Вопрос о подтягивании морских вод является весьма актуальным и для ряда стран Европы.

Одни из первых наблюдений за вторжением морских вод относятся к водозаборам Лондона и Ливерпуля (по Братвайту, 1855 г.).

В работах С. Боу, Ф. Хавелла и др. исследуется внедрение морских вод в отложениях пермо-триаса в Южном Ланкашире (Англия). Основной водоносный горизонт в этом районе приурочен к песчаникам пермо-триаса и эксплуатируется большим количеством скважин свыше 100 лет. Суммарный дебит скважин около 28 млн. м³ в год. За последние 30—40 лет наблюдается интенсивное региональное снижение уровня подземных вод; скорость понижения уровня за этот период составила в среднем 0,3 м в год. В некоторых местах уровень подземных вод снизился на 30 м ниже уровня моря, в результате чего все возрастает внедрение морских вод в пермо-триасовый горизонт.

Внедрение морских вод в пресные подземные воды издавна имеет место в Голландии. Как отмечают У. Ван-Дат, Н. Ридер и Д. Ван-Левен, стационарные гидрогеологические наблюдения за внедрением морских вод в пресноводные горизонты уже давно ведутся в Голландии, в связи с чем заложена большая сеть режимных наблюдательных скважин.

На засолении подземных вод прибрежных районов Северо-Германской равнины за счет вторжения морских вод указывают Крамес, Рихтер, Вагнер, Флате, Дитмер и др.

Подтягивание морских вод к водозаборным сооружениям отмечается в ряде районов Италии, в частности в береговой зоне Апулии. Об этом говорится в работах В. Котехья, Д. Жоржи, С. Ретне. Водовмещающие породы артезианского бассейна представлены песчано-гравийной толщей, в которой содержатся четыре водоносных горизонта. Эти горизонты с небольшим уклоном моноклинально погружаются в сторону Адриатического моря, где происходит разгрузка подземных вод. Установлено, что в 4 км от берега проходит граница соленых морских вод, вторгшихся в водоносные горизонты. Особенно далеко морские воды проникают по подошве пласта. Поэтому на значительной площади в прибрежной полосе пресные воды залегают на соленых. Эксплуатация подземных вод существенно ограничивается опасностью дальнейшего засоления водоносного горизонта. Вторжение морских вод в пресные подземные воды происходит во многих странах Азии и Африки. Внедрение морских вод представляет серьезную проблему для многих районов Японии: засоление пресных под-

земных вод наблюдается в префектурах Таяма, Кашегава, Фудзи и в других прибрежных районах.

На всей прибрежной полосе Марокко отмечается интенсивное внедрение морских вод в горизонты подземных вод. По В. Харану, засоление пресных подземных вод имеет место в естественных условиях и особенно усиливается при эксплуатации. Проникновение морских вод в глубь территории наблюдается в районах Валидия-Эль-Джадила, Рабат, Гарба, Бу-Арега и др.

Проникновение морских вод в пресные подземные воды особенно проявляется на островах, как, например, Ангаур (Океания), Оаху (Гавайские острова), Канарские, Антильские и др.

Засоление пресных подземных вод вследствие подсоса морских вод имеет место и в прибрежных районах Советского Союза. Наиболее полные сведения имеются по районам Прибалтики. Так, произошло частичное засоление водозабора морскими водами в г. Лиепая. Изучаются условия нагона морских вод в канал Куршю-Маре (район г. Клайпеды) с точки зрения опасности засоления водозабора грунтовых вод вблизи этого канала. Аналогичные вопросы возникали при разведке пресных подземных вод в долине р. Сучан в связи с возможным проникновением морских вод в русло реки и засолением грунтовых вод.

Опасность движения морских вод по пласту, нагона в реки и каналы и вследствие этого загрязнения подземных вод существует в ряде районов Калининградской области, в отдельных пунктах Сахалина и Охотского побережья.

Некоторые особенности внедрения морских вод в пресные подземные воды

Из обзора литературы видно, что проблема внедрения морских вод в пресные подземные воды побережий носит региональный характер.

Засоление пресных подземных вод в прибрежных морских районах обусловлено вторжением морских вод. Продвижение морских вод в глубь территории происходит не только в условиях нарушенного гидродинамического режима (при эксплуатации подземных вод), но и в естественных условиях вследствие различия плотностей пресных и соленых вод, приливных и штормовых явлений, тектонических процессов (опускания морского побережья). В условиях изменения естественной гидродинамической обстановки морские воды внедряются особенно интенсивно в результате эксплуатации подземных вод в районах морских побережий.

Наряду с водоотбором проникновению морских вод способствуют вскрышные работы, эксплуатация месторождений твердых полезных ископаемых, осушение, шахтный водоотлив и другие виды работ, приводящие к нарушению гидродинамического равновесия системы водоносные горизонты — море.

Основными путями внедрения морских вод являются проникновение непосредственно в горизонт подземных вод, инфильтрация из рек и каналов, перетекание через слабо проницаемые отложения, литологические «окна», проникновение по трещинам и разломам.

Морские воды вторгаются прежде всего в грунтовые воды и первые от поверхности напорные водоносные горизонты. Глубокозалегающие водоносные горизонты, как правило, не подвергаются внедрению морских вод.

Проникновению морских вод благоприятствуют: наличие рек и каналов, сообщающихся с морем и являющихся одним из основных путей внедрения морских вод в глубь суши; изрезанность береговой линии, наличие заливов, фиордов; непосредственная связь водоносного горизонта с морем; небольшой естественный расход пресных подземных вод, разгружающихся в море; фильтрационная неоднородность водоносного горизонта и его слоистость. Резкая неоднородность и трещиноватость водоносного горизонта наряду с каналами и реками способствуют проникновению морских вод далеко в глубь материка.

Нагон морских вод в реки и каналы происходит под влиянием ветров, штормов, приливов. Дальность нагона морских вод зависит от расхода и уклона потока речных вод, ширины и глубины русла реки, продолжительности и интенсивности ветров и приливов. Нагон морских вод в реки и каналы — явление периодическое в течение года.

Скорость продвижения по пласту вторгшихся морских вод изменяется от нескольких до сотен метров в год, средние значения составляют 50—100 м в год. Продвижение соленых вод по пласту представляет собой циклический процесс, при котором относительно короткие промежутки быстрого продвижения фронта соленых вод чередуются с замедлением темпа перемещения, временной стабилизацией и даже частичным отступлением фронта соленых вод.

Скорость перемещения контура соленых вод значительно возрастает в засушливые маловодные периоды. Внедрение морских вод в осадочные отложения происходит по всей береговой линии с образованием «языков» на участках развития высоко проницаемых пород. Особенно хорошими проводниками соленых вод, как уже отмечалось, являются реки и каналы, по которым морская вода заходит в глубь суши и затем инфильтруется в грунт. Интенсивность засоления подземных вод существенно зависит от характера их взаимосвязи с морскими водами. Здесь могут быть выделены два случая: 1) между подземными и морскими водами существует прямая гидравлическая связь, 2) гидравлическая связь между подземными и морскими водами имеется, но она затруднена.

Длина «языка» морских вод зависит от соотношения плотностей пресной и морской воды, мощности водоносного горизонта и уклона потока подземных вод. Длина «языка», сформировавше-

гося за 15—20 лет в ряде прибрежных районов США (Калифорния, Флорида), колеблется от 1—2 до 7—8 км.

Для предотвращения проникновения морских вод применяются различные мероприятия, основные из которых следующие: 1) создание на пути соленых вод «пресноводного или воздушного барьера» путем закачки в пласт пресной воды или воздуха; 2) рассредоточение водозаборов на большей площади; 3) периодическое уменьшение производительности водозабора, наиболее подверженного засолению; 4) искусственное восполнение запасов пресных вод эксплуатируемого горизонта; 5) строительство плотин, дамб.

ЛИНЗЫ ПРЕСНЫХ ВОД ЗАСУШЛИВЫХ И ПУСТЫННЫХ ОБЛАСТЕЙ

Краткая характеристика условий формирования линз пресных вод

Под линзами пресных вод обычно понимают локальные участки пресных подземных вод, заключенные среди минерализованных вод. К линзам пресных вод могут быть условно отнесены также «языки» и потоки пресных подземных вод, вторгающиеся в соленые воды. В природе встречаются различные типы линз пресных вод. Географическое распространение линз также самое различное. Наряду с линзами пустынных и засушливых областей аридной зоны имеются линзы на морских побережьях и островах; известны линзы пресных вод в районах развития многолетнемерзлых пород.

Разнообразие типов линз обусловлено особенностями их питания и геолого-гидрогеологическими условиями районов их развития. Питание линз может осуществляться за счет инфильтрации атмосферных осадков в понижениях рельефа и через проницаемые «окна»; за счет фильтрации пресных поверхностных вод из рек, каналов и водоемов; за счет конденсации водяных паров, подтока пресных вод из глубоких водоносных горизонтов и др. Линзы могут образовываться также вследствие физико-химического разделения пресных и соленых вод в условиях низких температур.

Линзы отличаются друг от друга по размерам в плане и разрезе. Наряду с мелкими линзами площадью не более 1 км^2 (мощность пресных вод 3—6 м) известны крупные линзы, занимающие сотни и тысячи квадратных километров (мощность пресных вод — десятки метров).

В природных условиях восполнение запасов пресных вод линз может осуществляться одновременно за счет нескольких источников питания. Но в большинстве случаев возможно выделить

основной источник питания. По характеру основного питания линзы пресных вод можно подразделить на следующие типы:

1) формирующиеся за счет инфильтрации атмосферных осадков (подтакырные, подлиманные, линзы под логами, оврагами, падинами и т. д.);

2) формирующиеся в результате фильтрации пресных вод из поверхностных водотоков и водоемов (подрусловые, прикануальные и приречные, линзы вблизи водохранилищ, озер);

3) формирующиеся в районе предгорных равнин за счет подземного стока пресных вод, внедряющихся в минерализованные грунтовые воды равнин, а также за счет инфильтрации поверхностного стока пресных вод;

4) формирующиеся за счет конденсации атмосферной влаги;

5) формирующиеся вследствие разгрузки по тектоническим разломам и трещинам пресных подземных вод в горизонты с минерализованными водами;

6) созданные искусственно;

7) реликтовых пресных вод;

8) крупные подпесчаные линзы (по терминологии В. Н. Кунина). Сюда относятся линзы типа Ясханской. Полной ясности относительно их происхождения пока нет.

Линзы пресных вод, перечисленные в пунктах 1—6, можно выделить в одну большую группу. Для них типично то, что в их возникновении основную роль играет современное питание. Линзы, выделенные в пунктах 7 и 8, характеризуются тем, что современное питание способствует их сохранению.

Ниже приводится краткое описание некоторых типов линз, представляющих наибольший интерес для централизованного водоснабжения — подрусловых и крупных подпесчаных линз.

Подрусловые линзы

Рассмотрим этот тип линз на примере подрусловых линз в долине Амударьи.

В районе нижнего течения и дельты Амударьи, расположенных преимущественно в пределах Каракалпакской АССР, для питьевого водоснабжения широко используются подрусловые линзы, развитые вдоль поверхностных водотоков. Эти линзы образуются в результате фильтрации пресных поверхностных вод из рек и каналов в соленые грунтовые воды.

Грунтовые воды приурочены к неогеновым и четвертичным отложениям и рассматриваются как единый водоносный горизонт. Водовмещающие отложения представлены преимущественно песками, в нижней части разреза глинистыми. Фильтрационные потери из Амударьи и оросительной системы играют основную роль в формировании грунтовых вод. Меньшее значение в их питании принадлежит атмосферным осадкам. Потери подземных вод происходят главным образом за счет испарения и транспирации растениями.

Грунтовые воды имеют уклон 0,001—0,003. С удалением от реки увеличивается глубина зеркала подземных вод. Так, в непосредственной близости от реки уровень воды располагается на глубине 0,5—1,5 км, в 5 км — на глубине 3—5 м, в 10—15 км — на глубине до 10 м и более.

В зоне влияния Амударьи минерализация грунтовых вод колеблется от 0,3 до 0,8 г/л; на расстоянии 5—6 км она возрастает до 3—6 г/л. Пресные и слабо солоноватые воды приурочены к рекам и каналам. На значительном удалении от реки минерализация грунтовых вод достигает 30—50 г/л. Минерализация грунтовых вод увеличивается также с глубиной.

Подрусловые линзы образуются вследствие донной и береговой фильтрации пресных поверхностных вод, происходящей при пересечении каналом или рекой пород с хорошими фильтрационными свойствами. Если песчаные отложения имеют значительную протяженность по течению реки и характеризуются более или менее выдержанными фильтрационными свойствами, то параллельно руслу и примыкая к нему образуется полоса пресных грунтовых вод. Пополнение их запасов связано с фильтрационными потерями из реки (канала); расход осуществляется вследствие испарения, диффузии и механического смешения пресных вод с солеными. На определенном расстоянии от канала, где уравновешиваются приходные и расходные статьи баланса пресных грунтовых вод, формируется граница линзы.

Питание подрусловых линз может быть постоянным или периодическим. Время, в течение которого отсутствует питание, редко превышает 2—3 мес. Вследствие резкого уменьшения расхода вод в зимний период каналы (или реки) могут дренировать грунтовые воды. В этот период (отсутствие питания) размеры линзы несколько сокращаются в результате вытеснения в сторону канала пресных вод солеными. С возобновлением питания граница пресных и соленых вод оттесняется в противоположную сторону. Таким образом, реагируя на изменение величины питания, линза как бы «дышит».

Между пресными и солеными водами существует переходная зона. Размеры ее в разрезе исчисляются несколькими метрами, в плане могут достигать нескольких сотен метров и даже километров (для крупных линз).

Размеры линзы в плане зависят от величины питания, мощности и фильтрационных свойств водовмещающих пород, величины испарения, соотношения минерализаций пресных и соленых вод. Обычно ширина полосы пресных вод составляет 0,5—2 км. Мощность пресных вод в крупных линзах достигает 30—40 м, в среднем 10—20 м.

Крупные подпесчаные линзы Центральных Каракумов

В Туркмении разведаны (Н. Г. Шевченко, К. Н. Иомудский, В. Н. Кунин и др.) крупные линзы пресных вод, приуроченные к песчаным образованиям. В. Н. Кунин предложил называть

такие линзы подпесчаными. Среди них можно назвать Ясханскую линзу, Восточно-Заунгузскую и др. Они содержат огромные статические запасы пресных вод. Динамические запасы невелики по сравнению со статическими. Происхождение крупных подпесчаных линз пока неясно. Не исключено, что крупные линзы являются реликтовыми образованиями.

Рассмотрим наиболее хорошо изученную Ясханскую линзу, занимающую почти всю центральную часть Приузбойских Каракумов. Грунтовые воды, в систему которых входит линза, приурочены к древним аллювиальным отложениям четвертичного возраста и представляют каракумский грунтовый поток.

По Н. Г. Шевченко, Ясханская линза имеет в плане форму эллипса, большая ось которого располагается в широтном направлении. Длина линзы 65—70 м, максимальная ширина 30 км, площадь в пределах контура с минерализацией до 1 г/л около 2000 км^2. Средняя минерализация воды внутри контура линзы 0,3—0,5 г/л. Мощность пресных вод в центральной части линзы — десятки метров, наибольшая вскрытая мощность 70—80 м, к периферии она уменьшается.

Глубина залегания грунтовых вод в районе линзы 10—40 м. Установлено, что на большей части площади линзы пресные воды залегают на соленых водах, на отдельных участках они подстилаются апшеронскими глинами.

Ясханская линза со всех сторон окружена солеными водами, минерализация которых в удалении от линзы достигает 60 г/л. Между пресными водами линзы и солеными водами каракумского потока имеется переходная зона. В вертикальном разрезе мощность переходной зоны изменяется от 5 до 10 м. Размеры переходной зоны в плане исчисляются километрами. Так, у восточных границ ширина переходной зоны, где минерализация колеблется от 1 до 30 г/л, составляет в среднем 3 км. По северной границе размеры переходной зоны достигают 6—8 км.

Статические запасы пресных подземных вод на крупных подпесчаных линзах весьма значительны и представляют интерес для крупного централизованного водоснабжения.

ОБОСНОВАНИЕ РАСЧЕТНЫХ СХЕМ ДЛЯ ПРОГНОЗА ПОДТЯГИВАНИЯ СОЛЕНЫХ ВОД К ВОДОЗАБОРУ

Пресные подземные воды морских побережий

Вопросы схематизации природных условий месторождений пресных подземных вод морских побережий рассматривались в работах [6, 33, 47]. В большинстве случаев можно выделить две расчетные схемы: а) полуограниченный поток с линейной границей постоянного напора (береговая линия), которая является контуром разгрузки подземных вод; б) неограниченный поток подземных вод.

Первая схема имеет место, когда водозабор расположен в сравнительной близости от береговой линии. Следует отметить, что отождествление береговой линии с областью разгрузки является условным, так как во многих случаях водоносный горизонт выходит в море не в непосредственной близости от берега, а далеко от него. Вторая схема реализуется, когда водозабор расположен на значительном удалении от моря (на расстоянии 5—10 км). Если естественный расход подземных вод незначителен, обе схемы приближаются соответственно к полуограниченному бассейну с контуром постоянного напора и неограниченному бассейну.

Условия разгрузки пресных подземных вод в море отличаются рядом особенностей. В случае грунтовых вод связь подземных вод с морем бывает: а) прямой или б) затрудненной за счет наличия пропластков слабо проницаемых пород. Для напорных вод можно выделить три наиболее вероятные схемы:

а) подземные воды разгружаются в месте выхода пласта в море, при этом пласт сверху и снизу достаточно хорошо изолирован;

б) водоносный пласт непосредственно не выходит в море, и разгрузка подземных вод осуществляется путем фильтрации через слабо проницаемые породы в кровле пласта. Если мощность перекрывающих слабо проницаемых пород незначительна или если эти породы литологически невыдержанны (имеются хорошо проницаемые «окна») либо разбиты трещинами, то первая и вторая схемы сближаются;

в) подземные воды разгружаются в области выхода пласта в море и через слабо проницаемые породы в кровле. В зависимости от соотношения расходов подземных вод на перетекание и в области выхода пласта в море может быть приближенно принята первая или вторая схема.

Следует отметить, что приведенные схемы взаимосвязи подземных вод с морскими являются в некоторой степени абстрагированными, поскольку условия разгрузки подземных вод в море в большинстве случаев могут быть освещены лишь в общем виде (область бурения скважин обычно ограничивается берегом моря).

Анализ взаимосвязи пресных подземных вод с морскими водами позволил наметить типизацию месторождений пресных подземных вод в прибрежных районах по условиям подтягивания морских вод к водозаборам (табл. 1).

Первая графа табл. 1 отражает пути поступления морских вод в водоносный горизонт, а вторая — типы граничных условий водоносного горизонта по условиям подтягивания соленых вод. Неограниченный и полуограниченный пласты выделяются в зависимости от удаления водозабора от места выхода водоносного горизонта в море. Схема замкнутого пласта с $H = \text{const}$ характерна для горизонтов пресных вод на морских и океанических островах.

Третья графа таблицы отражает характер подтока морских вод к водозабору во времени. В неограниченном по площади

пласте подток соленых вод хотя и возрастает в начальный период, но в целом является ограниченным; в полуограниченном по площади пласте с H = const приток морских вод большей частью является возрастающим во времени, хотя в отдельных случаях может быть и ограниченным.

Таблица 1

Типизация месторождений пресных подземных вод в прибрежных районах по условиям подтягивания морских вод

Пути поступления морских вод в водоносный горизонт	Типы граничных условий	Характер подтока морских вод к водозабору
Непосредственное внедрение в водоносный горизонт	Неограниченный пласт Полуограниченный пласт с H = const Замкнутый пласт с H = const	Ограниченный Возрастающий
Перетекание	В верхнем горизонте H = const или H = var	Возрастающий Ограниченный
Инфильтрация нагонных морских вод из рек и каналов	Подпертый режим фильтрации Свободный режим фильтрации	Периодический

В условиях перетекания величина подтока морских вод будет ограниченной или возрастающей в зависимости от гидродинамических условий в верхнем горизонте и соотношения водопроводимостей верхнего и нижнего горизонтов. Если верхний горизонт непосредственно связан с морем, то в нем обычно принимается H = const.

И наконец, при инфильтрации нагонных морских вод из рек и каналов приток соленых вод к водозабору будет периодическим, поскольку само явление нагона периодическое.

Линзы пресных вод

Основой схематизации линз для оценки их эксплуатационных запасов являются условия их питания. По этому признаку большинство линз может быть разделено на две группы. К первой группе относятся линзы, сформировавшиеся за счет современного питания. Вторая группа включает линзы, в образовании которых роль современного питания сравнительно невелика.

В первой группе можно выделить две подгруппы, различающиеся по условиям питания. Для линз первой подгруппы типично питание за счет инфильтрации атмосферных осадков, которое

в основном осуществляется на небольшой площади и носит сосредоточенный характер (линзы инфильтрационного питания). Примером могут служить подтакырные, подлиманные, островные, дюнные линзы.

Линзы пресных вод второй подгруппы отличаются наличием линейного контура питания (подрусловые линзы — приканальные, приречные).

Линзы первой подгруппы характеризуются в основном периодическим питанием. Линзы второй подгруппы могут иметь как периодическое, так и постоянное питание (на крупных реках и каналах). Период питания большинства линз первой подгруппы крайне незначителен (несколько суток или, в лучшем случае, десятки суток). Все остальное время линза не получает питания. Величина питания отражается на размерах линзы. С учетом этих обстоятельств запасы пресных вод линзы первой подгруппы можно рассматривать как статические и прогноз движения контура линзы при ее эксплуатации производить с учетом сработок статических запасов.

Ко второй группе линз могут быть отнесены крупные линзы пресных вод (типа Ясханской), современное питание которых невелико по сравнению с их статическими запасами. Эксплуатационные запасы линз первой группы определяются преимущественно их динамическими запасами, а второй группы — статическими.

В большинстве случаев гидрогеологические условия линз пресных вод можно представить в виде двух основных расчетных схем: линзы пресных вод в неограниченном пласте и линзы пресных вод в полуограниченном пласте с линейным контуром питания в условиях однородных и неоднородных по фильтрационным свойствам водоносных пород.

Несмотря на значительное разнообразие разрезов водовмещающих пород, в основном они могут быть сведены к двум схемам: однослойный и двухслойный пласт (залегающие внизу соленые воды обычно приурочены к менее проницаемым породам по сравнению с породами в зоне пресных вод). В плане соленые воды обычно приурочены к менее проницаемым породам, чем породы в зоне пресных вод. В плане пресные воды линз могут быть ограничены солеными водами со всех сторон (например, подтакырные, подлиманные, подпесчаные линзы) или преимущественно с одной стороны (подрусловые линзы).

По гидрохимическим условиям разреза могут выделяться: 1) линза, залегающая полностью на соленых водах; 2) линза, залегающая частично на соленых водах и частично на водоупоре; 3) линза, залегающая в основном на водоупоре.

Среди других типов месторождений пресных подземных вод в сложных гидрохимических условиях значительный интерес представляют грунтовые воды аллювиальных отложений речных долин.

Система пресные — соленые воды

При фильтрации пресных и соленых вод имеем систему, состоящую в общем из двух разнородных жидкостей, различающихся по своим плотностям и вязкостям. Различие плотностей и вязкостей обусловлено разной минерализацией пресных и соленых вод. Плотность и особенно вязкость являются теми параметрами, которые определяют текучесть жидкости. Поэтому интересно, насколько плотность и вязкость пресной воды отличаются от соответствующих характеристик соленой воды при тех минерализациях соленой воды, которые обычно встречаются на практике.

С ростом минерализации плотность воды увеличивается практически прямолинейно, а зависимость между вязкостью и минерализацией более сложная. Так, в интервале минерализаций 20—80 г/л вязкость возрастает приблизительно по прямолинейной зависимости; при минерализациях свыше 80—100 г/л вязкость уже изменяется по параболическому закону. При изменениях минерализации от 20 до 100 г/л скорость роста вязкости и плотности приблизительно одинакова. Если при минерализации 1 г/л и температуре 20° С вязкость и плотность воды соответственно равны 1 спз и 1 г/см^3, то для минерализации 40 г/л — соответственно 1,04 спз и 1,02 г/см^3. Следовательно, вязкость увеличилась в 1,04 раза, а плотность — в 1,02 раза. Минерализация соленых грунтовых вод редко превышает 50 г/л. Обычно она составляет 5—15 г/л. Для этих значений минерализации плотность и вязкость соленой воды будут очень мало отличаться от плотности и вязкости пресной воды, в приближенных расчетах различием можно пренебречь. Следует отметить, что сама по себе незначительная разница в плотностях и вязкостях будет еще более сглаживаться наличием переходной зоны, в пределах которой плотность и вязкость постепенно изменяются от значений этих параметров для пресной воды до их значений для соленой воды.

Размеры переходной зоны в плане достигают сотен метров и даже километров.

Учет переходной зоны от пресных вод к соленым имеет немаловажное значение при прогнозе качества воды на водозаборе. В ней содержатся довольно большие запасы слабо солоноватых вод, пригодных в смеси с пресными водами для хозяйственно-питьевого использования.

Таким образом, небольшая разница в минерализации пресной и соленой воды в зоне их контакта, а также наличие обширной переходной зоны позволяют приближенно систему пресные — соленые воды в интервале минерализаций 5—10 г/л считать однородной с плотностью и вязкостью пресной воды для прогноза перемещения границы соленых вод.

Влияние минерализации на фильтрационные свойства пород

Пресные и соленые подземные воды представляют собой в общем систему неоднородных жидкостей. При вытеснении пресных вод солеными изменяются гидрохимические условия пласта, вследствие чего возможно изменение фильтрационных свойств водовмещающих пород. Особенно это относится к песчано-глинистым отложениям. Установлено [2, 35], что одна и та же песчано-глинистая порода может проявлять различные фильтрационные свойства по отношению к пресным и соленым водам.

Это влияние минерализации воды на проницаемость пород обусловлено разной степенью набухания глинистого вещества в пресных и минерализованных водах. Так, проницаемость песчано-глинистых пород в пресной воде, как правило, значительно меньше, чем в соленой хлоридной воде, что объясняется бóльшим набуханием глинистых частиц в пресной воде по сравнению с соленой. Набухание глинистого материала приводит к закупорке порового пространства и снижению проницаемости водовмещающих пород. Основной причиной набухания глинистых минералов в водной среде является процесс их поверхностной диссоциации, обусловливающий развитие диффузных слоев связанной воды вокруг глинистых частиц. Диффузные оболочки, заполняя поровое пространство, уменьшают проницаемость породы. Развитие диффузных оболочек наиболее интенсивно происходит в пресной воде, и наоборот, их развитие подавляется с ростом концентрации хлоридных вод.

Исследованиями установлено, что различие проницаемости для пресных и соленых вод становится особенно заметным с увеличением содержания глинистого материала в породе. Максимально этот эффект проявляется в глинах, которые при одних и тех же перепадах напоров практически могут не пропускать пресную воду и фильтровать хлоридные воды.

Различие в проницаемости для пресной и соленой воды будет неодинаковым в зависимости от типа глин и состава их обменных катионов. В монтмориллонитовых глинах, и в первую очередь Na-монтмориллонитовых, перепад проницаемости для пресных и соленых вод будет во много раз больше, чем для гидрослюдистых и каолинитовых глин. Если для монтмориллонитовых глин эти проницаемости различаются в несколько раз и даже на порядок, то для каолинитовых глин, в частности Ca-каолинитовых глин, это различие проницаемостей будет значительно меньшим (не более чем в 1,5—2 раза).

Для водовмещающих песчаных отложений, особенно высоко проницаемых песков и песчаников, а также трещиноватых пород различие в проницаемостях для пресных и соленых вод будет незначительным и им можно пренебречь.

Влияние различия плотностей пресных и соленых вод на их движение в пласте

Различие минерализаций пресных и соленых вод обусловливает различие плотностей этих вод. При движении жидкостей с разными плотностями происходит деформация границы раздела, выражающаяся в формировании «языка» более тяжелой жидкости по подошве пласта. Если принять, что первоначальная граница пресных и соленых вод была вертикальной, то в дальнейшем эта граница раздела становится наклонной вследствие того, что более тяжелая жидкость (соленая вода) «подпирает» более легкую (пресную воду), и в подошве пласта образуется «язык» соленых вод. Размеры этого «языка» определяются соотношением плотностей пресных и соленых вод, мощностью пласта, скоростью движения подземных вод и зависят от времени.

Движение в пласте жидкостей с разными плотностями исследовали И. А. Чарный, В. П. Пилатовский, А. М. Пирвердян, П. Я. Полубаринова-Кочина, Н. К. Гиринский, Ф. М. Бочевер, Н. Н. Веригин, В. М. Шестаков и др.

Оценка размеров «языка» соленых вод, выполненная на основе решений И. А. Чарного [71], показала, что при $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} > 0{,}01$, где $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_0$ и γ_1, γ_0 — плотности соленых и пресных вод, что соответствует минерализации соленых вод свыше 20 г/л (плотность пресной воды принята равной 1), длина «языка» соленых вод, сформировавшегося за время 10^4 сут, составляет сотни метров и километры.

В случае небольших минерализаций соленых вод (2—5 г/л), чему соответствует $\frac{\Delta\gamma}{\gamma_0} < 0{,}001$, длина «языка» соленых вод, сформировавшегося за указанный период времени, не превышает нескольких десятков метров.

Дисперсия границы раздела пресных и соленых вод

При изучении движения пресных и соленых вод могут быть два подхода. Первый, более простой, предполагает, что вытеснение одной жидкости другой носит «поршневой» характер, т. е. происходит равномерно, без образования «языков», с четко выраженной границей раздела жидкостей. Другой подход учитывает наличие зоны рассеяния (размазывания) между двумя жидкостями вследствие микронеоднородности порового пространства, различного размера отдельных пор и обусловленной этим неодинаковой скорости движения жидкости в порах. Этот процесс конвективного переноса в условиях микронеоднородного строения пористого пространства с наложением молекулярной диффузии получил название дисперсии (А. Шейдеггер), фильтрационной диффузии (В. М. Шестаков), конвективной диффузии (В. Н. Ни-

колаевский). Вопросы конвективной диффузии рассматриваются также Н. Н. Веригиным, Ф. М. Бочевером, А. Е. Орадовской, М. Д. Розенбергом, Л. В. Радушкевич и другими исследователями.

Оценим, насколько значительно влияние конвективной диффузии на движение границы раздела пресных и соленых вод. Для этого определим размеры зоны дисперсии.

Согласно В. М. Шестакову, размеры этой зоны в условиях плоско-параллельного прямолинейного движения определяются по формуле

$$\Delta l = 4\sqrt{\left(\frac{D_м}{v} + D_0\right)\frac{v \cdot t}{n_0}},$$

где $D_м$ — коэффициент молекулярной диффузии в пористой среде (величина $D_м$ варьирует в пределах 10^{-3}—10^{-5} м²/сут); D_0 — линейный параметр, имеющий размерность длины и величину 0,001—0,002 м; v — скорость фильтрации, м/сут; t — время, сут; n_0 — пористость.

Аналогичные зависимости для оценки размеров зоны дисперсии приводят и другие авторы.

Для расчета Δl были приняты значения $D_м = 10^{-3}$ м²/сут и $n_0 = 0{,}1$; значения других параметров указаны в табл. 2. В числителе дана величина Δl (в м), в знаменателе — длина пути (в м) перемещения границы раздела при «поршневом» вытеснении.

Таблица 2

Размеры зоны дисперсии

D_0	v	t, сут			
		1000	5000	10 000	20 000
0,001	0,1	11/1000	29/5000	41/10 000	58/20 000
	0,2	14/2000	31/10 000	44/20 000	62/40 000
0,002	0,2	15/2000	33/10 000	46/20 000	67/40 000

Из табл. 2 следует, что для приведенных оптимальных значений параметров D_0 и v размеры зоны дисперсии составляют менее 1% от длины пути границы раздела.

Следовательно, ошибка в оценке расстояния перемещения границы соленых вод без учета конвективной диффузии будет незначительной. Размеры зоны дисперсии в табл. 2 совпадают с аналогичными величинами, указанными в работах В. М. Шестакова, Н. Н. Веригина, Ф. М. Бочевера и др.

Незначительна ширина зоны дисперсии также при плоско-радиальном движении подземных вод. Это обстоятельство

отмечает Ф. М. Бочевер [16]. При условии $\frac{Q}{Dhn_0} \geqslant 0{,}002$, что обычно в большинстве случаев соблюдается, разница в длине пути при «поршневом» вытеснении и с учетом конвективной диффузии не превышает 1%. В приведенном условии Q — дебит скважины; D — коэффициент конвективной диффузии ($D \approx 10^{-2}$—10^{-3} м²/сут); h — мощность водоносного горизонта; n_0 — пористость.

Таким образом, для практических расчетов перемещения фронта соленых вод можно использвать схему «поршневого» вытеснения.

Следует отметить, что в последнее время развивается (В. М. Шестаков, А. А. Рошаль, И. С. Пашковский, Н. Н. Веригин) новый интересный подход к изучению миграции подземных вод, основанный на гетерогенной модели строения водоносного горизонта.

Итак, наиболее характерными типовыми гидрогеологическими схемами для месторождений пресных подземных вод являются неограниченный по площади водоносный горизонт и полуограниченный водоносный горизонт с контуром постоянного напора.

Система пресные — соленые воды приближенно может рассматриваться как однородная; фильтрационные свойства пород водоносного горизонта принимаются одинаковыми для пресных и соленых вод.

Движение соленых вод к водозабору может происходить в условиях «бассейна» (естественный расход подземных вод отсутствует или он настолько мал, что его можно не учитывать) и в условиях «потока» (с учетом естественного движения подземных вод).

ГЛАВА II

МЕТОДИКА ПРОГНОЗА КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА ВОДОЗАБОРАХ

Для правильного представления о характере движения жидкостей в пласте и обоснования расчетных формул с целью определения времени и расстояния перемещения подземных вод необходимо знать структуры наиболее часто встречающихся типов фильтрационных потоков. Под структурой потока понимается его гидродинамическая сетка и особенно характер линий тока, по которым движутся частицы жидкости.

Перемещение частиц жидкости в пласте происходит под влиянием водозаборных сооружений и естественного потока подземных вод. В ряде случаев последний бывает настолько мал, что им можно пренебречь.

Для краткости гидродинамические условия пласта, в котором естественное движение подземных вод отсутствует, будем называть бассейном, а при наличии естественного движения подземных вод — потоком. Естественное движение подземных вод учитывается через его скорость $v_e = Ki_e$, где K — коэффициент фильтрации; i_e — естественный уклон потока.

Характер движения жидкости в однородном пласте обусловлен действием водозабора, границ пласта и естественного потока подземных вод. Наиболее простым является плоско-радиальное течение, образующееся при работе одиночного водозабора в неограниченном бассейне или при расположении скважины в центре пласта с круговым контуром постоянного напора. Границы пласта и естественный поток деформируют плоско-радиальное течение и оно становится плоско-криволинейным. Вблизи скважины эти деформации выражены слабее и линии тока близки к прямым радиальным линиям (квазирадиальное течение). Представляет интерес оценка размеров области квазирадиального течения, в пределах которой время движения жидкости незначительно отличается от времени движения в условиях неограниченного пласта-бассейна.

Перемещение соленых вод по пласту предполагается в условиях установившегося режима фильтрации. Это допущение

обосновывается тем, что распространение давления в пласте происходит во много раз быстрее, чем само перемещение подземных вод.

В табл. 3 приведены результаты расчетов времени движения подземных вод в условиях установившегося $t_у$ и неустановившегося $t_н$ режимов фильтрации в неограниченном пласте и относительная погрешность δt расхождения этих времен. Расчеты $t_у$ и $t_н$ производились соответственно по формулам (3) и (5) главы IV.

Таблица 3

Время движения подземных вод в условиях установившегося и неустановившегося режимов фильтрации

$\left(q = \frac{Q}{h} = 50\ м^2/сут,\ n_0 = 0.1,\quad a = 10^4\ м^2/сут\right)$

r, м	100	300	500	1000
$t_н$, сут	63,9	582,5	1624	6530
$t_у$, сут	62,9	566	1573	6290
$\lvert\delta t\rvert$, %	1,6	2.9	3,3	3,7

Из табл. 3 следует, что на сравнительно небольших удалениях от водозабора время движения при стационарном режиме незначительно отличается от времени движения при нестационарном режиме. Время перемещения частиц жидкости при нестационарном режиме фильтрации больше времени перемещения при стационарном режиме фильтрации; следовательно, расчеты перемещания соленых вод по формулам для стационарного режима содержат некоторый «запас прочности».

При анализе структуры потока соленые и пресные подземные воды принимаются (в соответствии с изложенным в главе I) однородными жидкостями, с одинаковой плотностью и вязкостью, а вытеснение одной жидкости другой предполагается «поршневым». Следует отметить, что схема «поршневого» вытеснения наиболее характерна для относительно однородных пористых коллекторов. В случае трещиноватых пород и слоистых толщ требуется иной подход, и использование в этих условиях схемы «поршневого» вытеснения допустимо лишь для ориентировочных оценок.

Плоское потенциальное течение характеризуется комплексным потенциалом $F(z)$, который выражается через сопряженные гармонические функции $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, y)$ и в области комплексного переменного $z = x + iy$ записывается в виде

$$F(z) = \varphi(x, y) + i\psi(x, y) + \text{const}. \qquad (1)$$

Действительная часть комплексного потенциала равна

$$\operatorname{Re} F(z) = \varphi(x, y)$$

и соответствует потенциалу скорости (или функции потенциала). Мнимая часть комплексного потенциала равна

$$ImF(z) = \psi(x, y)$$

и соответствует функции тока.

Следовательно, если известен комплексный потенциал потока, то, разделяя действительную и мнимую части, можно найти функцию потенциала φ и функцию тока ψ. Обе эти функции связаны условием Коши — Римана

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}, \quad \frac{\partial \psi}{\partial y} = \frac{\partial \psi}{\partial x}. \tag{2}$$

Зная потенциальную функцию φ, которая однозначно связана с напором или давлением, на основе соотношений (2) можно найти функцию тока ψ. Функция потенциала и функция тока выражаются через криволинейный интеграл от составляющих по координатным осям скоростей фильтрации v_x и v_y

$$\varphi(x, y) = \int_{z_0}^{z}{}_L (v_x\, dx + v_y\, dy) + \text{const}, \tag{3}$$

$$\psi(x, y) = \int_{z_0}^{z}{}_L (-v_y\, dx + v_x\, dy) + \text{const}. \tag{4}$$

Обычно бывает известно распределение напора (давления), от которого легко перейти к потенциалу φ. Продифференцировав φ по x и y, находят соответственно составляющие v_x и v_y — скорости фильтрации по координатным осям x и y. Подставляя полученные выражения v_x и v_y в зависимость (4), получают выражение для функции тока.

Приравнивая $\varphi(x, y)$ и $\psi(x, y)$ постоянной величине, найдем уравнение семейства линий равных потенциалов (эквипотенциалей) и уравнение семейства линий тока. Для анализа структуры фильтрационных потоков нас будут интересовать в основном функция тока и уравнение линий тока. Линии тока, т. е. пути движения частиц жидкости, могут быть определены аналитически на основе уравнения линий тока. Линии тока можно построить также графически [26, 49, 61]. Среди линий тока выделяют главную линию тока, которая характеризуется наибольшими скоростями движения частиц жидкости и по которой определяют кратчайшее расстояние от границы соленых вод до водозабора и наименьшее время движения соленых вод до водозабора.

Для анализа структуры потока и прогноза движения соленых вод в пласте необходимо знать также скорость и время движения

подземных вод. Скорость движения (или скорость фильтрации) подземных вод, как уже отмечалось, находится путем дифференцирования потенциальной функции. Время движения частицы жидкости вдоль линии тока L в общем виде записывается через криволинейный интеграл [71, 81]

$$t = n_0 \int_{x_0}^{x} \frac{dx}{\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial x}} + \text{const}, \quad t = n_0 \int_{y_0}^{y} \frac{dy}{\frac{\partial \varphi(x, y)}{\partial y}} + \text{const}, \qquad (5)$$

где n_0 — пористость водоносных пород.

Следует отметить, что получение конечных решений для t при движении вдоль любых линий тока представляет собой сложную задачу. Для решения практических задач в большинстве случаев достаточно определить время движения загрязненных вод на заданное расстояние по главной линии тока (кратчайшему расстоянию). Поэтому ниже (см. гл. IV) для каждой из рассмотренных схем приводятся выражения для времени движения вдоль главных линий тока, а также для отдельных схем полученные зависимости для времени движения по любой линии тока. Время движения загрязненных вод в пласте можно рассчитать также графо-аналитическим методом

$$t = \sum_{1}^{j} t_j = \sum_{1}^{j} \frac{n_0 \Delta x_j}{v_j}, \qquad (6)$$

где j — число отрезков, на которые разбивается весь путь; v_j — скорость в середине каждого отрезка Δx_j.

Как уже отмечалось, получить точную зависимость для времени движения жидкости по криволинейной траектории (для любой линии тока) очень сложно. Можно наметить приближенный путь решения этой задачи, суть которого сводится к следующему: движение по криволинейной траектории с переменной скоростью заменяется движением по равновеликой (по длине) прямой линии с постоянной средней скоростью. Итак, пусть требуется найти время движения жидкости вдоль криволинейной линии тока от скважины до точки с координатами x_1 и y_1. Из уравнения семейства линий тока

$$f(x, y, \alpha) = 0$$

найдем уравнение той линии тока, которая проходит через точку (x_1, y_1). Для этого в уравнение семейства линий тока вместо x и y подставляем x_1, y_1 и находим постоянную α_1, соответствующую данной линии тока. Запишем уравнение фиксированной линии тока в явном виде $y = f(x, \alpha_1)$ или $x = f(y, \alpha_1)$. Далее определяем

длину L криволинейной траектории, используя для этого приближенные зависимости для длины дуги [61]

$$L=(x_2-x_1)+\frac{1}{2}\int_{x_1}^{x_2} f'^2(x, \alpha_1)\,dx, \text{ если } |f'(x, \alpha_1)|<1; \tag{7}$$

$$L=f(x_2, \alpha_1)-f(x_1, \alpha_1)+\frac{1}{2}\int_{x_1}^{x_2}\frac{dx}{f'(x, \alpha_1)}, \text{ если } |f'(x, \alpha_1)|>1, \tag{8}$$

где x_1 — абсцисса начальной точки.

Находим среднюю величину скорости движения жидкости вдоль криволинейной траектории

$$v_{ср}=\frac{1}{x_2-x_1}\int_{x_1}^{x_2}\int_L v(x, y)\,dx. \tag{9}$$

Для вычисления криволинейного интеграла выразим (с помощью уравнения линии тока) y через x и α_1 и подставим в подинтегральное выражение

$$v_{ср}=\frac{1}{x_2-x_1}\int_{x_1}^{x_2}\int_L v[x, f(x, \alpha_1)]\,dx. \tag{10}$$

Время движения жидкости вдоль криволинейной траектории длиной L равно

$$t=\frac{L}{v_{ср}}.$$

Изменение качества воды на водозаборе, после того как к нему подтянутся первые порции соленых вод, будет определяться расходом соленых вод в общем дебите водозабора.

Для определения расхода q_c соленых вод, поступающих в водозабор, используется функция тока $\psi(x, y)$. Поток жидкости через произвольную кривую L в плоскости x, y равен разности значений функции тока на концах этой кривой

$$q(x, y)=\frac{Q}{h}=\int_{x_1y_1}^{x_2y_2}\int_L d\psi=\psi(x_2, y_2)-\psi(x_1, y_1), \tag{11}$$

где (x_1, y_1) и (x_2, y_2) — начальная и конечная точки кривой L.

Расход соленых вод q_c может быть найден по формуле (11), если величины x и y, входящие в (11), рассматривать как координаты точек границы раздела пресных и соленых вод. Тогда начальные (x_1, y_1) и конечные (x_2, y_2) координаты участка границы соленых вод будут характеризовать ширину фронта соленых вод, поступающих в водозабор.

Зная дебит водозабора q, расход соленых вод $q_с$, определяемый по формуле (11), и расход пресных вод $q_п$, который найдем как разность между q и $q_с$, из уравнения смешения получим

$$C(x, y) = C_0 + (C_1 - C_0)\frac{q_с(x, y)}{q}, \qquad (12)$$

где C_0, C_1 — минерализация пресной и соленой воды.

Расход соленых вод $q_с(x, y)$, который находится через функцию тока, зависит от граничных условий водоносного горизонта, наличия или отсутствия естественного потока подземных вод, фильтрационной неоднородности водоносного горизонта. Этими же факторами в конечном итоге определяется минерализация воды на водозаборе.

В ряде случаев удается получить прямую зависимость изменения минерализации воды на водозаборе C от времени t

$$C = f(t) \qquad (13)$$

или же зависимость времени t от наступления на водозаборе искомой минерализации C

$$t = f(C). \qquad (14)$$

Однако получение решений типа (13) или (14) не всегда возможно. Зачастую задача сводится к получению на основе уравнений (5) решения для времени движения частиц жидкости к водозабору и на основе уравнения (12) решения для минерализации воды на водозаборе в зависимости от ширины фронта поступления соленых вод. В этом случае прогноз изменения минерализации воды на водозаборе производится в два этапа:

1) определяется доля соленых вод, поступающих к водозабору от фронта соленых вод фиксированной ширины, и соответствующая этому фронту минерализация воды на водозаборе (ширина фронта поступления соленых вод к водозабору определяется координатами его крайних точек);

2) находится время поступления в водозабор соленых вод от фронта фиксированной ширины (по времени подтягивания к водозабору крайних точек этого фронта).

При наличии переходной зоны от пресных вод к соленым прогноз изменения минерализации можно производить следующим образом. Воды переходной зоны будем называть солоноватыми в отличие от зоны соленых вод, минерализация которых принимается постоянной. Разделим область солоноватых и соленых вод на n участков постоянной, но разной минерализации. Бо́льшему индексу полосы соответствует большая минерализация воды, т. е. $C_0 < C_1 < C_2 < \ldots < C_n$.

Участки-полосы с индексами от 1 до $n - 1$ представляют собой переходную зону от пресной воды с минерализацией C_0 к соленой воде постоянной минерализации C_n. Выделенные полосы в про-

цессе эксплуатации будут последовательно подтягиваться к водозабору. Таким образом, наличие переходной зоны можно учесть методом «последовательного втягивания полос».

Минерализация отбираемой воды определяется долями пресной воды Q_0 и соленых вод $Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ в общем дебите скважины. В свою очередь величины $Q_0, Q_1, Q_2, \ldots, Q_n$ будут определяться величинами углов, ограничивающих потоки этих вод к скважине (рис. 3). Возьмем такой момент времени, когда к скважине подошли соленые воды всех участков, т. е. когда в скважине имеет место смешение вод с минерализацией $C_0, C_1, C_2, \ldots, C_n$.

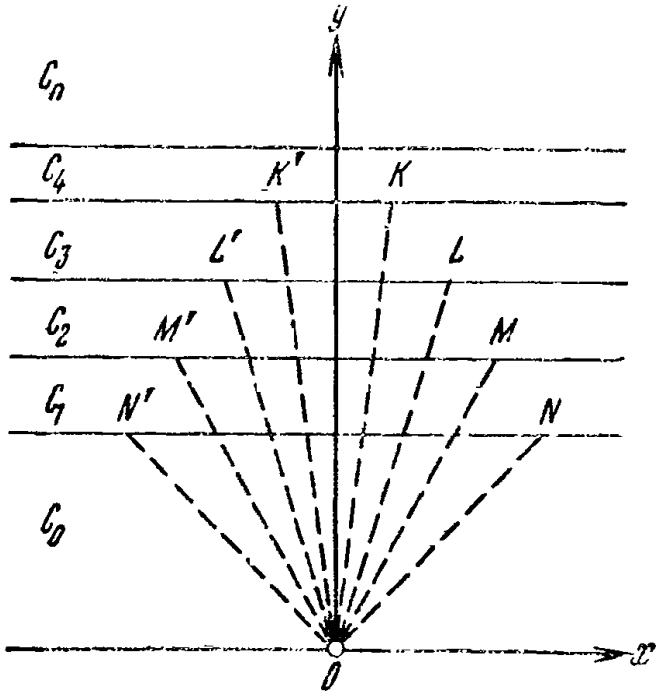


Рис. 3. Схема учета переходной зоны от пресных вод с минерализацией C_0 к соленым водам с минерализацией C_n

Тогда воды с $C_0, C_1, C_2, \ldots, C_n$ будут поступать в скважину в пределах углов соответственно: $2\pi - \angle N'ON, \angle N'ON - \angle M'OM, \angle M'OM - \angle L'OL$ и т. д.

Составляя уравнение смешения, находим

$$C = C_0 + (C_1 - C_0)\frac{q_1}{q} + (C_2 - C_1)\frac{q_2}{q} + \ldots, \qquad (15)$$

где $q_1, q_2, \ldots$ — притоки солоноватых вод из «полос» с минерализацией C_1, C_2 и т. д.

Для практических расчетов переходную зону солоноватых вод достаточно представить одним или двумя участками.

В предлагаемом методе учета переходной зоны делается допущение, что работа водозабора не приводит к дополнительной существенной дисперсии границы раздела пресных и соленых вод.

ГЛАВА III

СТРУКТУРА ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД К ВОДОЗАБОРАМ

Под структурой движения подземных вод понимается конфигурация линий тока, по которым происходит движение частиц жидкости. Структура фильтрационного потока зависит от типа водозабора (одиночная скважина, линейный ряд скважин, галерея и др.), геометрии водоносного горизонта, граничных условий пласта, естественного движения подземных вод. Для анализа структуры фильтрационного потока необходимо знать функцию тока, уравнение линий тока и распределение скоростей фильтрации.

НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ПО ПЛОЩАДИ ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ

Одиночный водозабор (скважина), полностью вскрывающий водоносный горизонт мощностью h, работает с постоянным дебитом Q. Рассмотрим подтягивание соленых вод к водозабору в условиях «бассейна» ($v_e = 0$) и в условиях «потока» ($v_e = \text{const} \neq 0$).

Условия бассейна

В этом случае выражение для функции тока $\psi(x, y)$ запишем

$$\psi(x, y) = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x} + \text{const}, \quad q = \frac{Q}{h}. \tag{1}$$

Уравнение линий тока имеет вид

$$\operatorname{arctg} \frac{y}{x} = \frac{2\pi\alpha}{q}, \quad \alpha = \text{const} \tag{2}$$

или

$$y = \alpha_1 x, \quad \alpha_1 = \operatorname{tg} \frac{2\pi\alpha}{q}. \tag{2а}$$

Из (2а) следует, что линиями тока являются прямые линии, радиально сходящиеся к скважине, т. е. поток плоско-радиальный. Движение подземных вод к водозабору происходит со всей площади водоносного горизонта и весь пласт представляет собой область питания водозабора. В (1) $\operatorname{arctg} \frac{y}{x}$ характеризует угол θ,

образованный положительным направлением оси x и линией тока, проходящей через некоторую фиксированную точку $M(x, y)$; угол θ отсчитывается от положительного направления оси x против часовой стрелки. Как уже отмечалось, функция тока ψ характеризует долю притока к водозабору подземных вод, поступающих через угол θ. Значение функции тока определяется величиной угла θ. Если точка M находится на положительном направлении оси x, то $\theta = 0$ и расход подземных вод через этот угол также равен 0. Если точка M располагается на биссектрисе первого квадранта, то $\theta = \frac{\pi}{4}$ и расход через угол θ согласно (1) составляет $\frac{1}{8}$ дебита водозабора (q). Когда точка M находится на положительном направлении оси y, то $\theta = \frac{\pi}{2}$ и доля расхода равна $\frac{q}{4}$. Если точка M располагается на отрицательном направлении оси x, то $\theta = \pi$ и расход равен половине дебита водозабора.

Когда линия тока с точкой M совершит против часовой стрелки полный оборот и сомкнется с положительным направлением оси x, угол θ будет равен 2π и расход через этот угол будет соответствовать дебиту водозабора.

Действительная скорость движения подземных вод вдоль линий тока равна

$$v_д = \frac{q}{2\pi n_0 r}, \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}. \tag{3}$$

С удалением от скважины скорость уменьшается обратно пропорционально расстоянию r и по всем линиям тока убывает одинаково. При возрастании r от 0 до ∞ скорость убывает от ∞ до 0. Наиболее быстро скорость изменяется непосредственно вблизи скважины.

Условия потока

Работа скважины в условиях естественного движения подземных вод исследовалась В. Н. Щелкачевым, В. М. Шестаковым, Е. Л. Минкиным, автором и др. Рассмотрим структуру движения подземных вод и особенности подтягивания соленых вод к водозабору при наличии естественного потока подземных вод.

Естественное движение подземных вод прямолинейное, направлено вдоль оси x и характеризуется постоянной скоростью фильтрации $v_e = K i_e$.

Уравнение линий тока имеет вид

$$x = y \operatorname{ctg} \frac{2\pi(\alpha - v_e y)}{q}, \tag{4}$$

где $\alpha = \text{const}$. Главная линия тока — ось x. Наличие естественного течения подземных вод обусловливает структуру фильтрационного потока, резко отличную от рассмотренной выше для неограниченного бассейна подземных вод (рис. 4). Поле фильтрационного течения разбивается на две области — внутреннюю

и внешнюю. Во внутренней области, примыкающей к скважине, все линии тока заканчиваются на скважине, во внешней области линии тока минуют скважину. Назовем внутреннюю область областью питания. Движение подземных вод к водозабору происходит только в пределах области питания. Область цитания ограничена нейтральной линией тока *MAN*, уравнение которой

$$x = y \operatorname{ctg} \frac{\pi (q - 2v_e y)}{q}. \tag{5}$$

Вниз по потоку границей этой области является лежащая на оси x так называемая водораздельная точка A (см. рис. 4), в которой

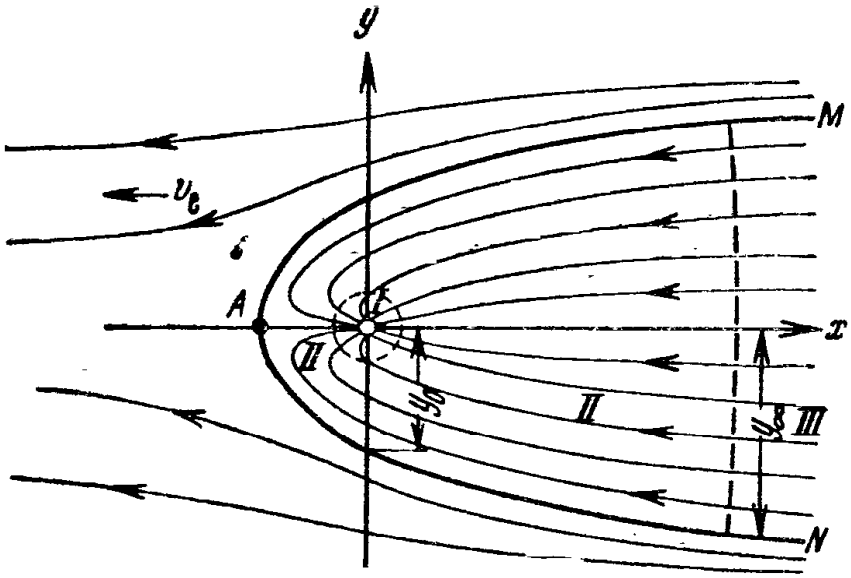


Рис. 4. Структура фильтрационного течения к водозабору в неограниченном пласте в условиях потока

I — область плоско-радиального течения; *II* — область плоско-криволинейного течения; *III* — область плоско-параллельного течения

результирующая скорость фильтрации, суммируемая из скорости естественного потока и скорости, обусловленной действием водозабора, равна 0. Вверх по потоку область питания распространяется неограниченно. Расстояние от водораздельной точки до скважины

$$x_A = \frac{Q}{2\pi h v_e}. \tag{6}$$

На линии водозабора ($x = 0$) и в удалении от него вверх по потоку ($x = \infty$) ширина области питания равна

$$y_0 = \frac{Q}{4\pi v_e}, \quad y_\infty = \frac{Q}{2\pi v_e}. \tag{7}$$

В других точках ширина области питания определяется по положению нейтральной линии тока. Ординаты точек нейтральной линии тока, характеризующие половину ширины области питания, находим по графику зависимости $\bar{y} = f(\bar{x})$ на рис. 5. Ука-

занный график построен на основе зависимости (5), представленной в безразмерной форме

$$\bar{x} = \bar{y} \operatorname{ctg} (\pi - \bar{y}), \tag{7а}$$

где

$$\bar{x} = \frac{x}{x_A}, \quad \bar{y} = \frac{y}{x_A}.$$

Как следует из (6), (7) и указанного графика, размеры области питания водозабора возрастают с увеличением его дебита и уменьшением скорости фильтрации естественного потока. При $v_e \to 0$ размеры области питания возрастают до бесконечности и охватывают весь пласт, что соответствует рассмотренным выше условиям безграничного бассейна.

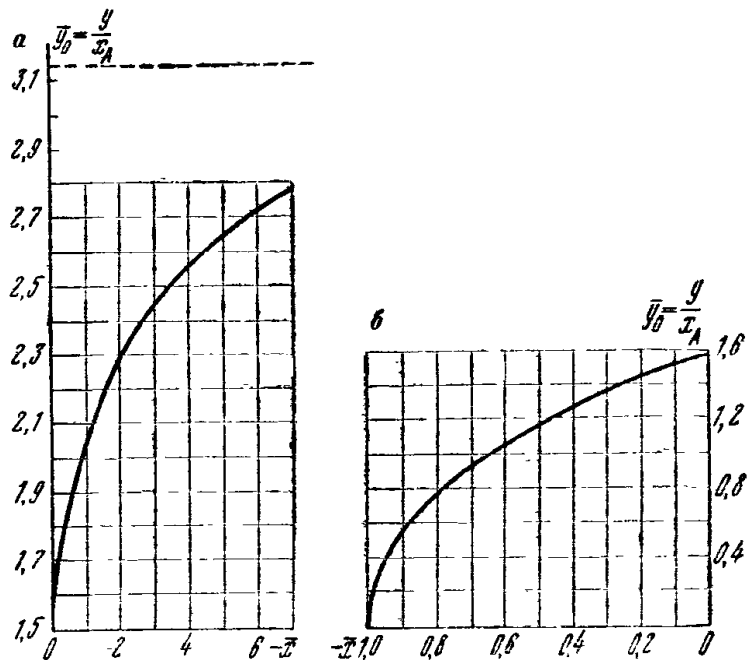


Рис. 5. График зависимости $\bar{y} = f(\bar{x})$ для определения ширины области питания водозабора в неограниченном пласте

а — для значений $\bar{x} < 0$; *б* — для значений $\bar{x} > 0$

Таким образом, в условиях естественного потока в общем случае область питания водозабора и область его влияния различаются по размерам и не совпадают: область питания меньше области влияния и занимает локализованную область, ограниченную нейтральной линией тока, тогда как область влияния водозабора распространяется на значительно бо́льшую часть водоносного горизонта и включает область питания водозабора.

Нетрудно показать, что выражения (6) и (7) характеризуют максимальные размеры области питания водозабора, соответствующие стационарному режиму фильтрации. Результирующая скорость фильтрации ($v_р$) в точках положительного направления оси x для условий нестационарного режима равна

$$v_р = v_e - \frac{Q}{2\pi h x} e^{-\frac{x^2}{4at}}.$$

Из условия $v_р = 0$ находим, что для каждого момента времени будет свое положение водораздельной точки A и соответственно свое расстояние x_A. Со временем расстояние x_A будет расти и при $t \to \infty$ достигнет максимального значения, определяемого выражением (6)

Исследуем характер токовых линий внутри области питания. Форма токовых линий обусловлена действием двух факторов — скважины и естественного потока. Очевидно, вблизи скважины преобладает первый фактор, и течение будет близко к плоско-радиальному, как в условиях бассейна. Покажем это.

Для малых значений x и y (порядок малости этих величин предполагается одинаковым) выражение (4) путем замены тангенса его аргументом приводится к виду

$$x\frac{2\pi\alpha}{q} - xy\frac{2\pi v_e}{q} = y.$$

Пренебрегая произведением xy как величиной второго порядка малости по сравнению с x и y, получим

$$y = \frac{2\pi\alpha}{q}x,$$

т. е. уравнение прямых линий, выходящих из начала координат, характерное для плоско-радиального потока.

В удалении от скважины (вверх по потоку) характер фильтрационного течения в значительной степени определяется естественным потоком подземных вод и движение становится близким к плоско-параллельному.

Действительно, при больших значениях x отношение $\frac{y}{x} \to 0$, поскольку величина y согласно (7) является ограниченной. Тогда из (4) получаем

$$\frac{2\pi\alpha}{q} - y\frac{2\pi v_e}{q} = 0$$

или

$$y = \frac{\alpha}{v_e} = \text{const},$$

т. е. линии токов представляют собой прямые линии, параллельные оси x, как при плоско-параллельном течении.

Задаваясь определенной степенью погрешности отклонения прямолинейных траекторий от криволинейных с помощью уравнения линий тока (4) можно установить приближенные критерии существования плоско-радиального и плоско-параллельного течения внутри области питания водозабора. Так, принимая относительную величину максимальной погрешности не более 15—20%, найдем, что плоско-радиальное течение имеет место при условии

$$\frac{xhv_e}{Q} \leqslant 0{,}03, \tag{8}$$

а плоско-параллельное прямолинейное движение при

$$\frac{xhv_e}{q} \geqslant 0{,}6. \tag{9}$$

Физический смысл этих неравенств очевиден: плоско-радиальное течение существует вблизи водозабора при больших Q и малых v_e; плоско-параллельное движение реализуется вдали от водозабора при малых Q и больших v_e. Отсюда можно установить размеры области существования плоско-радиального $x_р$ и плоско-параллельного $x_п$ течений

$$x_р \leqslant 0{,}03 \frac{Q}{hv_e}, \tag{10}$$

$$x_п \geqslant 0{,}06 \frac{Q}{hv_e}. \tag{11}$$

Так, при $K = 20$ м/сут, $h = 20$ м, $Q = 2000$ м³/сут и принимая $i_e = 0{,}001$, находим, что радиальное движение происходит на площади радиусом $\sim$150 м ($x_р = 150$ м), а прямолинейное движение при $x > 300$ м ($x_п \geqslant 300$ м).

Неравенство (8) является по существу приближенным критерием перехода от условий потока к условиям бассейна. Внутри области с радиусом $x_р$ расчеты движения частиц жидкости можно производить как для условий бассейна.

Если сравнить радиус площади радиального течения $x_р$ с расстоянием от скважины до точки перегиба A, то окажется, что $\frac{x_A}{x_р} \approx$ ≈ 5, т. е. область радиального течения невелика по сравнению со всей областью питания. Из анализа уравнения линий тока и выражения для скорости фильтрации, которые имеют вид

$$v_x = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} + v_e,$$

$$v_y = \frac{q}{2\pi} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2},$$

вытекает еще одна особенность линий тока внутри области питания. Линии тока, заходящие в область отрицательных значений x, имеют точку перегиба, о чем свидетельствует изменение знака у составляющей скорости v_x в интервале $x < 0$. Наличие точек перегиба обусловливает изображенную на рис. 4 конфигурацию линий тока. В точке перегиба $v_x = 0$; из этого условия находим ординату $y_п$ точек перегиба линий тока внутри области питания в зависимости от значения x

$$y_п = \pm \sqrt{\frac{Q}{2\pi h v_e} x - x^2} \text{ или } y = \pm \sqrt{x_A x - x^2}. \tag{12}$$

Выражение (12) всегда действительно, так как $x_A x > x^2$, ибо $|x|_A > |x|$. Анализ формулы (12) показал, что при $x = 0{,}5\, x_A$ значение y максимально и равно $0{,}5\, x_A$. Это имеет определенное значение при анализе движения соленых вод к водозабору.

Итак, в фильтрационном течении, образованном действием скважины в неограниченном потоке подземных вод, можно выделить три зоны (см. рис. 4):

I зона (примыкает непосредственно к водозабору на площади радиусом $|x| < 0{,}03 \frac{Q}{hKi_e}$ или $|x| < 0{,}2\,x_A$) — движение плоско-радиальное и определяется в основном действием скважины.

II зона (занимает площадь слева от водозабора между первой зоной и водораздельной точкой A, справа от водозабора между первой зоной и точкой $x \approx 0{,}6 \frac{Q}{hKi_e}$ или $x \approx 3{,}5\,x_A$) — движение плоско-криволинейное, обусловленное наложением естественного потока на плоско-радиальное течение к скважине.

III зона (расположена вверх по потоку на отметках $x > 0{,}6 \frac{Q}{hKi_e}$ или $x > 3{,}5\,x_A$)— движение плоско-параллельное прямолинейное и определяется преимущественно естественным потоком подземных вод.

ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ С КОНТУРОМ ПОСТОЯННОГО НАПОРА

Рассматривается схема полуограниченного по площади водоносного горизонта с гидродинамически совершенным контуром постоянного напора (река, водохранилище, море) в условиях бассейна ($v_e = 0$) и в условиях потока ($v_e \neq 0$). Одиночный водозабор, вскрывающий водоносный горизонт на всю мощность, работает с постоянным дебитом Q и расположен на расстоянии d от контура постоянного напора (рис. 6). Положение координатных осей показано на рис. 6.

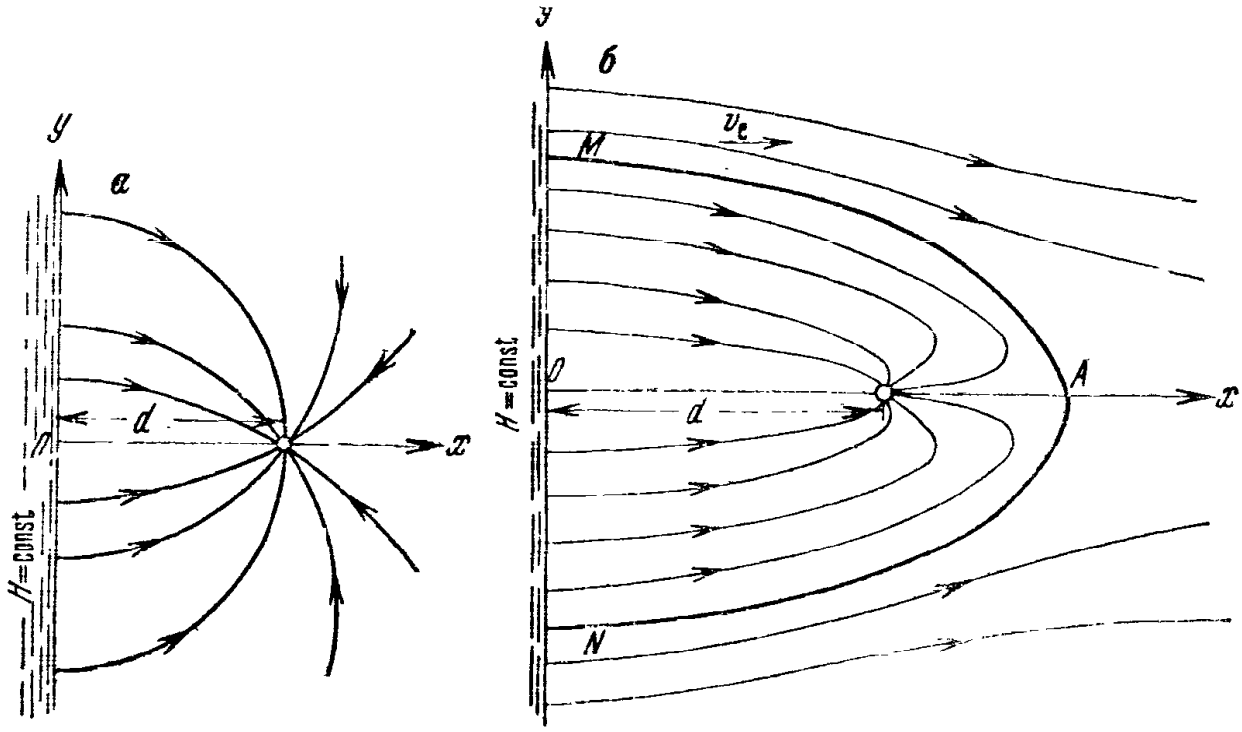


Рис. 6. Схема линий тока в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора в условиях бассейна и естественного потока подземных вод, направленного от контура

а — условия бассейна; *б* — условия потока

Полуограниченный пласт с контуром постоянного напора в условиях бассейна

Функцию тока $\psi(x, y)$, уравнение линий тока и выражение для скоростей v_x и v_y запишем соответственно

$$\psi(x, y) = \frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x^2} + \alpha, \quad \alpha = \text{const}, \tag{13}$$

$$x^2 + (y + \alpha d)^2 = d^2 (1 + \alpha)^2, \tag{14}$$

$$v_x = \frac{qd}{\pi} \frac{d^2 + y^2 - x^2}{(d^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2y^2}, \tag{15}$$

$$v_y = \frac{qd}{\pi} \frac{2xy}{(d^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2y^2}. \tag{16}$$

Из (14) видно, что линии тока представляют собой окружности, центры которых лежат на оси y. Главная линия тока ось x — дуга окружности бесконечно большого радиуса. Все линии тока начинаются на контуре постоянного напора и заканчиваются на скважине (рис. 6, *а*).

Исследуем характер линий тока вблизи скважины. Представим уравнение линий тока (14) в виде

$$\frac{d^2 - x^2 - y^2}{2yd} = \alpha. \tag{17}$$

Вблизи скважины имеем: $x \to d$, $y \to 0$. Обозначим $|x - d| = \Delta x$; при $x \to d$, $\Delta x \to 0$. Выражение (17) после преобразования приобретет вид

$$\frac{d^2 - x^2 - y^2}{2yd} = \frac{(d + x)(d - x) - y^2}{2yd} \approx \frac{2d\,\Delta x - y^2}{2yd} = \alpha.$$

Пренебрегая y^2 как величиной второго порядка малости по сравнению с Δx и y, получим

$$y = \frac{1}{\alpha} \Delta x,$$

т. е. уравнение прямых, выходящих из начала координат, что соответствует плоско-радиальному течению. Анализ геометрии токовых линий показал, что вокруг скважины в пределах области среднего радиуса $r \approx 0{,}5d$ течение жидкости близко к плоско-радиальному, при этом максимальная погрешность отклонения линий тока от радиальных линий не превышает 20%. В пределах этой области время движения жидкости к водозабору мало отличается от времени движения в неограниченном пласте в условиях бассейна. Например, при расположении водозабора на расстоянии 3000 м от реки движение подземных вод на ближней к водозабору площади пласта радиусом 1000 ÷ 1200 м будет происходить, как в условиях плоско-радиального потока, и расчет времени движения частицы жидкости вдоль линии тока может

производиться по формулам для неограниченного по площади водоносного горизонта.

Исследуем выражения для скоростей v_x и v_y. Из (15) и (16) видно, что знаменатель этих выражений всегда положителен, поэтому знак составляющих скорости будет определяться знаком числителя. В формуле для v_y числитель при положительных значениях x и y всегда имеет положительное значение, следовательно, скорость v_y нигде не меняет своего направления. Иначе обстоит дело с составляющей скорости v_x. Из (15) следует, что числитель при положительных значениях x и y может принимать как положительное, так и отрицательное значения. Поэтому должна быть точка перегиба, в которой происходит перемена знака v_x и в которой $v_x = 0$. Из этого условия, приравнивая числитель (15) нулю, найдем ординату $y_п$ точки перегиба

$$y_п = \pm\sqrt{x^2 - d^2}. \tag{18}$$

Знак $\pm$ обусловлен симметричностью течения относительно оси x. Выражение (18) действительно при $x > d$; следовательно, точка перегиба существует на тех линиях тока внутри области питания, которые продолжаются на отметках $x > d$. На линиях тока, характеризующихся отметками $x < d$, точки перегиба отсутствуют. Выражение (18) имеет важный физический смысл, который будет выяснен ниже при рассмотрении вопроса об особенностях движения соленых вод к водозабору.

Используя уравнение линий тока (17), представим выражение для v_x в следующем виде:

$$v_x = \frac{qd}{\pi}\left[\frac{2y_0^2}{\left(d^2+y_0^2\right)^2} + \frac{y_0\left(d^2-y_0^2\right)}{y\left(d^2+y_0^2\right)^2}\right], \tag{19}$$

где y_0 — начальная ордината линий тока на контуре постоянного напора; y — текущая ордината линии тока. Формула (19) позволяет проследить изменение составляющей скорости v_x вдоль определенной линии тока, характеризующейся начальной ординатой y_0 на контуре постоянного напора. Выражение для скорости v_x согласно (19) состоит из двух членов. Первый член зависит только от y_0 и при движении частиц жидкости вдоль линии тока остается постоянным и положительным. Второй член зависит как от y_0, так и от y, поэтому изменение скорости v_x вдоль линии тока обусловлено изменением величины второго члена. Значение y при движении вдоль линии тока уменьшается от y_0 до 0, поэтому второй член непрерывно возрастает. В целом скорость v_x будет изменяться следующим образом: 1) при $y_0 < d$ второй член имеет положительное значение и скорость v_x вдоль линии тока непрерывно возрастает; 2) при $y_0 > d$ второй член отрицателен, поэтому скорость v_x при движении вдоль линии тока сначала будет постепенно уменьшаться, пока не достигнет нулевого значения

в точке перегиба, а затем, после изменения направления движения на противоположное, начнет возрастать.

Таким образом, точка перегиба имеет место только на тех линиях тока, начальная ордината которых на контуре постоянного напора характеризуется значениями $y_0 > d$.

Приравнивая выражение (19) нулю, получим формулу для определения ординаты $y_п$ точки перегиба через начальную ординату y_0

$$y_п = \frac{y_0^2 - d^2}{2y_0}. \tag{20}$$

Подставляя значение $y_п$ из (20) в (18), найдем абсциссу точки перегиба $x_п$, выраженную через начальную ординату y_0 фиксированной линии тока

$$x_п = \sqrt{d^2 + \frac{(y_0^2 - d^2)^2}{4y_0^2}}. \tag{21}$$

По известной точке перегиба можно построить приближенную траекторию движения частиц жидкости, заменив криволинейную траекторию ломаной линией.

В условиях полуограниченного пласта поле скоростей является несимметричным относительно скважины, в отличие от симметричного распределения скоростей в неограниченном пласте (бассейне). Так, время движения жидкости от контура постоянного напора до скважины (и наоборот) в 1,5 раза меньше времени движения на такое же расстояние в неограниченном пласте. Время движения на такое же расстояние в противоположную сторону в 1,3 раза больше, чем в неограниченном пласте, причем с увеличением расстояния это отношение будет возрастать. Таким образом, движение соленых вод между скважиной и контуром постоянного напора будет происходить быстрее, чем с противоположной стороны.

Полуограниченный пласт с контуром постоянного напора в условиях естественного потока подземных вод

Сначала рассмотрим случай, когда естественный поток подземных вод направлен от контура постоянного напора вдоль положительного направления оси x. Такие условия характерны для подрусловых линз пресных вод, формирующихся вблизи рек и каналов за счет инфильтрации поверхностных вод. Для этих условий уравнение линий тока имеет вид

$$\frac{q}{2\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x^2} + v_e y = \alpha \tag{22}$$

или

$$x = \sqrt{d^2 - y^2 - 2yd \operatorname{ctg} \frac{2\pi}{q}(\alpha - v_e y)}. \tag{23}$$

Картина линий тока показана на рис. 6, *б*; главная линия тока — ось x. В поле фильтрационного течения формируется область питания (как в условиях неограниченного потока), в пределах которой происходит движение подземных вод к водозабору. Область питания отделяется от остальной части фильтрационного потока нейтральной линией тока AMN, уравнение которой получается подстановкой в (22) или (23) значения $\alpha = \frac{q}{2}$. Абсцисса водораздельной точки A равна

$$x_A = \sqrt{d^2 + \frac{qd}{\pi v_e}}. \tag{24}$$

Водораздельная точка A удалена от скважины вверх по потоку на расстояние

$$x'_A = \sqrt{d^2 + \frac{qd}{\pi v_e}} - d. \tag{25}$$

Можно показать, что расстояние x'_A в условиях полуограниченного пласта меньше соответствующего расстояния в условиях неограниченного пласта. Обозначим длину области питания водозабора (расстояние от водозабора до водораздельной точки A) в неограниченном пласте l_1, а в полуограниченном пласте l_2; величины l_1 и l_2 определяются соответственно по формулам (19) и (25). Формулу (25) можно записать в виде

$$x_A = \sqrt{d(d + 2l_1)},$$

откуда следует, что x_A равно среднегеометрическому значению величин d и $(d + 2l_1)$, а среднеарифметическое этих величин равно $d + l_1$.

Учитывая, что среднегеометрическое значение всегда меньше среднеарифметического, имеем

$$x_A \leqslant d + l_1.$$

Так как $x_A = d + l_2$, окончательно получаем

$$d + l_2 \leqslant d + l_1$$

или

$$l_2 \leqslant l_1.$$

Таким образом, длина области питания водозабора в полуограниченном пласте всегда меньше длины области питания в неограниченном пласте.

Ширина $y_к$ области питания на линии контура постоянного напора приближенно определяется по формуле

$$y_к = 2\sqrt{\frac{qd}{\pi v_e}}. \tag{26}$$

Составляющие скорости движения частиц жидкости равны

$$v_x = \frac{qd}{\pi} \frac{d^2 + y^2 - x^2}{(d^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2y^2} + v_e, \tag{27}$$

$$v_y = \frac{qd}{\pi} \frac{2xy}{(d^2 + y^2 - x^2)^2 + 4x^2y^2}. \tag{28}$$

Если естественный поток подземных вод направлен к контуру постоянного напора (в сторону отрицательного направления

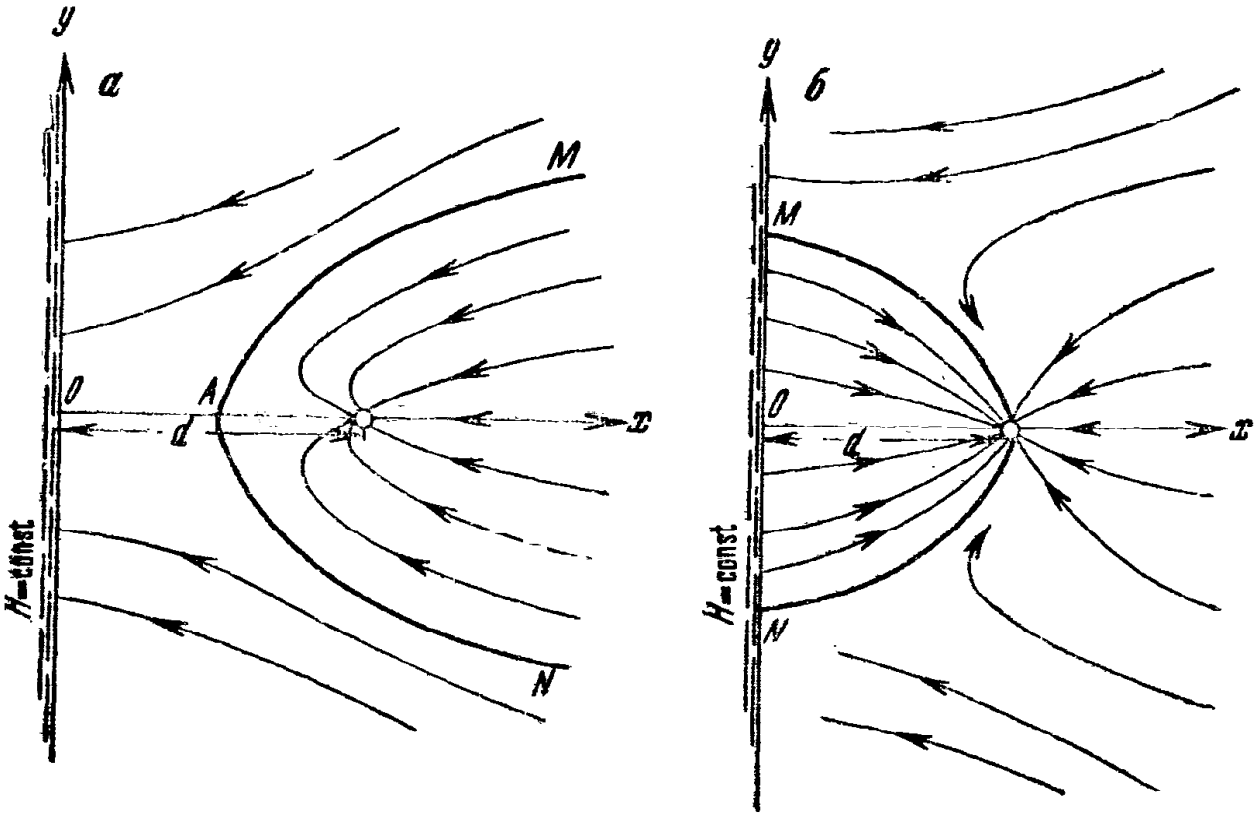


Рис. 7. Схема линий тока в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора в условиях естественного потока, направленного в сторону контура

а — область питания водозабора не достигла контура, *А* — водораздельная точка между водозабором и контуром; *б* — область питания водозабора захватила контур постоянного напора

оси x), то в уравнении линий тока (22) второй член ($v_e y$) записывается со знаком минус. В этом случае водораздельная точка A (рис. 7, *а*) формируется между водозабором и контуром постоянного напора. Ее положение на оси x определяется по формуле

$$x_A = \sqrt{d^2 - \frac{qd}{\pi v_e}} \tag{29}$$

С ростом дебита водозабора и уменьшением расхода естественного потока водораздельная точка приближается к контуру постоянного напора. Наличие водораздельной точки между водозабором и контуром постоянного напора зависит от величины $\frac{q}{\pi d v_e}$. При $\frac{q}{\pi d v_e} < 1$ между контуром постоянного напора и водозабором

формируется область питания последнего и существует водораздельная точка, определяемая по формуле (29); питание водозабора осуществляется за счет подземных вод; воды со стороны контура постоянного напора водозабором не привлекаются. При $\frac{q}{\pi d v_e} > 1$ область питания водозабора захватывает контур постоянного напора, водораздельная точка не существует; питание водозабора происходит за счет подземных вод и вод, поступающих со стороны контура постоянного напора. Характер линий тока для этого случая показан на рис. 7, *б*.

ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ С НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ

Водозабор расположен на расстоянии d от непроницаемой границы. Естественное движение подземных вод отсутствует. Уравнение линий тока имеет вид

$$\frac{2xy}{x^2 - y^2 - d^2} = \alpha. \qquad (30)$$

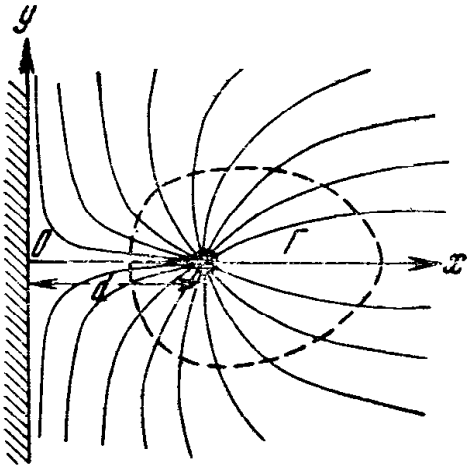


Рис. 8. Схема линий тока в полуограниченном пласте с непроницаемым контуром

г — область квазирадиального течения

Линиями тока являются гиперболы, поток плоско-криволинейный (рис. 8). Вблизи водозабора поток приближается к плоско-радиальному. Покажем это, для чего преобразуем уравнение линий тока (30)

$$\frac{2xy}{x^2 - d^2 - y^2} = \frac{2xy}{(x+d)(x-d) - y^2} \longrightarrow$$

$$\longrightarrow \frac{2yd}{2d\,\Delta x - y^2} \approx \frac{y}{\Delta x} = \alpha.$$

В результате выполненных преобразований получаем уравнение радиальных прямых линий, соответствующих плоско-радиальному течению.

Анализ выражения (30) показал, что размеры квазирадиальной области, внутри которой линии тока отклоняются от прямых линий с погрешностью не более 20%, составляют в среднем $r_р \sim$ $\sim 0{,}5\,d$. В целом область квазирадиального течения сжата по оси y и вытянута по оси x в сторону от непроницаемой границы.

Составляющие скорости фильтрации характеризуются следующими выражениями:

$$v_x = \frac{q}{2\pi}\left[\frac{x-d}{(x-d)^2 + y^2} + \frac{x+d}{(x+d)^2 + y^2}\right], \qquad (31)$$

$$v_y = \frac{q}{2\pi}\left[\frac{y}{(x-d)^2 + y^2} + \frac{y}{(x+d)^2 + y^2}\right]. \qquad (32)$$

Вдоль оси x и прямой $x = d$, параллельной оси y, скорости v_{x0} и v_{yd} равны

$$v_{x0} = \frac{q}{\pi} \cdot \frac{x}{x^2 - d^2}; \tag{33}$$

$$v_{yd} = \frac{q}{2\pi} \left(\frac{y}{4d^2 + y^2} + \frac{1}{y} \right). \tag{34}$$

Ниже приведены результаты сравнения скоростей v_{x0} и v_{yd} со скоростью v_0 в неограниченном пласте. Таким образом, имеем $0 < \frac{v_{x0}}{v_0} < 1$ при $0 < x < d$ и $1 < \frac{v_{x0}}{v_0} < 2$ при $x > d$; в целом отношение $\frac{v_{x0}}{v_0}$ изменяется от 0 до 2.

Зависимость $\frac{v_{x0}}{v_0}$ от $\bar{x} = \frac{x}{d}$

$\bar{x}$	0	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	1	1,2	1,5	2	3	5	7	10	100
$\frac{v_{x0}}{v_0}$	0	0,18	0,46	0,67	0,83	0,89	1	1,1	1,2	1,34	1,6	1,67	1,75	1,82	~2

Зависимость $\frac{v_{yd}}{v_0}$ от $\bar{y} = \frac{y}{d}$

$\bar{y}$	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,3	1,5	2	3	5	7	10	100
$\frac{v_{yd}}{v_0}$	1,0025	1,022	1,06	1,09	1,2	1,3	1,36	1,5	1,7	1,86	1,92	1,96	2

Составляющая скорости v_{yd} во всех точках больше скорости фильтрации v_0 в неограниченном пласте и отношение $\frac{v_{yd}}{v_0}$ изменяется от 1 до 2.

СТРУКТУРА ПОТОКА В ПЛАСТЕ-ПОЛОСЕ

Рассмотрим совершенную скважину в центре пласта-полосы шириной l, работающую с постоянным дебитом Q (рис. 9). Примем, что естественная скорость движения подземных вод настолько мала, что ею можно пренебречь. Для этих условий комплексный потенциал течения в пласте-полосе имеет вид [40, 61]:

$$F(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \sin \frac{\pi z}{l} + \text{const}, \quad z = x + iy, \tag{35}$$

h — средняя мощность водоносного горизонта.

После преобразований находим уравнение линий тока

$$\operatorname{ctg}\frac{\pi x}{l}\operatorname{th}\frac{\pi y}{l}=0. \tag{36}$$

Главная линия тока представляет собой прямую линию (ось y). Исследуем уравнение (36). При малых $\frac{\pi x}{l}$ и $\frac{\pi y}{l}$ $\left(\frac{\pi x}{l}<0{,}5 \text{ и } \frac{\pi y}{l}<0{,}5\right)$, заменяя тангенсы аргументами, получим

$$y=\alpha x, \tag{37}$$

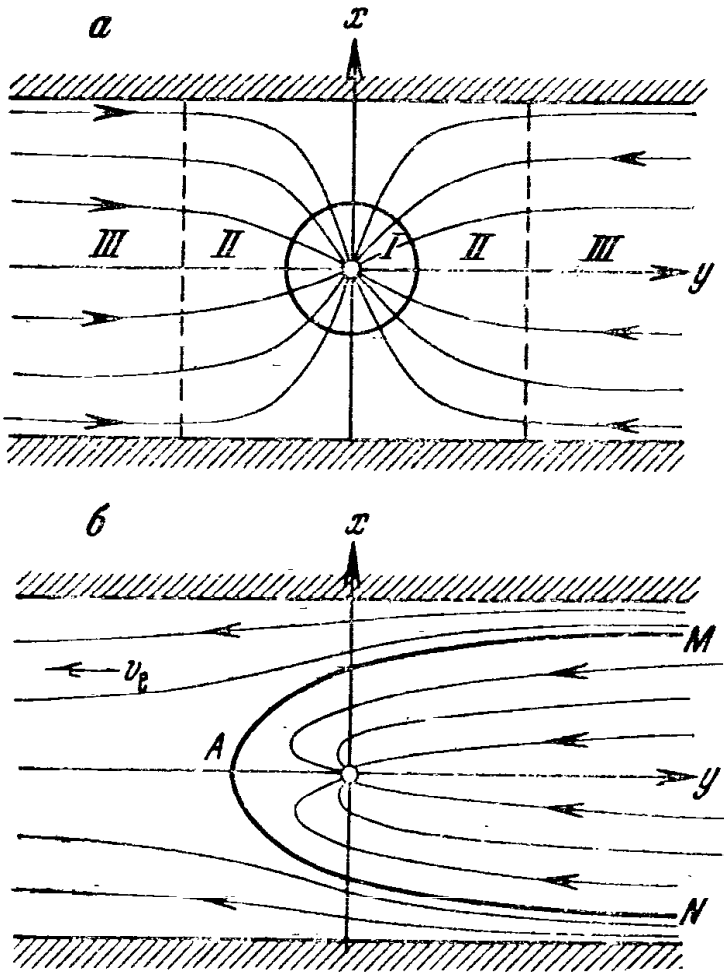


Рис. 9. Структура движения подземных вод к водозабору в пластеполосе в условиях бассейна и потока

а — условия бассейна: *I* — область плоско-радиального течения, *II* — область плоско-криволинейного течения, *III* — область плоско-параллельного течения; *б* — условия потока

т. е. уравнение прямых линий, выходящих из начала координат. При больших значениях $\frac{\pi y}{l}$ $\left(\frac{\pi y}{l}>1{,}6\right)$ величина $\operatorname{th}\frac{\pi y}{l}$ практически не отличается от 1; в этом случае вместо (36) имеем

$$\alpha=\operatorname{ctg}\frac{\pi x}{l} \quad \text{или} \quad x=\frac{l}{\pi}\operatorname{arcctg}\alpha=\text{const}, \tag{37а}$$

т. е. уравнение прямых линий, параллельных оси y. Таким образом, исходя из особенностей структуры фильтрационного потока, можно выделить три зоны (см. рис. 9, *а*): 1) зона I, $r<\frac{l}{2\pi}$, поток плоско-радиальный и определяется в основном действием скважины; 2) зона II, $\frac{l}{2\pi}<y\frac{l}{2}$, поток плоско-криволинейный

и обусловлен влиянием скважины и границ пласта; 3) зона III, $y > \frac{l}{2}$, поток плоско-параллельный, одномерный и форма его определяется главным образом границами пласта.

Скорости фильтрации частиц жидкости характеризуются выражениями

$$v_y = \frac{q}{2l} \cdot \frac{\operatorname{sh} \frac{2\pi y}{l}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{l} - \cos \frac{2\pi x}{l}}, \tag{38}$$

$$v_x = \frac{q}{2l} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi x}{l}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{l} - \cos \frac{2\pi x}{l}}, \tag{39}$$

$$v = \frac{q}{2l} \cdot \frac{\sqrt{\operatorname{sh}^2 \frac{2\pi y}{l} + \sin^2 \frac{2\pi x}{l}}}{\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{l} - \cos \frac{2\pi x}{l}}. \tag{40}$$

При $y > 0{,}5l$ имеем $\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{l} \gg \cos \frac{2\pi x}{l}$ и $\operatorname{ch} \frac{2\pi y}{l} \sim \operatorname{sh} \frac{2\pi y}{l}$, следовательно,

$$v \approx v_y = \frac{q}{2l},$$

т. е. постоянную скорость фильтрации плоско-параллельного прямолинейного течения, как при работе галереи. В этом существенное отличие от неограниченного и полуограниченного пластов, где с увеличением расстояния скорость непрерывно убывает. Исходя из этого, можно заключить, что при $y > 0{,}5\,l$ положение фронта загрязненных вод стабилизируется и движение его становится устойчивым, т. е. все точки фронта перемещаются с одинаковой скоростью (рис. 10 *а*); при $y < 0{,}5l$ равномерность передвижения фронта нарушается и в центре пласта формируется язык соленых вод (см. рис. 10 *б*, *в*).

При закачке в зоне I фронт закачиваемых вод распространяется радиально примерно с одинаковой скоростью по всем направлениям (рис. 11, *а*). В зоне II равномерность перемещения фронта нарушается: с большей скоростью жидкость движется по главной линии тока и с меньшими скоростями по другим линиям тока (см. рис. 11 *б*, *в*). В зоне III скорости по всем линиям тока становятся одинаковыми и перемещение фронта закачиваемых вод (стоков) приобретает устойчивый характер — фронт движется параллельно самому себе (см. рис. 11 *г*, *д*).

При наличии естественного потока, характеризующегося средней скоростью v_e, семейство линий тока описывается уравнением

$$\operatorname{ctg} \frac{\pi x}{l} \operatorname{th} \frac{\pi y}{l} = \operatorname{tg} \frac{2\pi (\alpha - v_e x)}{q},$$

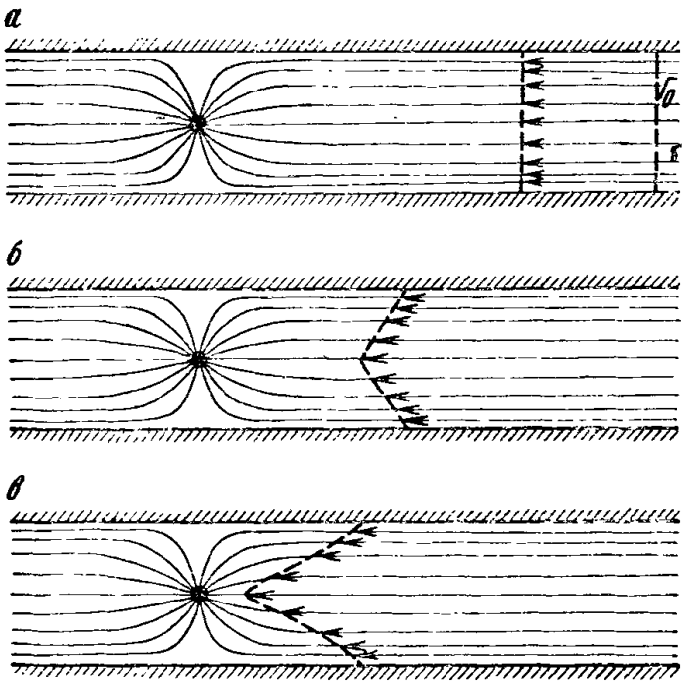


Рис. 10. Динамика продвижения фронта соленых вод в пласте-полосе в условиях бассейна

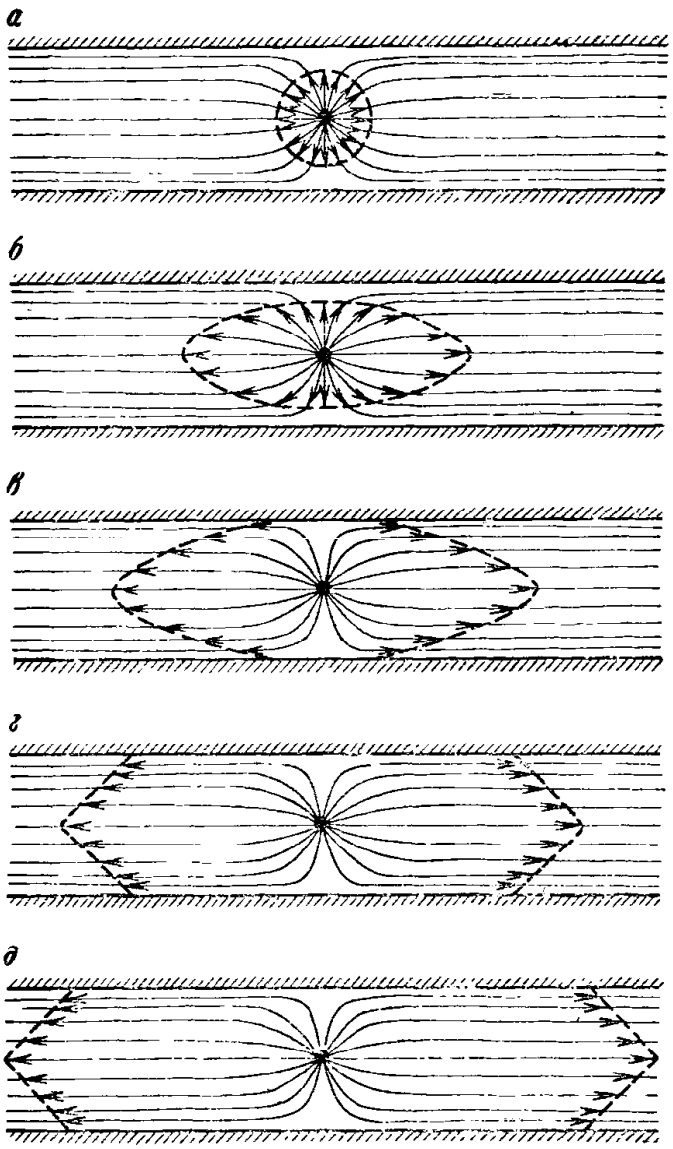


Рис. 11. Динамика распространения закачиваемой жидкости в пласте-полосе в условиях бассейна

или

$$y=\frac{l}{\pi}\operatorname{arth}\left[\operatorname{tg}\frac{2\pi}{q}(a-v_e x)\operatorname{tg}\frac{\pi x}{l}\right]. \tag{41}$$

Схема фильтрационного течения существенно отличается от рассмотренной выше. В пласте-полосе образуется область питания водозабора (см. рис. 9, *б*). Область питания ограничена нейтральной линией тока, уравнение которой

$$\operatorname{ctg}\frac{\pi x}{l}\operatorname{th}\frac{\pi y}{l}=\operatorname{tg}\frac{(q-2v_e x)\pi}{q}. \tag{42}$$

Вверх по потоку длина этой области бесконечна, а вниз по потоку ограничена точкой перегиба (y_A)

$$y_A=\frac{l}{\pi}\operatorname{arth}\frac{q}{2lv_e}. \tag{43}$$

Из (43) следует, что точка перегиба образуется только при условии

$$Q<2lv_e h. \tag{44}$$

Физический смысл неравенства (44) сводится к следующему: точка перегиба образуется лишь в случае, если скорость (на бесконечности), обусловленная действием скважины, меньше естественной скорости движения подземных вод.

Анализ выражения (44) показал, что положение точки перегиба зависит в основном от дебита скважины и скорости естественного потока. Что же касается ширины пласта, то ее влияние в общем незначительно и при $l > 4000 \div 5000$ м практически не сказывается, особенно при небольших дебитах отбора. Длина области питания в пласте-полосе шириной более 3000 м близка к ее длине в неограниченном пласте. И только в узких пластах-полосах ($l < 2000$) длина области питания становится заметно больше соответствующей длины в неограниченном потоке.

При $l \to \infty$ выражение (43) переходит в соответствующую формулу для неограниченного пласта

$$\lim_{l\to\infty} y_A=\frac{1}{\pi}\lim\frac{\operatorname{arth}(q/2lv_e)}{\frac{1}{l}}=\frac{1}{\pi}\lim_{l\to\infty}\frac{\varphi_1(l)}{\varphi_2(l)}=$$

$$=\frac{1}{\pi}\lim_{l\to\infty}\frac{\varphi_1'(l)}{\varphi_2'(l)}=\frac{1}{\pi}\lim_{l\to\infty}\frac{\frac{1}{1-(q/2lv_e)^2}\left(-\frac{q}{2l^2v_e}\right)}{\left(-\frac{1}{l^2}\right)}=\frac{q}{2\pi v_e}.$$

Ширина области питания x_0 на линии скважины ($y_0 = 0$) равна

$$x_0=\frac{q}{2v_e}. \tag{45}$$

Так как $Q \leqslant 2lv_e h$, то $x_0 \leqslant l$.

Сравним длину области питания водозабора в пласте-полосе и в неограниченном пласте. Запишем формулу (43) в виде

$$y_A = \frac{l}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\pi}{l} \cdot \frac{Q}{2\pi h v_e} = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arth} \frac{\pi x_A}{l},$$

где x_A — длина области питания водозабора в неограниченном пласте, определяемая по формуле (6). При $\frac{\pi x_A}{l} < 0{,}5$

$$\operatorname{arth} \frac{\pi x_A}{l} \sim \frac{\pi x_A}{l} \text{ или } y_A \approx x_A.$$

При $\frac{\pi x_A}{l} > 0{,}5$

$$\operatorname{arth} \frac{\pi x_A}{l} > \frac{\pi x_A}{l}.$$

Умножив обе части этого неравенства на $\frac{l}{\pi}$, получим

$$\frac{l}{\pi} \operatorname{arth} \frac{\pi x_A}{l} > x_A \text{ или } y_A > x_A.$$

В общем случае $y_A \geqslant x_A$.

Легко показать, что при $\frac{\pi x}{l} < 0{,}5$ и $\frac{\pi y}{l} < 0{,}5$ течение к водозабору близко к плоско-радиальному и линии тока характеризуются уравнением $y = \alpha x$. При $\frac{\pi y}{l} > 1{,}6$ течение плоско-параллельное, прямолинейное и линии тока имеют вид параллельных оси y прямых линий, уравнение которых $x = \alpha_1$, где

$$\alpha_1 = \frac{4l\alpha - lq}{4lv_e - q} = \text{const}.$$

При значении $y > 0{,}5$ скорость течения v равна

$$v = \frac{q}{2l} + v_e. \tag{46}$$

Если в пласте-полосе имеется внутренний контур постоянного напора (река), то комплексный потенциал течения записывается в виде (естественный поток направлен от реки) [40]

$$F(z) = \frac{q}{2\pi} \ln \frac{\sin \frac{\pi (z - id)}{l}}{\sin \frac{\pi (z + id)}{l}} + iv_e z + \text{const}, \tag{47}$$

где d — расстояние от скважины до линии $H = \text{const}$ (рис. 12). Из (47) получаем уравнение линий тока

$$\frac{\left[\operatorname{th} \frac{\pi (y - d)}{l} - \operatorname{th} \frac{\pi (y + d)}{l}\right] \operatorname{tg} \frac{\pi x}{l}}{\operatorname{tg}^2 \frac{\pi x}{l} - \operatorname{th} \frac{\pi (y - d)}{l} \operatorname{th} \frac{\pi (y + d)}{l}} = \operatorname{tg} \frac{2\pi}{q} (\alpha - v_e x), \tag{48}$$

где α — const. Характер линий тока показан на рис. 12, *б*.

Как и в предыдущем случае, в фильтрационном потоке формируется область питания, ограниченная нейтральной линией тока.

Координата лежащей на оси y точки перегиба нейтральной линии тока равна

$$y_A = \frac{l}{2\pi} \operatorname{arch}\left(\frac{q}{lv_e} \operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l} + \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l}\right). \qquad (49)$$

Выполненные расчеты показывают, что точка перегиба находится сравнительно близко от скважины. Так, при $l = 2000$ м,

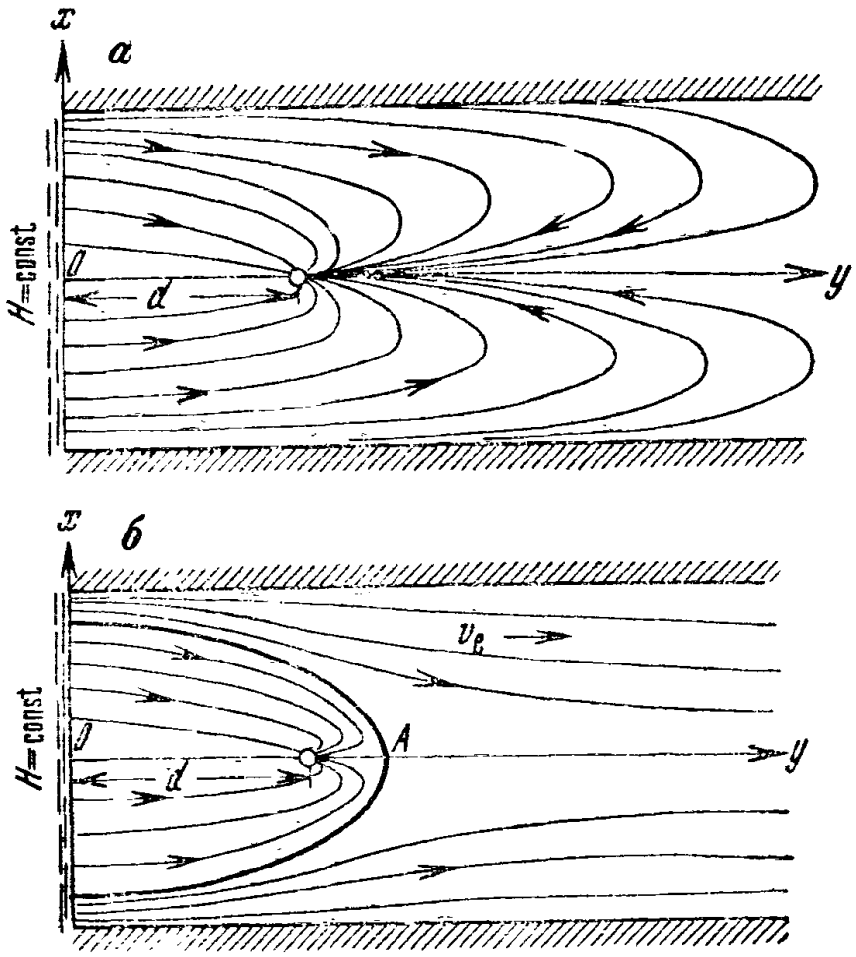


Рис. 12. Схема линий тока в пласте-полосе с внутренним контуром постоянного напора в условиях бассейна *а* и потока *б*

$q = 100$ м²/сут, $v_e = 0{,}04$ м/сут, $d = 3000$ м удаление точки перегиба от скважины составляет всего ~350 м.

Длина области питания возрастает с уменьшением естественной скорости движения подземных вод и с увеличением дебита водозабора, но рост этот происходит медленно. Расстояние от точки перегиба до скважины заметно возрастает с увеличением расстояния d от скважины до контура постоянного напора. Зависимость (49) можно упростить, придав ей более удобную для практического пользования форму. Выражая ареакосинус гиперболический через логарифм, получим

$$y_A \approx d + \frac{l}{2\pi} \ln\left(\frac{q}{lv_e} + 1\right). \qquad (50)$$

Скорость движения частиц жидкости вдоль главной линии тока (оси y) равна

$$|v_{y\,(x=0)}| = \frac{q}{l} \cdot \frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi y}{l} - \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l}} - v_e. \tag{51}$$

При $l \to \infty$ выражение (51) переходит в соответствующую формулу для скорости в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора

$$\lim_{l\to\infty} v_y = \lim_{l\to\infty} q \frac{\frac{1}{l}\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi y}{l} - \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l}} - v_e = q \lim_{l\to\infty} \frac{\varphi_1(l)}{\varphi_2(l)} - v_e =$$

$$= q \lim_{l\to\infty} \frac{\varphi_1'(l)}{\varphi_2'(l)} - v_e = \frac{q}{2\pi} \lim_{l\to\infty} \frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l} + \frac{2\pi d}{l}\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l}}{y \operatorname{sh}\frac{2\pi y}{l} - d \operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}} - v_e =$$

$$= \frac{q}{2\pi} \lim_{l\to\infty} \frac{\psi_1(l)}{\psi_2(l)} - v_e = \frac{q}{2\pi} \lim_{l\to\infty} \frac{\psi_1'(l)}{\psi_2'(l)} - v_e = \frac{qd}{\pi} \frac{1}{y^2 - d^2} - v_e,$$

т. е. получаем выражение для скорости фильтрации в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора.

Если естественный поток подземных вод направлен в сторону контура постоянного напора, то в определенных условиях точка перегиба формируется между водозабором и контуром.

Составляющая скорости фильтрации вдоль главной линии тока (оси y) характеризуется зависимостью

$$v_y = \frac{q}{l} \cdot \frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} - \operatorname{ch}\frac{2\pi y}{l}} - v_e. \tag{52}$$

Значение v_y на контуре постоянного напора равно

$$v_{0y} = \frac{q}{l} - v_e. \tag{53}$$

Положение водораздельной точки находится из условия $v_y = 0$ и определяется по формуле

$$y_A = \frac{l}{2\pi} \operatorname{Arch}\left(\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} - \frac{q}{v_e l}\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}\right). \tag{54}$$

Водораздельная точка между водозабором и контуром постоянного напора, в которой происходит разгрузка подземных вод, может существовать только при определенном значении дебита

водозабора. Это предельное значение дебита ($q_{пр}$) может быть найдено из (54). Так как $\operatorname{ch} x > 1$, то

$$\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} - \frac{q}{v_e l}\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l} \geqslant 1.$$

Отсюда находим

$$q_{пр} \leqslant \frac{v_e l\left(\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} - 1\right)}{\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}}. \qquad (55)$$

При небольшой ширине пласта-полосы, когда $\frac{2\pi d}{l} > 2$, имеем $\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} \gg 1$ и $\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{l} \approx \operatorname{sh}\frac{2\pi d}{l}$. Для этих условий выражение (56) принимает вид

$$q_{пр} \leqslant v_e l. \qquad (56)$$

Выражение (54) может быть упрощено. Используя зависимость между arch и натуральным логарифмом для достаточно больших значений $\frac{2\pi d}{l}$ $\left(\frac{2\pi d}{l} > 2\right)$, получим

$$y_A = d + \frac{l}{2\pi}\ln\left(1 - \frac{q}{v_e l}\right). \qquad (57)$$

Так как водораздельная точка формируется при условии (56), то подлогарифменное выражение в формуле (57) всегда положительно.

В заключение отметим, что схема пласта-полосы с непроницаемыми границами в гидродинамическом отношении эквивалентна схеме неограниченного линейного ряда скважин, поскольку отдельную ячейку такого ряда можно рассматривать как полосу с непроницаемыми границами. Поэтому все приведенные выше формулы для пласта-полосы с непроницаемыми границами действительны и для неограниченного линейного ряда скважин. Последующее рассмотрение вопроса о подтягивании соленых вод к линейному ряду скважин (см. гл. IV) основывается на проработках для пласта-полосы.

ГЛАВА IV

ПРОГНОЗ ВРЕМЕНИ ПОДТЯГИВАНИЯ СОЛЕНЫХ ВОД К ВОДОЗАБОРУ ПО ПЛАСТУ

НЕОГРАНИЧЕННЫЙ ПО ПЛОЩАДИ ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ

Одиночный водозабор

Водозабор работает с постоянным дебитом Q. Естественное движение подземных вод характеризуется средней скоростью фильтрации v_e. Рассмотрим сначала условия, близкие к стационарному режиму фильтрации.

Схема линий тока приведена на рис. 4, главная линия тока — ось x. Для расчета времени движения частиц жидкости к водозабору вдоль любой линии тока внутри области питания получена следующая зависимость

$$t = \pm \frac{n_0}{v_e}\left(x_1 - x_A \ln\left|\cos\frac{y_1}{x_A} + \frac{x_1}{y_1}\sin\frac{y_1}{x_A}\right|\right), \qquad (1)$$

где x_1 и y_1 — координаты начального положения частиц жидкости; x_A определяется по формуле (6) главы III. Знак + или — берется соответственно при движении по потоку или против потока; в последнем случае абсцисса x_1 имеет отрицательное значение. На рис. 13 приведен построенный на основе формулы график зависимости

$$\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{y}),$$

где

$$\bar{t} = \frac{tv_e}{n_0 x_A}, \quad \bar{x} = \frac{x}{x_A}, \quad \bar{y} = \frac{y}{x_A}.$$

Отметим, что внутри области питания водозабора абсцисса x изменяется от $-x_A$ до ∞ и соответственно величина x меняется от — 1 до ∞; значения y, а следовательно и $\bar{y}$, ограничены шириной области питания (y_0), которая в интервале $(-x_A, 0)$ изменяется от 0 до $\frac{q}{4v_e}$, а при $x > 0$ — от $\frac{q}{4v_e}$ до $\frac{q}{2v_e}$. График зависимости $\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{y})$ может быть использован для расчетов времени продвижения соленых вод к водозабору.

Наиболее быстро частицы жидкости, а следовательно, и соленые воды перемещаются вдоль главной линии тока (оси x). Время (T) поступления к водозабору первых порций соленой воды определяется по известной формуле Тейса

$$T = \pm \frac{n_0}{v_e}\left[x_1 - x_A \ln\left(\frac{x_1}{x_A} + 1\right)\right], \qquad (2)$$

где x_1 — начальное положение частиц жидкости (границы соленых вод); знак $\pm$ принимается, как и в формуле (1). Формула (2)

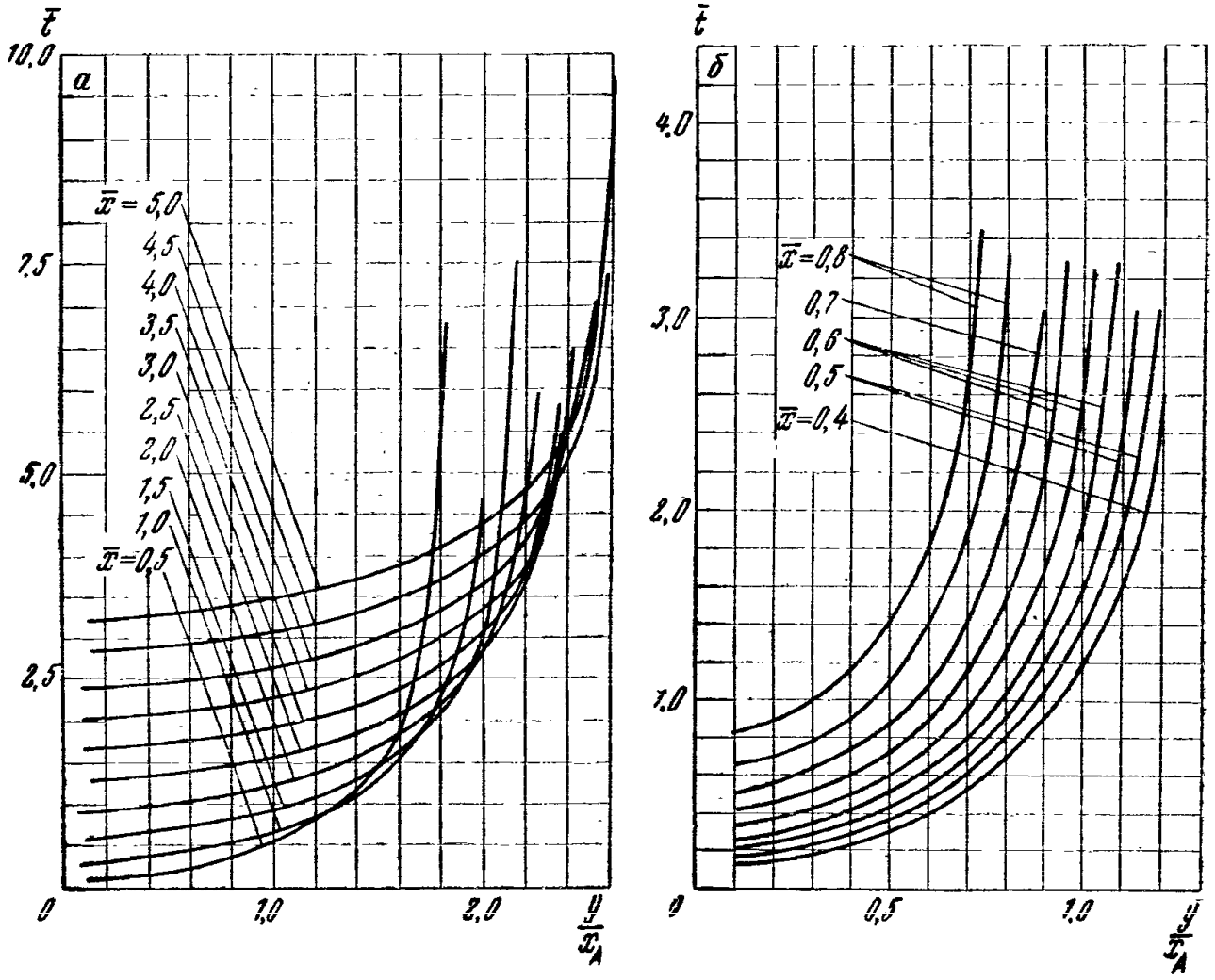


Рис. 13. График зависимости $\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{y})$ для определения времени движения соленых вод по разным линиям тока к водозабору в неограниченном пласте в условиях потока

а — для значений $\bar{x} > 0$; *б* — для значений $\bar{x} < 0$

как частный случай движения вдоль главной линии тока может быть выведена из общего выражения (1) предельным переходом при $y \to 0$.

Таким образом, минимальное время, за которое соленые воды подтянутся к водозабору по кратчайшему расстоянию, т. е. время начала подсасывания соленых вод, определяется по формуле (2).

В табл. 4 приведены величины отношений $\frac{t}{T_A}$ для разных $\bar{x} = \frac{x}{x_A}$ и $\bar{y} = \frac{y}{x_A}$.

Таблица 4

Величина $\frac{t}{T}$

$\bar{x}$	$\bar{y}$						
	0,1	0,3	0,5	0,7	1,0	1,2	1,5
0,4	1,1	1,6	2,7	4,4	8,4	12,5	23,5
0,8	1,0	1,4	1,5	1,8	2,9	3,8	5,7
1,0	1,0	1,1	1,3	1,6	2,2	2,8	4,3
2,0	1,0	1,03	1,1	1,15	1,3	1,5	1,8
3,0	1,0	1,0	1,0	1,03	1,07	1,1	1,17

Из табл. 4 видно, что при малых значениях $\bar{x}$ ($\bar{x} < 1$) отношение $\frac{t}{T}$ существенно изменяется с изменением $\bar{y}$. Наоборот, при больших значениях $\bar{x}$ ($\bar{x} > 3 \div 4$) отношение $\frac{t}{T}$ практически не зависит от $\bar{y}$ и близко к 1, что хорошо согласуется с рассмотренной выше (см. гл. III) общей структурой потока к водозабору в неограниченном пласте. Следовательно, для определения времени перемещения соленых вод к водозабору по направлению естественного течения вдоль любой линии тока с расстояния $x_1 > 3{,}5\, x_A$ можно вместо формулы (1) использовать более простую формулу (2).

Время поступления к водозабору первых порций соленой воды определяется в зависимости от положения границы соленых вод внутри области питания следующим образом. Если граница раздела перпендикулярна главной линии тока (оси x), то время подтягивания соленых вод к водозабору рассчитывается по формуле (2). Если граница раздела расположена под углом к главной линии тока, то время поступления первых порций соленой воды находится путем расчетов по формулам (1) и (2) времени продвижения к водозабору отдельных частиц этой границы. Так, для положения границы соленых вод, указанного на рис. 14, *е*, по формуле (1) или с помощью графика $\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{y})$ рассчитывается время продвижения к водозабору частиц 1, 2 и 3 границы соленых вод и по формуле (2) — время движения частиц 4; координаты (x, y) этих частиц снимаются непосредственно с чертежа (карты, схемы). Из сопоставления t_1, t_2, t_3, t_4 и т. д. находится минимальное время, соответствующее времени подтягивания к водозабору первых порций соленых вод.

В условиях бассейна ($v_e = 0$) время перемещения соленых вод к водозабору по кратчайшему расстоянию от начального положения x_1 определяется по формуле

$$T = \frac{\pi n_0 h x_1^2}{Q}. \qquad (3)$$

Приближенным критерием перехода от условий потока к условиям бассейна является формула (8) главы III. Если естественная скорость фильтрации подземных вод v_e, расстояние фиксированной точки от водозабора x_1 и дебит водозабора Q таковы, что это соотношение соблюдается, то расчет времени движения соленых вод к водозабору можно производить по формуле (3). Максимальная относительная погрешность расчетов при этом не превысит 15—20%.

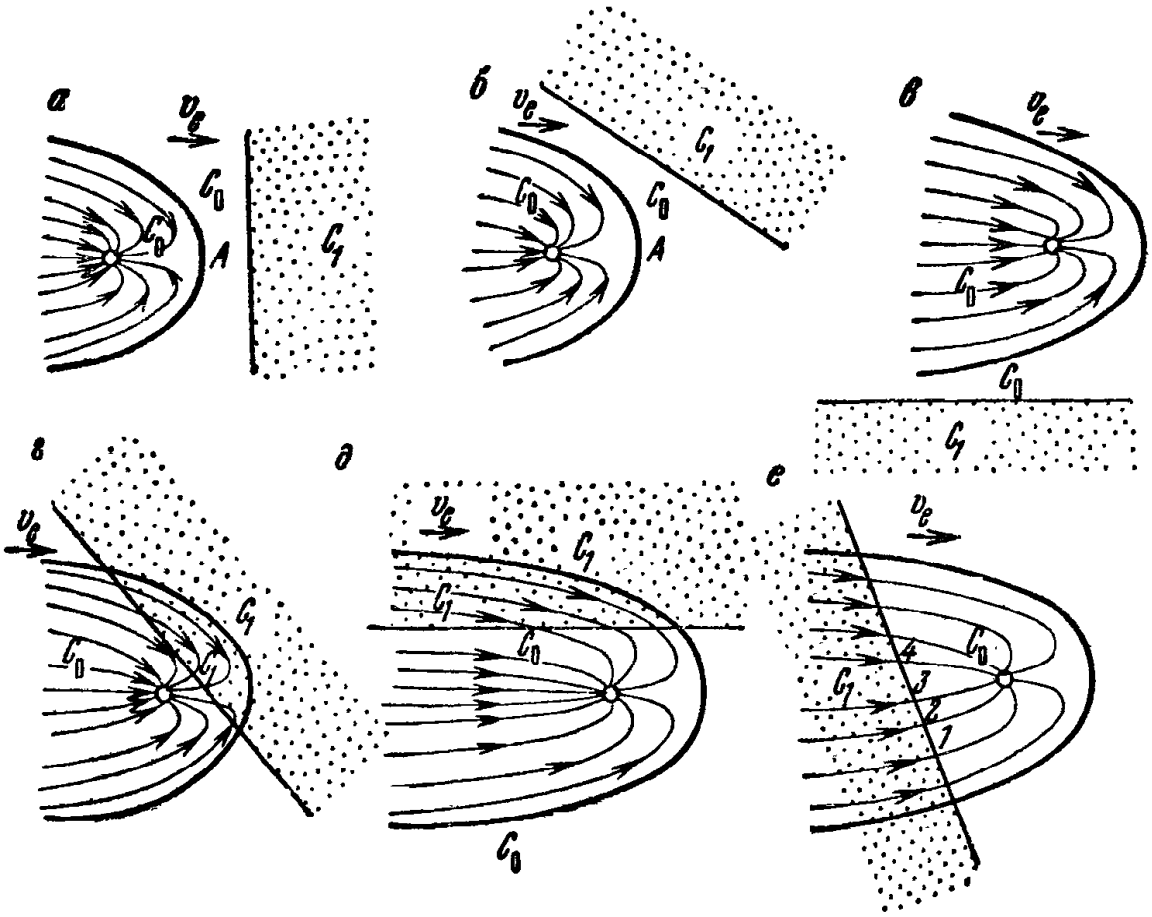


Рис. 14. Условия подтягивания соленых вод к водозабору

а, б, в — соленые воды вне области питания водозабора, не происходит их подтягивания; *г, д, е* — соленые воды внутри области питания водозабора, происходит их подтягивание

При неустановившемся режиме фильтрации действительная скорость движения подземных вод к водозабору в условиях бассейна равна

$$v_д = \frac{Q}{2\pi n_0 h r} e^{-\frac{r^2}{4at}}, \qquad (4)$$

где a — коэффициент пьезопроводности (или уровнепроводности). При больших значениях t величина $e^{-\frac{r^2}{4at}} \to 1$, и формула (4) переходит в формулу (3) главы III для скорости движения при установившейся фильтрации. Практически такой переход возможен при $\frac{r^2}{4at} < 0{,}1$. Согласно Н. Н. Веригину [19] и В. М. Шестакову [78], выражение для времени перемещения соленых вод

к водозабору при неустановившейся фильтрации может быть представлено в виде

$$t = \frac{r_1^2 - r_2^2}{4\alpha_a a}, \qquad (5)$$

где параметр α_a определяется из трансцендентного уравнения

$$\alpha_a e^{\alpha_a} = A, \quad A = \frac{Q}{4\pi n_0 a h}. \qquad (6)$$

Для определения величины α_a можно использовать график зависимости $A = f(\alpha_a)$, приведенный на рис. 15. По известному значению A из графика находится соответствующая ему величина α_0.

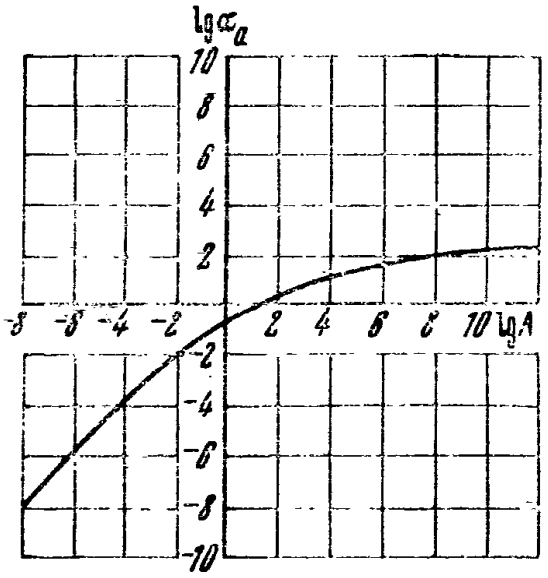


Рис. 15. График зависимости $A = f(\alpha_a)$ (по Ф. М. Бочеверу и В. М. Шестакову)

При малых значениях α_a ($\alpha_a < 0{,}05$) величина $e^{\alpha_a} \approx 1$, и выражение (5) приводится к формуле (3) для условий установившегося движения. Расхождение в величинах времени продвижения соленых вод к водозабору, рассчитанных по формулам (5) и (3), зависит прежде всего от a и x: расхождение возрастает с уменьшением коэффициента пьезопроводности и с увеличением расстояния x границы соленых вод от водозабора. Для $a \geqslant 10^3$ м^2/сут и $x \leqslant 15$ км максимальная относительная величина этого различия не превышает 13—17%, при этом время продвижения соленых вод в условиях установившегося режима фильтрации всегда меньше времени продвижения в условиях неустановившейся фильтрации.

Взаимодействующие скважины

Круговая батарея скважин

Рассмотрим круговую батарею скважин радиусом R, состоящую из n скважин; производительность отдельной скважины Q_0. Характер движения подземных вод к батарее в условиях бассейна показан на рис. 16. Быстрее всего частицы жидкости перемещаются вдоль главной линии тока MN. Начало прорыва соленой воды к водозабору определяется временем движения ее вдоль главной линии тока. В. Н. Щелкачевым [80] получено выражение, позволяющее рассчитать время перемещения частиц жидкости вдоль главной линии тока от начального положения до кольцевой батареи для условий стационарного режима

$$t = \frac{\pi h n_0}{n Q_0}\left[(r_1^2 - R^2) - \frac{2R^n}{n-2}\left(\frac{1}{R^{n-2}} - \frac{1}{r_1^{n-2}}\right)\right], \qquad (7)$$

где r_1 отсчитывается от центра кольцевой батареи. Для удобства расчетов выражение (7) можно представить в виде

$$t = \frac{\pi h n_0 R^2}{n Q_0}\left(\bar{r}_1^2 - 1 - \frac{2}{n-2} + \frac{2}{(n-2)\,\bar{r}_1^{n-2}}\right), \quad \bar{r}_1 = \frac{r_1}{R}. \qquad (8)$$

При $\bar{r}_1 \geqslant 3$ и $n \geqslant 4$ последним слагаемым в скобках формулы (8) можно пренебречь и тогда получим

$$t = \frac{\pi h n_0 R^2}{n Q_0}\left(\bar{r}_1^2 - 1 - \frac{2}{n-2}\right). \qquad (9)$$

При $\bar{r}_1 > 5$ и $n \geqslant 10$ результаты расчетов по формуле (9) практически не отличаются от полученных по формуле (3) для эквивалентного одиночного водозабора с расходом, равным расходу

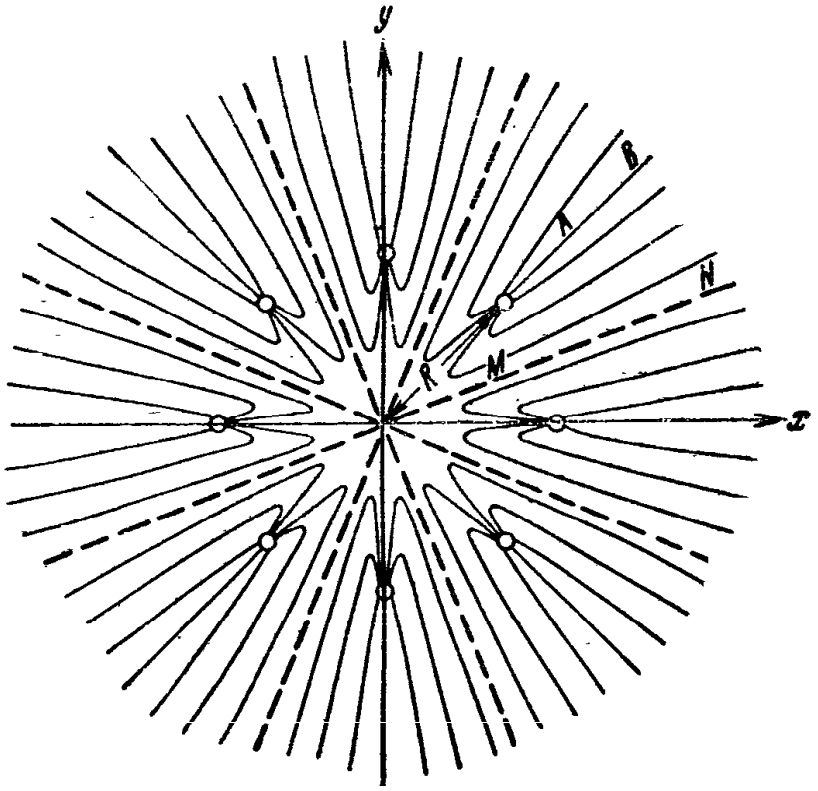


Рис. 16. Схема линий тока к кольцевой батарее скважин в неограниченном пласте

кольцевой батареи, погрешность составляет менее 5%; при $\bar{r}_1 < 5$ и $n < 10$ погрешность возрастает до 7 ÷ 10%.

В общем случае время продвижения соленых вод к кольцевой батарее меньше, чем время движения к «эквивалентному» водозабору до отметки R, но это различие во времени, как правило, незначительно. Так, если $r_1 = 3000$ м, $n = 5$, $Q_0 = 4000$ м³/сут, $h = 30$ и $n_0 = 0{,}1$, то время продвижения соленых вод к батарее, определенное по формуле (9), составит: при $R = 300$ м $t = 4160$ сут, при $R = 500$ м $t = 4000$ сут и при $R = 1000$ м $t = 3450$ сут. Время движения соленых вод от начальной отметки $r_1 = 3000$ м до конечных отметок 300, 500 и 1000 м, вычисленное по формуле

(3) с $Q = 20$ тыс. м³/сут, составило 4210, 4120 и 3770 сут. Результаты этих расчетов достаточно хорошо согласуются со сделанными выше выводами.

Неограниченный линейный ряд скважин

Если длина ряда в 5—6 раз больше расстояния до параллельной ему границы соленых вод, то такой ряд при расчетах времени подтягивания соленых вод можно рассматривать как бесконечный.

Рассмотрим неограниченный линейный ряд скважин в условиях естественного потока, направленного перпендикулярно к линии ряда вдоль оси y. Расстояние между скважинами σ, дебит отдельной скважины Q_0. Область питания линейного ряда определяется размерами области питания отдельной скважины ряда, длина которой (расстояние от скважины вниз по потоку до водораздельной точки A) находится по формуле (43). Схема линий тока к неограниченному линейному ряду (его отдельной ячейке) представлена на рис. 9, *б*; главная линия тока — ось y. Граница соленых вод предполагается параллельной ряду, она может быть расположена вверх или вниз по потоку от ряда.

Для условий стационарного режима фильтрации нами получено решение для времени движения частиц жидкости по главной линии тока от начального положения y_1 до линии ряда ($y = 0$)

$$|t| = \frac{2\sigma^2 q_0 n_0}{\pi\left(q_0^2 - 4\sigma^2 v_e^2\right)}\left[\ln\left|\left(1 - \frac{2\sigma v_e}{q_0}\,\mathrm{th}\,\frac{\pi y_1}{\sigma}\right)\mathrm{ch}\,\frac{\pi y_1}{\sigma}\right| - \right.$$

$$\left. - \frac{\sigma v_e}{q_0}\ln\left|\frac{1 - \mathrm{th}\,\frac{\pi y_1}{\sigma}}{1 + \mathrm{th}\,\frac{\pi y_1}{\sigma}}\right|\right], \qquad (10)$$

где $q_0 = \frac{Q_0}{h}$; время t берется по абсолютной величине.

Если рассчитывается время движения в направлении по потоку, то значение y_1 положительное, если в направлении против потока (со стороны водораздельной точки) — отрицательное.

Следует отметить, что использование точной формулы (10) представляет некоторые сложности технического характера, связанные с вычислением логарифмов от малых величин. Для удобства практических расчетов формулу (10) можно значительно упростить, используя рассмотренные выше (см. главу III) особенности структуры фильтрационного потока к водозабору в пласте-полосе или, что то же, к неограниченному линейному ряду скважин. Как было установлено, при $y > 0{,}5\,\sigma$ движение подземных вод плоско-параллельное, прямолинейное с постоянной скоростью, определяемой формулой (46). Вследствие этого время дви-

частиц жидкости в области $y > 0{,}5\,\sigma$ может быть вычислено по формуле

$$t = \frac{n_0 \Delta y}{\frac{q_0}{2\sigma} + v_e}, \qquad (11)$$

где Δy — длина пути движения. Вблизи скважины ряда на отметках $y < 0{,}5\,\sigma$ движение подземных вод обусловлено преимущественно действием именно этой скважины и в значительно меньшей степени влиянием соседних скважин ряда. Поэтому время движения подземных вод к ряду в области $y < 0{,}5\,\sigma$ приближенно может быть вычислено по формуле (3) для одиночного водозабора.

«Склеивая» формулы (11) и (12) на отметке $y = 0{,}5\,\sigma$, получаем приближенную зависимость для времени движения подземных вод к неограниченному линейному ряду скважин по направлению естественного потока

$$t = \frac{n_0}{v_e}\left[0{,}5\sigma - x_A \ln\left(\frac{\sigma}{2x_A} + 1\right) + \frac{2(y_1 - 0{,}5\sigma)\,\sigma v_e}{q_0 + 2\sigma v_e}\right], \qquad (12)$$

где y_1 — начальная отметка частиц жидкости.

Сравнение расчетов, выполненных по формулам (12) и (10), показало, что относительная погрешность приближенных расчетов по формуле (12) не превышает $5 \div 7\%$; при значительных удалениях границы соленых вод от водозабора ($y_1 > 2 \div 3$ км) и небольших расстояниях между скважинами в ряду ($\sigma \leqslant 200 \div 300$ м) эта погрешность снижается до $2 \div 3\%$.

Таким образом, для практических расчетов времени движения соленых вод к ряду по направлению естественного потока можно использовать формулу (12).

Ориентировочная оценка времени движения частиц жидкости к ряду (с запасом «прочности») производится по формуле (11), в которой Δy принимается равным расстоянию y_1 до линии ряда. При больших расстояниях ($y_1 > 10\sigma$) расчеты по формуле (11) незначительно отличаются от результатов вычислений по формуле (12).

Итак, если граница соленых вод расположена вверх по потоку от линейного ряда большой длины, то время подтягивания соленых вод к водозабору рассчитывается по формулам (12) и (11). Если граница соленых вод расположена вниз по потоку от ряда и захватывается его областью питания, то время продвижения соленых вод к водозабору определяется по формуле (10); если же граница соленых вод не захватывается областью питания ряда, то подтягивания соленых вод вообще не произойдет.

Для условий бассейна ($v_0 = 0$) время движения соленых вод к ряду вдоль главной линии тока (оси y) от начального положения y_1 определяется по формуле

$$t = \frac{2n_0\sigma^2}{q_0\pi} \ln \operatorname{ch} \frac{\pi y_1}{\sigma}. \qquad (13)$$

При $\frac{y_1}{\sigma} \geqslant 2{,}5$ выражение (13) может быть заменено приближенной зависимостью

$$t = \frac{2n_0\sigma y_1}{q_0}. \qquad (14)$$

Погрешность расчетов t по формуле (14) в сравнении с (13) не превышает $7 \div 9\%$.

Для оценки влияния естественного потока на время перемещения соленых вод к линейному ряду были выполнены расчеты по формулам (10) и (13) при следующих значениях исходных параметров: $q_0 = 10$, 50 и 100 м²/сут, $v_e = 0{,}005$ и 0,05 м/сут, $\sigma =$ $= 200$ и 500 м, $n_0 = 0{,}1$ и $\frac{y_1}{\sigma} = 2$, 10 и 25.

Численный анализ показал:

1) влияние естественного потока в целом весьма значительно, особенно при малых дебитах скважин ряда ($q_0 < 10$ м²/сут) и перемещении границы соленых вод на большие расстояния $\left(\frac{y_1}{\sigma} > 10\right)$; 2) отношение времени $t_п$ и $t_Б$, рассчитанных соответственно по формулам для потока (10) и бассейна (13) при $\sigma = 500$ м, $q_0 = 10$ м²/сут и $\frac{y_1}{\sigma} > 10$, составляет: $\frac{t_Б}{t_п} \approx 1{,}5$ (для $v_e =$ $= 0{,}005$ м/сут) и $\frac{t_Б}{t_п} \approx 6$ (для $v_e = 0{,}05$ м/сут); 3) влияние естественного потока убывает с уменьшением расстояния между скважинами; при $\sigma = 200$ и тех же q_0 и $\frac{y_1}{\sigma}$ отношение $\frac{t_Б}{t_п} \approx 1{,}2$ (при $v_e = 0{,}005$ м/сут) и $\approx 3{,}0$ (при $v_e = 0{,}005$ м/сут); 4) при $v_e < 0{,}005$ м/сут, $\sigma < 200$ м и $\frac{y_1}{\sigma} < 10$ влияние естественного потока значительно меньше (особенно при больших дебитах скважин ряда); относительные расхождения в величинах времени $t_Б$ и $t_п$ не превышают $12 \div 15\%$ и в этом случае время продвижения соленых вод к водозабору рассчитывается по формулам (13) и (14) для условий бассейна.

При неустановившемся движении скорость перемещения частиц жидкости по линии, перпендикулярной к ряду, в направлении естественного потока выражается зависимостью

$$v = \frac{q_0}{2n_0\sigma} \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \frac{v_e}{n_0}, \qquad (15)$$

где $q_0 = \frac{Q_0}{h}$; a — коэффициент пьезопроводности; $\operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) =$ $= 1 - Ф\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right)$; Ф — интеграл вероятности; график функции

Ф приводится в [13, 14]. При $\frac{y}{2\sqrt{at}} < 0{,}1$ функция $\Phi \approx 0$ и скорость близка к скорости стационарного режима фильтрации. Для этих условий время продвижения соленых вод определяется по формулам (12) или (11).

Прогноз перемещения фронта соленых вод с использованием формулы (15) производится следующим образом. Пусть граница соленых вод расположена параллельно ряду и на расстоянии y_1 от него. Делят время на несколько одинаковых временных отрезков (полгода, год). По формуле (15) вычисляют скорость v_1 в точке y_1 на конец первого временно́го отрезка (полугодия) Δt от начала работы водозабора. Определяют перемещение Δy_1 частиц за промежуток времени Δt

$$\Delta y_1 = v_1 \Delta t.$$

Вычисляют скорость v_2 в точке $y_1 - \Delta y_1$ на конец второго промежутка времени после начала работы водозабора, т. е. на конец года, и определяют перемещение за второе полугодие

$$\Delta y_2 = v_2 \Delta t.$$

Затем вычисляют скорость v_3 в точке $y_1 - \Delta y_1 - \Delta y_2$ на конец третьего промежутка времени (полугодия) от начала работы водозабора, т. е. через полтора года, и определяют перемещение за третий промежуток времени и т. д.

Линейный ряд скважин ограниченной длины

Рассмотрим линейный ряд скважин длиной $2l$; ось y проходит по линии ряда, ось x — через его середину (рис. 17). В расчетах ограниченный линейный ряд скважин обычно заменяется равновеликой по длине и равнодебитной галереей. Формулы для скорости фильтрации получаются путем дифференцирования выражений для напора.

Если водозабор расположен перпендикулярно к естественному потоку подземных вод, то составляющая скорости движения подземных вод по оси x

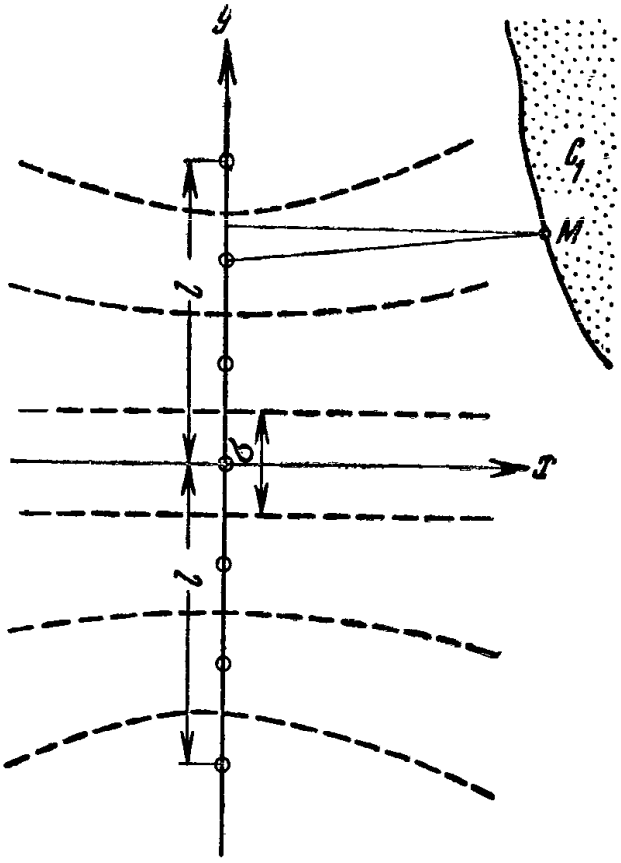


Рис. 17. Схема линий тока к ряду ограниченной длины

(скорость v_x) описывается следующей зависимостью [50]:

$$v_x = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi n_0 lh}\left(\operatorname{arctg}\frac{y+l}{x} - \operatorname{arctg}\frac{y-l}{x}\right) \pm \frac{v_e}{n_0}, \qquad (16)$$

где $Q_{\text{сум}}$ — суммарный дебит водозабора (линейного ряда). Знак + или — перед вторым слагаемым в формуле (16) берется в зависимости от того, находятся фиксированные частицы выше или ниже по потоку от ряда.

Скорость движения частиц по главной линии тока (оси x) равна

$$v_{x0} = \frac{Q_{\text{сум}}}{2\pi n_0 lh}\operatorname{arctg}\frac{l}{x} \pm \frac{v_e}{n_0}. \qquad (16а)$$

Если естественный расход подземных вод незначителен и им можно пренебречь, то в формулах (16) и (16а) второе слагаемое принимается равным нулю.

Скорость в точках оси y за пределами ряда для условий бассейна равна [50]:

$$v_y = \frac{Q_{\text{сум}}}{4\pi n_0 lh}\ln\frac{y+l}{y-l}. \qquad (17)$$

При наличии естественного потока подземных вод, направленного вдоль ряда (по оси y), к скорости v_y, характеризуемой формулой (17), прибавляется или вычитается скорость естественного потока в зависимости от того, совпадает или не совпадает его направление с направлением движения соленых вод к водозабору.

Сравним скорость v_x и v_y для ряда ограниченной длины со скоростью для равновеликого ему по дебиту одиночного водозабора и со скоростью для бесконечного ряда. С целью упрощения расчетов выполним их для условий бассейна.

Отношение скоростей $\frac{v}{v_{x0}}$ и $\frac{v}{v_y}$, где v — скорость одиночного водозабора, определяемая по формуле (3) главы III, имеет вид

$$\frac{v}{v_{x0}} = \frac{l}{x}\cdot\frac{1}{\operatorname{arctg}\frac{l}{x}}, \quad \frac{v}{v_y} = \frac{l}{y}\cdot\frac{2}{\ln\frac{1+l/y}{1-l/y}}. \qquad (18)$$

Ниже приведены результаты расчетов по формулам (18).

Зависимость $\frac{v}{v_{x0}}$ от $\frac{l}{x}$

$\frac{l}{x}$	5,0	3,0	2,0	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1
$\frac{v}{v_{x0}}$	3,6	2,4	1,9	1,3	1,15	1,08	1,03	1.0

Зависимость $\frac{v}{v_y}$ от $\frac{l}{y}$

$\frac{l}{y}$	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,2	0,1	0,05
$\frac{v}{v_y}$	0,61	0,73	0,81	0,91	0,97	0,99	1,0	1,0

Из этих расчетов следует:

1) отношение $\frac{v}{v_{x0}}$ в общем случае больше 1, а $\frac{v}{v_y}$ меньше 1;

2) при $\frac{l}{x} < 0{,}5$ и $\frac{l}{y} < 0{,}5$, т. е. на расстояниях от середины ряда и на расстояниях от конца ряда, превышающих его длину, отношения $\frac{v}{v_{x0}}$ и $\frac{v}{v_y}$ близки к 1.

Сравним скорость для ряда ограниченной длины со скоростью для неограниченного ряда. С этой целью выражение (16а) несколько преобразуем

$$v_{x0} = \frac{Q_0 n}{\pi n_0 \sigma (n-1) h} \operatorname{arctg} \frac{\sigma (n-1)}{2x},$$

где n — число скважин в ряду, Q_0 — дебит отдельной скважины (предполагается, что дебиты скважин одинаковы), σ — расстояние между скважинами и $\sigma (n-1) = 2l$.

Отношение $\frac{v_н}{v_{x0}}$, где $v_н$ скорость в случае неограниченного линейного ряда скважин, вычисляемая по формуле (38) главы III, имеет вид

$$\frac{v_н}{v_{x0}} = \frac{\pi n \operatorname{sh} \frac{2\pi x}{\sigma}}{2(n-1)\left(\operatorname{ch} \frac{2\pi x}{\sigma} - 1\right) \operatorname{arctg} \frac{\sigma (n-1)}{2x}}. \qquad (19)$$

Расчеты $\frac{v_н}{v_{x0}}$ для $\sigma = 200$ и 400 м, $n = 7$, 10, 15 и 30, $x = 500$, 1000, 2000 и 3000 м приведены в табл. 5.

Таблица 5

Расчет отношения скоростей $\frac{v_н}{v_{x0}}$ для ряда ограниченной и неограниченной длины

x, м	$\sigma = 200$ м				$\sigma = 400$ м			
	7	10	15	30	7	10	15	30
500	2,06	1,63	1,37	1,14	1,55	1,34	1,2	1,1
1000	3,4	2,37	1,77	1,3	2,19	1,63	1,37	1,16
2000	6,3	3,7	2,76	1,67	3,4	2,37	1,77	1,32
3000	9,34	6,0	3,85	2,1	4,82	3,22	2,24	1,48

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы: 1) отношение $\frac{v_н}{v_{x0}}$ в целом значительно превышает 1, особенно при небольших значениях n и σ ($n \leqslant 10 \div 15$ и $\sigma \leqslant 200$ м) и больших расстояниях границы соленых вод от ряда; 2) с увеличением числа скважин в ряду ($n > 20 \div 30$) и расстояния между скважинами ($\sigma > 300 \div 400$ м) отношение $\frac{v_н}{v_{x0}}$ приближается к 1 и на расстояниях $x < 2000$ м отличается от 1 с максимальной погрешностью не более $10 \div 15\%$.

Расчеты времени перемещения соленых вод к ограниченному линейному ряду в условиях квазистационарного режима в общем случае производятся с использованием зависимостей (16) и (17) графоаналитическим способом по формуле (6) главы II.

При пользовании формулой (16) главы III необходимо знать путь (траекторию), для которого рассчитывается время продвижения к водозабору фиксированных частиц соленых вод.

Прежде всего отметим, что частицы жидкости при перемещении к водозабору движутся непосредственно к той скважине ряда, в блоке которой они первоначально находились. Под блоком понимается элементарная ячейка ряда в виде полосы шириной σ, в центре которой расположена скважина. В главе III при рассмотрении структуры потока в пласте-полосе (к неограниченному линейному ряду скважин) выделялись такие элементарные блоки, которые в гидродинамическом отношении эквивалентны пласту-полосе с непроницаемыми границами. Если частицы жидкости находятся в пределах какого-то блока, то они, двигаясь к ряду, попадают в скважину именно этого блока. Это положение может быть использовано при обосновании траектории движения частиц жидкости к линейному ряду скважин ограниченной длины, в котором также выделяются единичные блоки. Но в отличие от бесконечного ряда скважин границами этих блоков являются не прямые линии, а кривые, причем их кривизна возрастает по мере удаления от центра ряда (см. рис. 17). Для простоты границы блоков в ряду конечной длины будем также считать прямолинейными. Зная блок, в который попадают частицы жидкости, траекторией ее движения к ряду будем считать прямую, соединяющую начальное положение частиц со скважиной этого блока. Эта прямолинейная траектория по длине очень мало отличается от длины перпендикуляра, опущенного из начального положения частиц жидкости на линию ряда. Покажем это на примере.

Пусть параллельная ряду граница соленых вод удалена от него на 1 км, расстояние между скважинами в ряду 200 м. Максимальное расхождение в длине перпендикуляра и диагонали внутри единичного блока составляет всего 20 м (длина перпендикуляра 1000 м, длина диагонали 1020 м). При криволинейных границах блоков в ряду ограниченной длины это расхождение в длинах диагонали и перпендикуляра будет несколько больше, но в целом

также незначительное. Поэтому в качестве траектории движения каких-либо форсированных частиц соленой воды к линейному ряду скважин ограниченной длины может быть принят перпендикуляр, проведенный из данной точки к линии ряда.

Приближенно время подтягивания соленых вод к линейному ряду ограниченной длины можно оценивать по формулам (2), (3) для одиночного водозабора, по дебиту равновеликого линейному ряду, если границы соленых вод расположены на расстоянии, превышающем длину ряда в 2—3 раза и более. Если же граница соленых вод расположена вблизи ряда на расстоянии меньше его длины, то время подтягивания соленых вод можно рассчитывать по формулам (11), (12) для бесконечного линейного ряда, дебит отдельной скважины которого равен дебиту скважины ограниченного линейного ряда. В обоих случаях расчет времени перемещения соленых вод содержит «запас прочности».

ПОЛУОГРАНИЧЕННЫЙ ПО ПЛОЩАДИ ВОДОНОСНЫЙ ГОРИЗОНТ С КОНТУРОМ ПОСТОЯННОГО НАПОРА

Приводятся и анализируются расчетные зависимости для прогноза времени движения соленых вод к одиночному водозабору и линейному ряду скважин в условиях бассейна и естественного потока подземных вод при наличии совершенной гидравлической взаимосвязи водоносного горизонта с контуром постоянного напора.

Одиночный водозабор

Пусть одиночный водозабор, работающий с постоянным дебитом Q, находится на оси x на расстоянии d от контура постоянного напора (река); ось y совпадает с контуром постоянного напора (см. рис. 6). Структура движения подземных вод к водозабору исследована выше в главе III.

Рассмотрим сначала условия бассейна. Для расчета времени движения частиц жидкости вдоль любой линии тока от начального положения (x_1, y_1) до водозабора $(x = d, y = 0)$ получена следующая зависимость

$$t = \frac{2\pi n_0 d^2}{q}\left[1+\left(\frac{d^2-y_1^2-x_1^2}{2y_1 d}\right)^2\right]\left\{1-\frac{x_1}{d}-\frac{d^2-y_1^2-x_1^2}{2y_1 d}\times\right.$$

$$\left.\times\left[\arcsin\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{d^2-y_1^2-x_1^2}{2y_1 d}\right)^2}}-\arcsin\frac{x_1}{d\sqrt{1+\left(\frac{d^2-y_1^2-x_1^2}{2y_1 d}\right)^2}}\right]\right\}. \quad (20)$$

Время движения по главной линии тока оси x равно

$$T = \frac{\pi n_0 d^2}{3q}\cdot\left[2+\left(\frac{x_1}{d}\right)^3-3\frac{x_1}{d}\right]. \quad (21)$$

Наибольший практический интерес представляет формула (21), позволяющая оценить время наиболее быстрого перемещения соленых вод по кратчайшему пути. Если рассчитывается время подтягивания соленых вод со стороны контура постоянного напора, то $x < d$, если с противоположной стороны, то $x > d$. Со стороны контура постоянного напора движение жидкости к водозабору происходит быстрее, чем с противоположной стороны. Время движения жидкости от линии контура ($x = 0$) до водозабора в 2 раза меньше времени движения на таком же расстоянии до водозабора, но с противоположной стороны ($x = 2d$). Если сравнить время движения частиц жидкости вдоль главной линии в условиях полуограниченного пласта $T_{\text{п. п}}$ с соответствующим временем в условиях неограниченного пласта $T_{\text{н. п}}$, то окажется

$$\frac{T_{\text{п. п}}}{T_{\text{н. п}}} < 1 \text{ при } x < d \text{ и } \frac{T_{\text{п. п}}}{T_{\text{н. п}}} > 1 \text{ при } x > d.$$

В частности, при движении частиц жидкости на расстоянии d от контура постоянного напора до водозабора $\frac{T_{\text{п. п}}}{T_{\text{н. п}}} = 0{,}66$, а при перемещении частиц жидкости на таком же расстоянии к водозабору с противоположной стороны $\frac{T_{\text{п. п}}}{T_{\text{н. п}}} = 1{,}33$.

Таким образом, наличие контура постоянного напора обусловливает неравномерное распределение скоростей в фильтрационном потоке. Вблизи водозабора влияние контура ослабевает и распределение скоростей приближается к неравномерному, как в условиях неограниченного пласта. Как было показано в главе III, вокруг водозабора в радиусе $\sim 0{,}4\,d$ движение жидкости происходит почти так же, как в неограниченном пласте, линии тока близки к радиальным прямым. В пределах этой площади время движения частиц к водозабору в полуограниченном пласте по любой линии тока можно рассчитывать по формуле (3) для неограниченного пласта. Погрешность расчетов при этом будет равна $\pm 3 \div 11\%$. Если в полуограниченном пласте (в условиях бассейна) имеется область соленых вод, то подтягивание последних к водозабору произойдет всегда, если водозабор будет работать неограниченно долгое время. При этом продвижение соленых вод к водозабору со стороны контура постоянного напора будет происходить быстрее, чем с противоположной стороны.

Теперь рассмотрим водозабор в полуограниченном пласте в условиях естественного потока, направленного вдоль оси x. Пусть естественный поток подземных вод направлен от контура постоянного напора (см. рис. 6, *б*). В этих условиях формируется область питания водозабора, размеры которой определяются формулами (24) и (26) главы III.

Время движения частиц жидкости к водозабору вдоль любой линии тока внутри области питания характеризуется выражением

$$t=\frac{n_0}{v_e}\left[x_2-x_1-\int_{y_1}^{y_2}\frac{y+d\operatorname{ctg}\frac{2\pi}{r}(\alpha-v_e y)}{\sqrt{d^2-y^2-2yd\operatorname{ctg}\frac{2\pi}{q}(\alpha-v_e y)}}dy\right], \quad (22)$$

где α — постоянная, определяемая из выражения (17) главы III.

Для расчета времени движения частиц жидкости к водозабору вдоль главной линии тока — оси x получена зависимость

$$T=\frac{n_0}{v_e}\left[(d-x_1)-\frac{x_A^2-d^2}{2x_A}\ln\frac{(x_A+d)\cdot(x_A-x_1)}{(x_A-d)\cdot(x_A+x_1)}\right], \quad (23)$$

где x_1 — исходное положение частиц жидкости внутри области питания (если движение происходит со стороны контура, то $0<x_1<d$; если же с противоположной стороны, то $d<x_1<x_A$); x_A — положение водораздельной точки, определяемой формулой (24) главы III. Так как движение подземных вод к водозабору происходит только внутри его области питания, то формула (23) действительна только для частиц жидкости внутри области питания, т. е. для $x_1<x_A$.

Подлогарифменное выражение в зависимости (23) всегда положительно, так как $x_A>d$ и $x_A>x_1$. Выражение (23) при $v_e=0$ переходит в формулу (21) для полуограниченного бассейна.

Пример. Водозабор расположен на расстоянии 1000 м от реки. Естественный поток подземных вод направлен к реке, $v_e=0{,}01$ м/сут, $n_0=0{,}1$. Рассчитать по формуле (23) время движения частицы жидкости к водозабору с отметок $x_1=300$ м и $x_1=1700$ м, если $q=\frac{Q}{h}=100$ м²/сут.

1) По формуле (24) главы III определим величину x_A

$$x_A=\sqrt{1000^2+\frac{100\cdot1000}{3{,}14\cdot0{,}01}}=2050 \text{ м}.$$

2) Время движения жидкости с отметки $x_1=300$ м

$$T=\frac{0{,}1}{0{,}01}\left[(1000-300)\frac{2050^2-1000^2}{2\cdot1050}\ln\frac{(2050+1000)\cdot(2050-300)}{(2050-1000)\cdot(2050+300)}\right]=$$

$$=1000 \text{ сут}.$$

3) Время движения жидкости с отметки $x_1=1700$ м

$$T=\frac{0{,}1}{0{,}01}\left[(1000-1700)\frac{2050^2-1000^2}{2\cdot1050}\ln\frac{(2050+1000)(2050-1700)}{(2050-1000)(2050+1700)}\right]=$$
$$=3000 \text{ сут}.$$

Для условий бассейна время движения жидкости к водозабору с этих отметок, рассчитанное по формуле (21), составит

для $x_1=300$ м, $T=1180$ сут,

» $x_1=1700$ м, $T=1900$ сут.

Если естественный поток направлен к контуру постоянного напора (реке), то время движения жидкости к водозабору по оси x рассчитывается по формуле

$$T=\frac{n_0}{v_e}\left[\frac{d^2-x_A^2}{x_A}\left(\operatorname{arctg}\frac{d}{x_A}-\operatorname{arctg}\frac{x_1}{x_A}\right)+x_1-d\right], \qquad (24)$$

где x_A определяется из зависимости (29) главы III, x_1 — начальная отметка границы соленых вод.

Формула соответствует условиям (см. гл. III), когда водораздельная точка достигла контура постоянного напора. Питание водозабора происходит за счет подземных вод, поступающих со стороны контура и с противоположной стороны (берега).

Линейный ряд скважин

Рассмотрим неограниченный линейный ряд скважин, расположенный параллельно контуру постоянного напора на расстоянии d от него. Расстояние между скважинами в ряду σ, дебит отдельной скважины ряда Q_0. Ось x совпадает с линией контура, ось y проходит через скважину ряда и является главной линией тока. В условиях бассейна время движения подземных вод к линейному ряду вдоль главной линии тока — оси y от начальной отметки y_1 рассчитывается по формуле

$$T=\frac{n_0\sigma}{q_0\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{\sigma}}\left[(d-y_1)\operatorname{ch}\frac{2\pi d}{\sigma}-\frac{\sigma}{2\pi}\left(\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{\sigma}-\operatorname{sh}\frac{2\pi y_1}{\sigma}\right)\right]. \qquad (25)$$

Если определяется время движения от линии контура, то, полагая $y_1 = 0$, получим

$$T=\frac{n_0\sigma}{q_0}\left(d\operatorname{cth}\frac{2\pi d}{\sigma}-\frac{\sigma}{2\pi}\right). \qquad (26)$$

Анализ зависимости (25) показал следующее. Время T движения жидкости к линейному ряду существенно зависит от расстояния σ между скважинами в ряду и с увеличением σ стремится к соответствующему времени T' для одиночного водозабора в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора (река) с дебитом, равным производительности отдельной скважины ряда. При этом, если частицы жидкости движутся к линейному ряду со стороны реки, то $T < T'$. Если же движение частиц жидкости к ряду происходит с противоположной стороны (со стороны берега), то $T > T'$, т. е. время перемещения частиц жидкости к линейному ряду больше, чем к одиночной скважине, работающей с тем же дебитом, что и отдельная скважина ряда (рис. 18).

Это объясняется существенными различиями структуры фильтрационного поля для одиночного водозабора и линейного ряда и обусловленного этими особенностями распределения скоростей

фильтрации. Так, в любой точке главной линии тока при $y_1 > d$ скорость в случае одиночного водозабора больше, чем в случае линейного ряда; в то же время при $y_1 < d$ скорость при работе одиночного водозабора меньше, чем для линейного ряда (см. рис. 18).

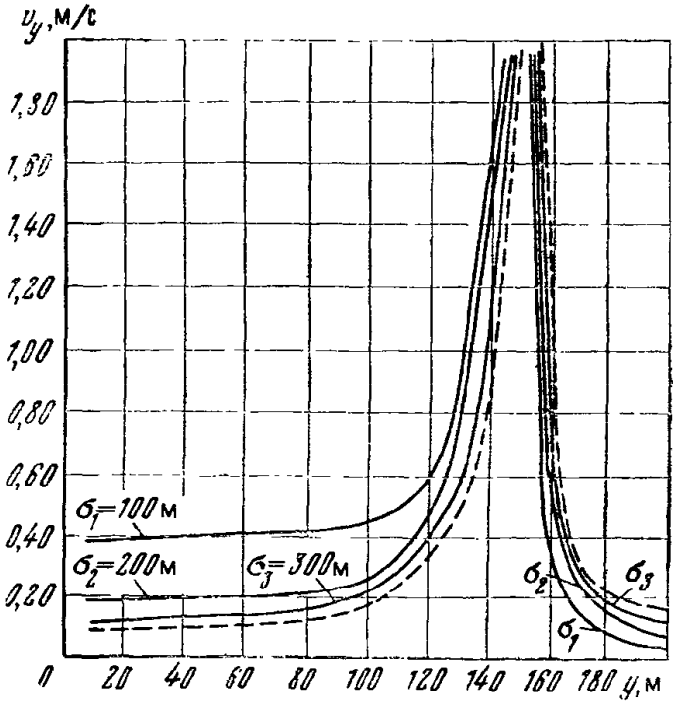


Рис. 18. График скорости v в различных точках главной линии тока (оси y) при работе ряда скважин и одиночной скважины (пунктирная кривая). График построен для следующих данных:

q = 40 м²/сут, d = 150 м, n_0 = = 0,2, σ = 100, 200 и 300 м

В условиях естественного потока подземных вод, направленного от реки, время движения частиц жидкости к линейному ряду от начального положения y_1 определяется по формуле

$$T = \frac{n_0}{v_e}\left[d - y_1 - \frac{\sigma}{2\pi\alpha}\left(\alpha - \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{\sigma}\right)\ln\times\right.$$

$$\left.\times\left|\frac{\left(\alpha - 1 + \alpha\operatorname{th}\frac{\pi d}{\sigma}\right)\left(\alpha - 1 - \alpha\operatorname{th}\frac{\pi y_1}{\sigma}\right)}{\left(\alpha - 1 - \alpha\operatorname{th}\frac{\pi d}{\sigma}\right)\left(\alpha - 1 + \alpha\operatorname{th}\frac{\pi y_1}{\sigma}\right)}\right|\right], \qquad (27)$$

где

$$\alpha = \frac{q_0}{\sigma v_e}\operatorname{sh}\frac{2\pi d}{\sigma} + \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{\sigma}.$$

Если требуется рассчитать время подтягивания загрязненных вод непосредственно от реки, то в формуле (27) следует положить $y_1 = 0$. Тогда получим

$$T = \frac{n_0}{v_e}\left[d - \frac{\sigma}{2\pi\alpha}\left(\alpha - \operatorname{ch}\frac{2\pi d}{\sigma}\right)\ln\left|\frac{\alpha - 1 + \alpha\operatorname{th}\frac{\pi d}{\sigma}}{\alpha - 1 - \alpha\operatorname{th}\frac{\pi d}{\sigma}}\right|\right]. \qquad (28)$$

Сравнение формул (28) и (26) показало, что в подавляющем большинстве случаев естественная скорость движения подземных вод незначительно сказывается на времени перемещения частиц жидкости к линейному ряду. Погрешность расчетов времени движения при неучете естественного потока не превышает 4—7%, особенно, если рассчитывается время перемещения со стороны реки. Поэтому на практике можно пользоваться более простой формулой (26) для полуограниченного бассейна подземных вод. При этом в соответствии с рассмотренной выше (см. гл. III) структурой потока движение подземных вод в пласте-полосе (к ряду) происходит только внутри его области питания. Это имеет особое значение при оценке возможности подтягивания соленых вод из области, расположенной вниз по потоку от водозабора. Область питания линейного ряда вниз по потоку имеет ограниченные размеры, определяемые формулой (49) главы III, и подток к водозабору соленых вод возможен только при условии, что последние захватываются областью питания водозабора. В этом случае расчет времени подтока соленых вод производится по формулам (27) или (25).

ПОЛУОГРАНИЧЕННЫЙ ПЛАСТ С НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЕЙ

Рассмотрим полуограниченный по площади водоносный горизонт с непроницаемой границей и одиночный водозабор, расположенный на оси x на расстоянии d от этой границы; ось y совпадает с линией непроницаемого контура.

Для времени движения частиц жидкости вдоль линии тока зависимость получена В. Н. Щелкачевым [80].

Наибольший интерес представляет движение по главной линии тока — оси x.

Время движения вдоль оси x от точки x_1 до точки x_2 определяется по формуле [80].

$$|T| = \frac{\pi n_0 d^2}{q}\left[\frac{1}{2}\left(\bar{x}_1^2 - \bar{x}_2^2\right) - \ln\frac{\bar{x}_1}{\bar{x}_2}\right], \tag{29}$$

где $\bar{x} = \frac{x}{d}$.

Если рассчитывается время движения до водозабора, то, полагая в (29) $\bar{x}_2 = 1$, получим

$$T = \frac{\pi n_0 d^2}{q}\left[\frac{1}{2}\left(\bar{x}_1^2 - 1\right) - \ln \bar{x}_1\right]. \tag{30}$$

Ниже приведены результаты расчетов времени движения в полуограниченном пласте с непроницаемой границей в сравнении со временем T_0 в неограниченном пласте. Расчеты выполнены на основе формул (30) и (3).

Зависимость $\frac{T}{T_0}$ от $\bar{x} = \frac{x}{d}$

$\bar{x}$	0,1	0,3	0,5	0,7	1	1,3	1,5	2,0	3,0	10,0
$\frac{T}{T_0}$	2,2	1,5	1,3	1,1	1	0,92	0,86	0,81	0,72	0,58

Величина $\frac{T}{T_0}$ изменяется от ∞ до 1 при $0 < x < d$ и от 1 до 0,5 при $d < x < \infty$. Этот интервал изменения $\frac{T}{T_0}$ находится в соответствии с рассмотренным выше (см. гл. III) изменением отношения скоростей $\frac{v_{x0}}{v_0}$, которое заключено в интервале $0 \leqslant \frac{v_{x0}}{v_0} \leqslant 2$ при изменении x от 0 до ∞.

Размеры области по оси x, в пределах которой $\frac{T}{T_0}$ отличается от 1 не более чем на 20%, составляют слева и справа от водозабора соответственно 0,4 d и d, т. е. эта область «сжата» в сторону непроницаемой границы и вытянута в противоположном направлении.

Анализ времени движения по другим линиям тока показал, что в районе водозабора на площади радиусом $\sim 0{,}5\,d$ время движения в полуограниченном пласте с непроницаемым контуром незначительно отличается от времени движения в неограниченном пласте: средняя погрешность составляет 7—10%, а максимальная не превышает 20%. Эти результаты согласуются с приведенными в главе III выводами относительно структуры потока в полуограниченном пласте с непроницаемой границей.

Следовательно, на площади радиусом 0,5 d приближенные расчеты времени движения вод к водозабору по любой линии тока можно производить по более простой формуле для неограниченного пласта.

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТА

Рассмотрим влияние фильтрационной неоднородности водоносного горизонта на время движения подземных вод к водозабору в условиях неограниченного по площади пласта.

Прямолинейная граница неоднородности

Неограниченный в плане водоносный горизонт разделен прямолинейной границей на две зоны (полуплоскости), различающиеся по фильтрационным свойствам. Коэффициенты фильтрации зон I и II равны K_1 и K_2 (рис. 19). В зоне I в точке z_0 расположена совершенная скважина, через которую производится водоотбор с постоянным дебитом Q. Для этого случая комплексный потенциал имеет вид [40, 55, 59]:

зона I

$$F_1(z) = \frac{q}{2\pi}[\ln(z - z_0) + \alpha \ln(z - \bar{z}_0)] + \text{const}; \qquad (31)$$

зона II

$$F_2(z) = \frac{q}{2\pi}(1 - \alpha)\ln(z - z_0) + \text{const},$$

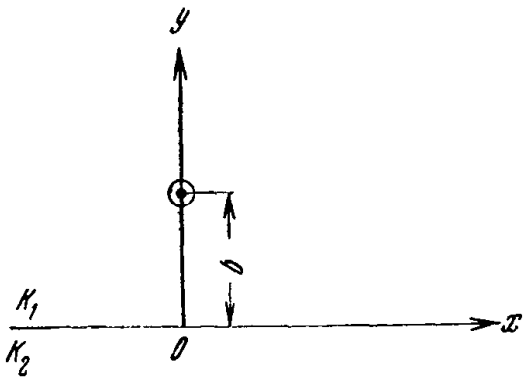


Рис. 19. Схема неоднородного пласта

где

$$\varkappa = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2},$$

$$z_0 = x_0 + iy_0, \quad \bar{z}_0 = x_0 - iy.$$

Для упрощения дальнейших выкладок примем, что скважина расположена на оси $\bar{y}$ на расстоянии b от границы неоднородности; ось x совпадает с границей неоднородности.

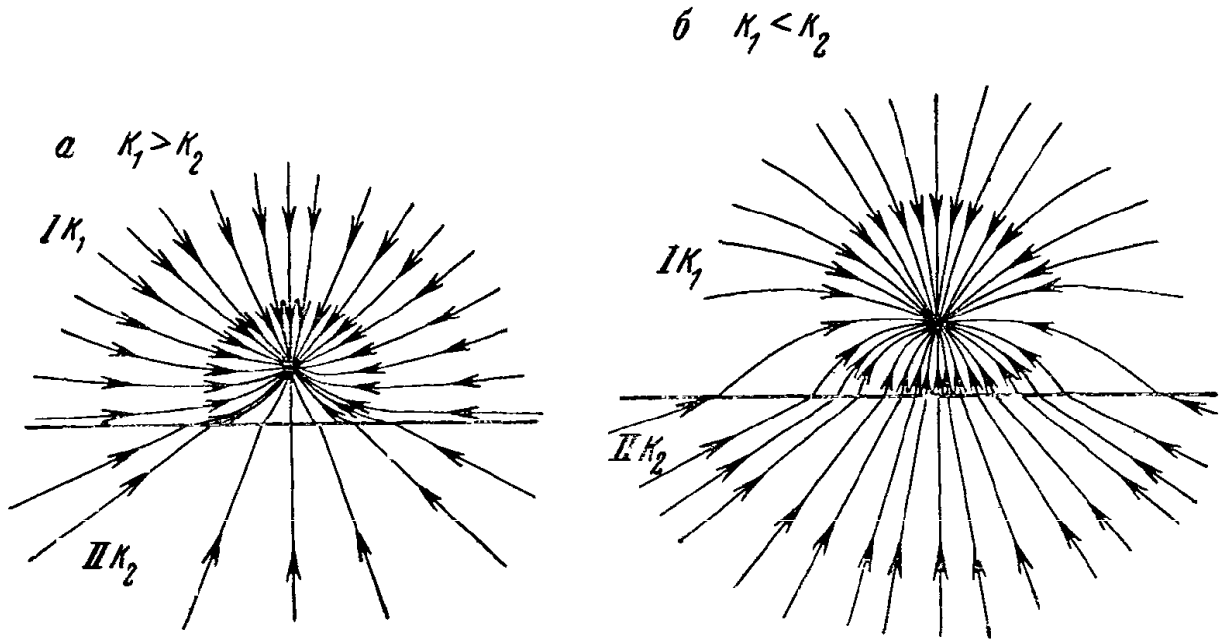


Рис. 20. Схема линий тока в неограниченном пласте с прямолинейной границей неоднородности (по М. А. Гусейн-Заде)

Уравнения линий тока записываются

зона I

$$\operatorname{arctg}\frac{y-b}{x} + \varkappa \operatorname{arctg}\frac{y+b}{x} = \text{const}, \qquad (32)$$

зона II

$$\operatorname{arctg}\frac{y-b}{x} = \text{const}.$$

Характер линий тока для $\frac{K_1}{K_2} > 1$ и $\frac{K_1}{K_2} < 1$ показан на рис. 20.

Составляющие скорости в зонах I и II равны

$$v_{1x}=\frac{q}{2\pi}\left[\frac{x}{x^2+(y-b)^2}+\frac{\varkappa x}{x^2+(y+b)^2}\right], \tag{33}$$

$$v_{1y}=\frac{q}{2\pi}\left[\frac{y-b}{x^2+(y-b)^2}+\frac{\varkappa(y+b)}{x^2+(y+b)^2}\right], \tag{34}$$

$$v_{2x}=\frac{q}{2\pi}\cdot\frac{(1-\varkappa)x}{x^2+(y-b)^2},\quad v_{2y}=\frac{q}{2\pi}\cdot\frac{(1-\varkappa)(y-b)}{x^2+(y-b)^2}. \tag{35}$$

Время движения вдоль главной линии тока (оси y) от точки y_1 до точки y_2 определяется по следующим формулам [40]:

зона I

$$|t_1|=\frac{2\pi n_0}{q(1+\varkappa)}\left[\frac{y_2^2-y_1^2}{2}-b\frac{1-\varkappa}{1+\varkappa}(y_2-y_1)-\frac{4\varkappa b^2}{(1+\varkappa)^2}\ln\frac{y_2+b\dfrac{1-\varkappa}{1+\varkappa}}{y_1+b\dfrac{1-\varkappa}{1+\varkappa}}\right]; \tag{36}$$

зона II

$$|t_2|=\frac{2\pi n_0}{q(1-\varkappa)}\left[\frac{1}{2}(y_2^2-y_1^2)-b(y_2-y_1)\right]. \tag{37}$$

Если граница соленых вод проходит в зоне I, то время ее продвижения до водозабора определяется по формуле (36). Если граница соленых вод проходит в зоне II, то сначала по формуле (37) находится время перемещения контура соленых вод до границы неоднородности, а затем по формуле (36) — время перемещения контура соленых вод от границы неоднородности до водозабора.

Степень неоднородности пласта характеризуется коэффициентом $\varkappa=\frac{K_1-K_2}{K_1+K_2}$. По абсолютной величине коэффициент $\varkappa$ изменяется в пределах $0\leqslant\varkappa\leqslant 1$. Экстремальным значениям $\varkappa=0$, -1 и 1 соответствуют однородный неограниченный пласт ($K_1=K_2$), полуограниченный пласт с контуром постоянного напора ($K_2=\infty$) и полуограниченный пласт с непроницаемым контуром ($K_2=0$).

При подстановке в (36) значений $\varkappa=0$, -1 и 1 после предельных переходов получаем выражения для времени движения частицы жидкости вдоль главной линии тока в условиях соответственно однородного неограниченного пласта, полуограниченного пласта с контуром постоянного напора и полуограниченного пласта с непроницаемой границей.

Исследуем характер распределения скоростей в неоднородном пласте.

Сравним скорость v_{1y} по оси y (главной линии тока) в области I со скоростью v_0 в однородном пласте

$$\bar{v}_{1y}=\frac{v_{1y}}{v_0}=1+\varkappa\frac{\bar{y}-1}{\bar{y}+1},\quad \text{где}\quad \bar{y}=\frac{y}{b}.$$

Величина $\bar{v}_{1y}$ в зависимости от $\varkappa$ и $\bar{y}$ изменяется в следующих пределах:

$$\varkappa > 0 \quad (K_1 > K_2)$$

$$(1-\varkappa) \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 1 \text{ при } 0 \leqslant \bar{y} \leqslant 1;$$

$$1 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant (1+\varkappa) \text{ при } 1 \leqslant \bar{y} \leqslant \infty.$$

$$\varkappa < 0 \quad (K_1 < K_2)$$

$$1 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant (1-\varkappa) \text{ при } 0 \leqslant \bar{y} \leqslant 1;$$

$$(1+\varkappa) \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 1 \text{ при } 1 \leqslant \bar{y} \leqslant \infty.$$

Таким образом, отношение $\frac{v_{1y}}{v_0}$ отличается от 1 не более чем на $\pm \varkappa$ (табл. 6).

Таблица 6

Значения $\bar{v}_{1y}$ для $\varkappa > 0$

$\varkappa \left(\frac{K_1}{K_2}\right)$	$\bar{y}$								
	0	0,3	0,5	0,7	1,0	1,3	1,7	2,0	3,0
0,2 (1,5)	0,8	0,89	0,98	0,96	1	1,03	1,05	1,07	1,1
0,4 (2,3)	0,6	0,78	0,87	0,93	1	1,05	1,1	1 13	1,2
0,6 (4,0)	0,4	0,68	0,8	0,89	1	1,08	1,16	1,2	1,3
0,8 (9,0)	0,2	0,58	0,74	0,86	1	1,1	1,21	1,26	1,4
0,9 (19)	0,1	0,51	0,7	0,84	1	1,12	1,23	1,3	1,45
0,95 (4,0)	0,5	0,49	0,69	0,83	1	1,12	1,25	1,31	1,47

Для экстремальных случаев имеем

$$\varkappa = 1 \quad (K_2 = 0)$$

$$0 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 1 \text{ при } y < b;$$

$$1 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 2 \text{ при } y > b.$$

$$\varkappa = -1 \quad (K_2 = \infty)$$

$$1 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 2 \text{ при } y < b;$$

$$0 \leqslant \bar{v}_{1y} \leqslant 1 \text{ при } y > b.$$

Рассмотрим отношение $\frac{v_{1x}}{v_0}$ в точках прямой $y = b$, проходящей через водозабор и параллельной оси x

$$\bar{v}_{1x} = \frac{v_{1x}}{v_0} = 1 + \frac{\varkappa \bar{x}^2}{\bar{x}^4 + 4}, \tag{38}$$

где

$$\bar{x} = \frac{x}{b}.$$

Результаты расчетов приведены в табл. 7.

Таблица 7

Значения $\bar{v}_{1x}$ для $\varkappa > 0$

$\varkappa\left(\frac{K_1}{K_2}\right)$	$\bar{x}$						
	0,3	0,7	1,1	1,5	2,0	3,0	5,0
0,2 (1,5)	1	1,01	1,04	1,07	1,11	1,14	1,17
0,4 (2,3)	1	1,04	1,09	1,14	1,2	1,27	1,34
0,0 (4,0)	1,01	1,06	1,14	1,2	1,3	1,4	1,5
0,8 (9,0)	1,01	1,08	1,18	1,28	1,4	1,5	1,69
0,9 (19)	1,02	1,1	1,2	1,32	1,45	1,6	1,77

При $\varkappa > 0$ $(K_1 > K_2)$ величина $\bar{v}_{1x} \geqslant 1$ и, наоборот, при $\varkappa < 0$ $\bar{v}_{1x} \leqslant 1$.

Таким образом, из анализа табл. 6 и 7 следует, что при $\frac{K_1}{K_2} \leqslant 10$ скорости фильтрации в некоторой области, примыкающей к водозабору, незначительно отличаются от скоростей фильтрации в однородном пласте (максимальная погрешность этого отличия не превышает 20%). Указанная область характеризуется следующими размерами: по оси x расстояние равно $0{,}5\,b$ (в сторону границы неоднородности) и $0{,}7\,b$ (в противоположную сторону); вдоль прямой $y = b$, параллельной оси x, расстояние равно 1,5 в обе стороны от водозабора.

В пределах этой области расчеты времени движения подземных вод к водозабору приближенно можно производить по формулам для однородного пласта.

Сравним скорость v_{1y} по оси y в неоднородном пласте при $K_1 > K_2$ $(\varkappa > 0)$ со скоростью v_y в полуограниченном пласте с непроницаемым контуром.

Имеем

$$\bar{v}'_{1y} = \frac{v_{1y}}{v_y} = \frac{1+\varkappa}{\varkappa} + \frac{1-\varkappa}{2\bar{y}},$$

где $\bar{y} = \frac{y}{b}$.

При $\varkappa = 1$ $(K_2 = 0)$ отношение $\frac{v_{1y}}{v_y} = 1$; с увеличением y $(y \to \infty)$ величина $\bar{v}_{1y} \to \frac{1+\varkappa}{2}$ (табл. 8).

Из табл. 8 видно, что при $\bar{y} < 1$ значения $\bar{v}'_{1y} > 1$, т. е. $v_{1y} > v_y$, а при $\bar{y} > 1$, $\bar{v}'_{1y} < 1$ или $v_{1y} < v_y$.

При $\frac{K_1}{K_2} \geqslant 9$ $(\varkappa > 0{,}8)$ распределение скоростей в точках главной линии тока зоны I практически не отличается $(\bar{v}_{1y} \sim 1)$

Таблица 8

Значения $\bar{v}_{1y}$ для $\varkappa > 0$

$\varkappa\left(\frac{K_1}{K_2}\right)$	$\bar{y}$							
	0,3	0,5	0,7	1,3	1,7	2,0	3,0	5,0
0,2 (1,5)	1,93	1,4	1,17	0,91	0,84	0,8	0,73	0,68
0,4 (2,3)	1,7	1,3	1,13	0,93	0,87	0,85	0,8	0,76
0,6 (4,0)	1,46	1,2	1,09	0,95	0,92	0,9	0,87	0,84
0,8 (9,0)	1,23	1,1	1,04	0,97	0,95	0,96	0,93	0,92
0,9 (19)	1,12	1,05	1,02	0,98	0,98	0,975	0,97	0,96
0,95 (40)	1,06	1,03	1,02	0,994	0,99	0,987	0,983	0,98

от распределения скоростей в полуограниченном пласте с непроницаемым контуром. Поэтому для прогноза движения загрязненных вод по главной линии тока — оси y зоны I неоднородного пласта границу неоднородности при $\frac{K_1}{K_2} \geqslant 9$ можно принимать в качестве непроницаемого контура.

Полосовая зона неоднородности

Рассмотрим неоднородность в виде полосы шириной $2b$. Коэффициент фильтрации полосы K_2, вмещающих пород K_1, при этом $K_2 > K_1$. В середине полосы (в начале координат) расположена водозаборная скважина, работающая с постоянным дебитом Q. Для этих условий распределение напора в пределах неоднородной полосы приближенно описывается следующим выражением, полученным В. Д. Бабушкиным [4, 5]

$$H = H_e - \frac{Q}{8\pi h K_2}\{2\ln(x^2+y^2) + \varkappa \ln[x^2+(2b+y)^2] + \ln[x^2+(2b-y)^2] + F_0(\bar{x}, \varkappa)\}, \quad (39)$$

где

$$\bar{x} = \frac{x}{2b}, \quad \varkappa = \frac{K_2 - K_1}{K_2 + K_1}. \quad (40)$$

Функция $F_0(\bar{x}, \varkappa)$, входящая в (39), представляет собой ряд

$$F_0(\bar{x}, \varkappa) = 2\sum_{n=1}^{\infty} \varkappa^n \{\ln(\bar{x}^2+n^2) + \varkappa \ln[\bar{x}^2+(n+1)^2]\}. \quad (41)$$

Для напора в точках оси x — главной линии тока имеем

$$H_0 = H_e - \frac{Q}{4\pi h K_2}\left[2\ln x + \varkappa \ln(x^2+4b^2) + \frac{1}{2}F_0(\bar{x}, \varkappa)\right]. \quad (42)$$

Найдем скорость фильтрации в точках главной линии тока

$$|v_x| = K_2 \frac{\partial H_0}{\partial x} = \frac{Q}{2\pi h}\left[\frac{1}{x} + \frac{\varkappa x}{x^2+4b^2} + \frac{x}{4b^2}F_0'(\bar{x},\ \varkappa)\right], \qquad (43)$$

где

$$F_0'(\bar{x},\ \varkappa) = \sum_{n=1}^{\infty} \varkappa^n \left[\frac{1}{\bar{x}^2+n^2} + \frac{\varkappa}{\bar{x}^2+(n+1)^2}\right].$$

Ряд F_0' — быстросходящийся, и для практических расчетов можно пользоваться первыми членами ($n = 2 \div 3$), особенно при малых $\varkappa$ (табл. 9).

Таблица 9

Значения $\frac{v_x}{v_0}$

$\bar{x}$	$n=3$			$n=5$		
	$\varkappa=\frac{K_2}{K_1}$			$\varkappa=\frac{K_2}{K_1}$		
	0,6 (4)	0,8 (9)	0,9 (19)	0,6 (4)	0,8 (9)	0,9 (19)
0,5	1,47	1,7	1,83	1,48	1,71	1,91
0,7	1,8	2,2	2,44	1,82	2,25	2,53
1,0	2,29	2,95	3,36	2,32	3,25	3,67
2,0	3,47	4,84	5,7	3,48	5,22	6,37
3,0	4,04	6.26	7,64	4,24	6,94	8,81
5,0	6,2	7,52	9,3	6,55	8,87	11,4

При $n = 2$ приближенное выражение для скорости фильтрации запишется в виде

$$v_x = \frac{Q}{2\pi hb} f(\bar{x},\ \varkappa), \qquad (44)$$

где

$$f(\bar{x},\ \varkappa) = \frac{1}{\bar{x}} + \frac{2\varkappa^2\bar{x}}{\bar{x}^2+1} + \frac{\varkappa^3\bar{x}}{\bar{x}^2+9}.$$

Нетрудно видеть, что при $K_1 = K_2$ ($\varkappa = 0$) выражение (10) переходит в формулу для скорости в неограниченном неоднородном пласте. Действительно, последние два слагаемых при $\varkappa = 0$ обращаются в нуль и в итоге получаем

$$\lim_{\varkappa \to 0} v_x = \frac{Q}{2\pi hx} = v_0.$$

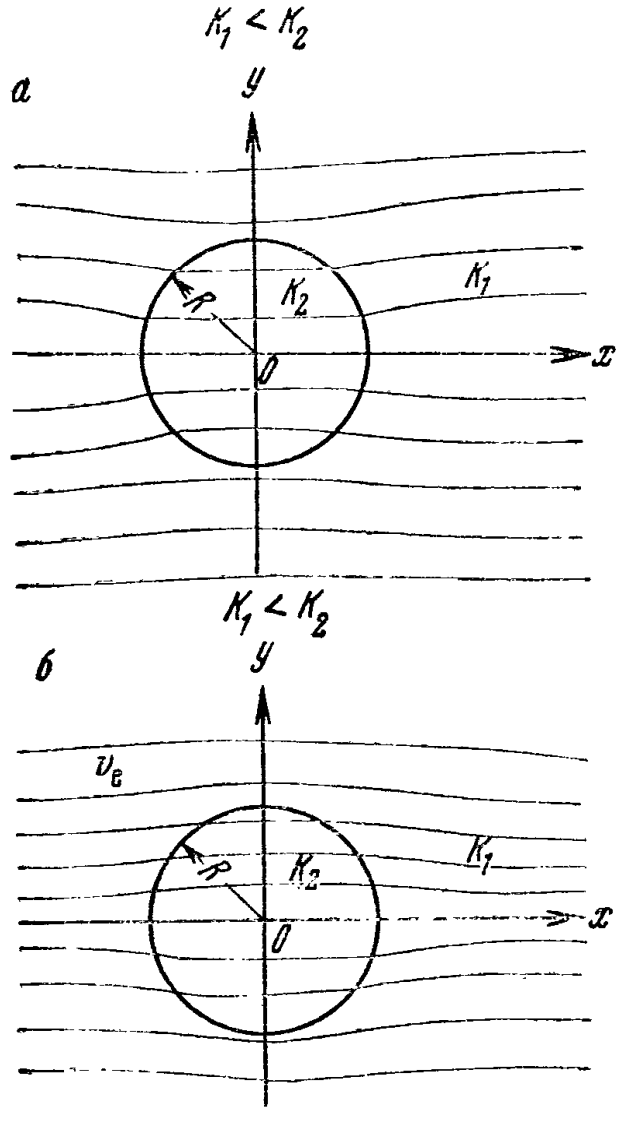
Из формулы (43) следует также, что при $\varkappa > 0$ скорость внутри полосы больше, чем в однородном пласте. В табл. 9 приведены результаты расчета отношения $\frac{v_x}{v_0}$ по формуле

$$\frac{v_x}{v_0} = 1 + \frac{\varkappa \bar{x}^2}{\bar{x}^2 + 1} + 2\bar{x}^2 F_0'(\bar{x}, \varkappa).$$

Из табл. 9 видно, что полосовая неоднородность существенно сказывается на скорости движения частиц жидкости. Скорость в неоднородном пласте может отличаться от скорости в однородном пласте в несколько раз и даже на порядок, особенно при больших $\varkappa \left(\frac{K_1}{K_2} > 10\right)$ и $\bar{x}$, а также небольшой ширине неоднородной полосы.

Локальные неоднородности в естественном потоке подземных вод

Рассмотрим влияние локальных неоднородных зон на движение фронта двух жидкостей в естественном потоке подземных вод при отсутствии скважины.



В пласте с коэффициентом фильтрации K_1 (зона I) имеется локальная неоднородность с коэффициентом фильтрации K_2, которую схематизируем в виде круга радиусом R (зона II). Естественный поток подземных вод характеризуется средней скоростью v_e. Подобного рода задача исследовалась В. С. Спорышевым и М. А. Гусейном-Заде.

Комплексный потенциал течения имеет вид [40, 66]

$$F_1(z) = v_e\left(z + \frac{\varkappa R^2}{z}\right) + \text{const};$$

$$F_2(z) = v_e(1 - \varkappa)z + \text{const}, \quad (45)$$

где $$\varkappa = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2}.$$

Рис. 21. Схема локальных неоднородных включений в естественном потоке подземных вод

Начало координат расположено в центре неоднородности, ось x направлена по потоку (рис. 21).

Под влиянием неоднородности линии тока в зоне I (вне круга) искривляются, причем эти искривления особенно значительны вблизи границы неоднородности. С удалением от неоднородного включения деформации линий тока ослабевают и они приближаются к прямым линиям невозмущенного естественного потока. Характер деформации линий тока в зоне I зависит от соотношения коэффициентов фильтрации K_1 и K_2: при $\frac{K_1}{K_2} > 1$ линии тока расходятся от неоднородного включения, при $\frac{K_1}{K_2} > 1$ они как бы «втягиваются» в зону неоднородности.

Уравнение линий тока для зоны I имеет вид

$$\psi_1(x, y) = v_e y - \frac{\varkappa y v_e R^2}{x^2 + y^2} + \text{const}. \tag{46}$$

Внутри неоднородного включения линии тока представляют собой прямые линии и описываются уравнением

$$\psi_2(x, y) = v_e(1 - \varkappa) y + \text{const}. \tag{47}$$

Составляющая скорости фильтрация по оси x, т. е. по направлению тока, равна

$$v_{1x} = v_e + v_e \varkappa R^2 \frac{y^2 - x^2}{(y^2 + x^2)^2}, \tag{48}$$

$$v_{2x} = v_e(1 - \varkappa). \tag{49}$$

Внутри включения скорость, согласно (49) — величина постоянная; она отличается от скорости естественного потока в $(1 - \varkappa)$ раз. За пределами включения составляющая скорости v_{1x} складывается из двух слагаемых: скорости естественного движения подземных вод v_e и «дополнительной» скорости $v_{доп}$

$$v_{доп} = v_e \varkappa R^2 \frac{y^2 - x^2}{(y^2 + x^2)^2}.$$

Эта «дополнительная» скорость обусловлена наличием неоднородного включения. В зависимости от $\varkappa$ и соотношения между x и y величина $v_{доп}$ может быть положительной или отрицательной и, следовательно, скорость v_{1x} может быть больше или меньше v_e.

Из расчета скоростей следует, что зона деформации естественного потока, обусловленная локальными неоднородностями, в общем невелика. Изменение скорости естественного потока (заметное отклонение v_{1x} от v_e) начинает сказываться при $\frac{K_1}{K_2} > 5$ и прослеживается на расстоянии до $\sim 1{,}5\,R$ от границы неоднородного включения. Наиболее сильные деформации скорости потока имеют

место непосредственно вблизи границы неоднородности на расстоянии от нее до (0,2—0,4) R (здесь отклонение v_{1x} от v_c может достигать 50—70%); с удалением от границы неоднородности на расстоянии от 0,4 R до 1,5 R изменение скорости потока не превышает 20—30%. Деформация потока и изменение скорости движения частиц жидкости, обусловленные локальными неоднородностями, нарушают устойчивый характер перемещения фронта загрязнения и способствуют образованию «языков». При этом, если проницаемость включения K_2 меньше проницаемости K_1 остальной части пласта, то образование «языков» будет происходить за пределами включения. Если же $K_2 > K_1$, то «язык» формируется внутри самого включения. Как показал анализ этого процесса, вследствие сравнительно небольших изменений скоростей, обусловленных влиянием локальных неоднородностей, образующиеся за пределами неоднородных включений «языки» уже на расстоянии $|x| > 2R$ уменьшаются и фронт двух жидкостей сглаживается.

Время движения частиц жидкости внутри включения вдоль оси x определяется по формуле

$$|t| = \frac{|x_2 - x_1| n_0}{(1-\varkappa) v_e}, \tag{50}$$

где x_2 и x_1 — соответственно конечная и начальная точки пути.

Время движения по границе включения в случае $K_2 = 0$ ($\varkappa = 1$) равно

$$t = \frac{n_0}{v_e} \mathrm{R} \ln \frac{\operatorname{tg}\left(0{,}5 \arcsin \frac{y_1}{R}\right)}{\operatorname{tg}\left(0{,}5 \arcsin \frac{y_2}{R}\right)}, \tag{51}$$

где y_2 и y_1 — ординаты конечной и начальной точек пути.

Время движения за пределами включения определяется по формулам

$$\varkappa > 0 \ (K_1 > K_2)$$

$$|t| = \frac{n_0}{v_e}\left[(x_2 - x_1) + 0{,}5R\sqrt{\varkappa} \ln \frac{(x_1 + R\sqrt{\varkappa})(x_2 - R\sqrt{\varkappa})}{(x_1 - R\sqrt{\varkappa})(x_2 + R\sqrt{\varkappa})}\right], \tag{52}$$

$$|t| = \frac{n_0}{v_e}\left[(x_2 - x_1) - R\sqrt{\varkappa} \operatorname{arctg} \frac{(x_2 - x_1) R\sqrt{\varkappa}}{R^2|\varkappa| + x_1 x_2}\right]. \tag{53}$$

С удалением от зоны неоднородности, т. е. с увеличением x, вторые слагаемые в формулах (52) и (53) стремятся к нулю и указанные формулы переходят в простую зависимость для времени движения естественного потока в однородном пласте.

Формулы (51)—(53) получены В. С. Спорышевым [66].

Линейный ряд в неоднородном пласте

Прямолинейная граница разделяет неограниченный по площади пласт на две зоны I и II с коэффициентами фильтрации K_1 и K_2.

Неограниченный линейный ряд скважин расположен в зоне I параллельно границе неоднородности и на расстоянии b от нее. Ось y совпадает с линией неоднородности; ось x проходит через одну из скважин ряда и является главной линией тока. Расстояние между скважинами σ, дебит отдельной скважины Q_0.

Для этих условий комплексный потенциал потока имеет вид [40]

$$\text{зона I } F_1(z) = \frac{q_0}{2\pi}\left[\ln\sin\frac{\pi(z-b)}{2\sigma_i} + \varkappa \ln\sin\frac{\pi(z+b)}{2\sigma_i}\right] + \text{const}, \quad (54)$$

$$\text{зона II} \qquad F_2(z) = \frac{q_0(1-\varkappa)}{2\pi}\ln\sin\frac{\pi(z-b)}{2\sigma_i} + \text{const},$$

где

$$\varkappa = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2}, \qquad q_0 = \frac{Q_0}{h}.$$

Скорость движения подземных вод вдоль главной линии тока — оси x в зоне I (коэффициент фильтрации K_1)

$$v_{\text{I}} = \frac{q_0}{2\sigma n_0}\left[\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi(b-x)}{\sigma}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi(b-x)}{\sigma} - 1} - \varkappa\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi(b+x)}{\sigma}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi(b+x)}{\sigma} - 1}\right]; \quad (55)$$

в зоне II (коэффициент фильтрации K_2)

$$v_{\text{II}} = \frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}\cdot\frac{\operatorname{sh}\frac{2\pi(b-x)}{\sigma}}{\operatorname{ch}\frac{2\pi(b-x)}{\sigma} - 1}. \quad (56)$$

Анализ выражений (55) и (56) позволил получить предельные значения величин скоростей v_{I} и v_{II}.

Для зоны I имеем $\varkappa > 0$ $(K_1 > K_2)$

при $x < (b - 0{,}5\sigma)$ $0 \leqslant x \leqslant b$, $v_{\text{I}} \approx \frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}$;

при $x > (b + 0{,}5\sigma)$ $b \leqslant x \leqslant \infty$, $v_{\text{II}} \approx \frac{q_0(1+\varkappa)}{2\sigma n_0}$.

$\varkappa < 0$ $(K_1 < K_2)$

при $x < (b - 0{,}5\sigma)$ $0 \leqslant x \leqslant b$, $v_{\text{I}} \approx \frac{q_0(1+\varkappa)}{2\sigma n_0}$;

при $x > (b + 0{,}5\sigma)$ $b \leqslant x \leqslant \infty$, $v_{\text{II}} \approx \frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}$.

Аналогично для зоны II имеем

при $\varkappa > 0$ $v_{\text{II}} = \frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}$;

при $\varkappa < 0$ $v_{\text{II}} = \frac{q_0(1+\varkappa)}{2\sigma n_0}$.

Таким образом, при $\frac{|b-x|}{\sigma} > 0{,}5$ скорость течения в неоднородном пласте к линейному ряду становится постоянной, но разной по величине и изменяется от $\frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}$ до $\frac{q_0(1-\varkappa)}{2\sigma n_0}$. Предельное отношение скоростей фильтрационного потока в удалении от ряда равно

$$\text{при } \varkappa > 0 \quad \frac{v_{\text{I}}}{v_{\text{II}}} = \frac{1+\varkappa}{1-\varkappa},$$

$$\text{при } \varkappa < 0 \quad \frac{v_{\text{I}}}{v_{\text{II}}} = \frac{1-\varkappa}{1+\varkappa}.$$

Для времени движения частиц жидкости по главной линии тока (оси x) в зоне I получена формула [34], однако ввиду ее громоздкости она здесь не приводится. Эта формула сложная и неудобная для расчетов.

Расчет времени движения соленых вод можно значительно упростить, используя приведенные выше предельные значения v_{I} и v_{II}.

В частности, когда линейный ряд расположен в зоне с лучшими фильтрационными свойствами ($K_1 > K_2$, $\varkappa > 0$) и граница соленых вод находится на отметках $0 < x < b$ в зоне I или в зоне II, время продвижения соленых вод к ряду (по главной линии тока — оси x) может быть оценено по формуле

$$T = \frac{2n_0(L-0{,}5\sigma)\sigma}{q_0(1-\varkappa)} + \frac{1{,}8n_0\sigma^2}{q_0\pi}, \qquad (57)$$

где L — расстояние от линейного ряда до границы соленых вод.

Если граница соленых вод проходит в зоне I на отметках $x > b$ и на расстоянии L от ряда, то время продвижения соленых вод к линейному ряду приближенно определяется по формуле

$$T = \frac{2n_0(L-0{,}5\sigma)\sigma}{q_0(1+\varkappa)} + \frac{1{,}8n_0\sigma^2}{q_0\pi} \qquad (58)$$

Формулы (57) и (58) получены для условия $0{,}5\,\sigma < b$ путем «склеивания» времени движения на отрезке $(L - 0{,}5\,\sigma)$, на котором движение происходит с постоянной скоростью, и времени движения на отрезке длиной $0{,}5\,\sigma$, непосредственно примыкающем к ряду и которое определяется по формуле (13).

Погрешности расчетов по приближенным формулам (57) и (58) не превышают 5—10% по сравнению с расчетами по точной формуле.

Пример. Рассчитать время подтягивания соленых вод к линейному ряду скважин в неоднородном пласте, если $K_1 = 20$ м/сут, $K_2 = 4$ м/сут, $b = 2000$ м, $n_0 = 0{,}1$ (пористость предполагается одинаковой для неоднородных зон I и II), $q_0 = \frac{Q_0}{h} = 50$ м²/сут, $\sigma = 300$ м. Граница соленых вод проходит в зоне II на расстоянии от ряда $L = 3000$ м.

По формуле (57) находим

$$T = \frac{2 \cdot 0{,}1\,(3000 - 0{,}5 \cdot 300)\,300}{50\,(1 - 0{,}666)} + \frac{1{,}8 \cdot 0{,}1 \cdot 300^2}{50 \cdot 3{,}14} \approx 10\,400 \text{ сут.}$$

ВЛИЯНИЕ СЛОИСТОСТИ РАЗРЕЗА НА ВРЕМЯ ДВИЖЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Движение жидкостей в слоистом пласте с непроницаемым разделяющим пропластком

Рассмотрим два водоносных горизонта I и II, разделенных непроницаемым глинистым пропластком и эксплуатируемых одним водозабором. Мощности, коэффициенты фильтрации и пористости верхнего и нижнего горизонтов соответственно h_1, K_1, n_1 и h_2, K_2, n_2.

Имеется водозаборная скважина, полностью вскрывающая верхний и нижний горизонты и работающая с дебитом Q. Граница соленых вод проходит в верхнем слое на расстоянии x_1 от водозабора, в нижнем слое — на расстоянии x_2.

Известно, что расход подземных вод в горизонте пропорционален его водопроводимости.

Тогда расход подземных вод в верхнем пласте

$$Q_1 = Q \frac{K_1 h_1}{K_1 h_1 + K_2 h_2}, \tag{59}$$

в нижнем пласте

$$Q_2 = Q \frac{K_2 h_2}{K_1 h_1 + K_2 h_2}. \tag{60}$$

Время, за которое соленая вода подтянется к водозабору в верхнем горизонте,

$$t_1 = \frac{\pi n_1 x_1^2 (K_1 h_1 + K_2 h_2)}{Q K_1}, \tag{61}$$

в нижнем горизонте

$$t_2 = \frac{\pi n_2 x_2^2 (K_1 h_1 + k_2 h_2)}{Q K_2}. \tag{62}$$

В условиях естественного потока подземных вод в каждом горизонте формируется своя область питания водозабора. Если естественная скорость движения подземных вод в верхнем горизонте v_{1e}, а в нижнем v_{2e}, то размеры области питания в каждом из этих пластов будут:

для верхнего горизонта

$$x_A = \frac{Q K_1}{2\pi (K_1 h_1 + K_2 h_2) v_{1e}}, \quad y_0 = \frac{Q K_1}{4 (K_1 h_1 + k_2 h_2) v_{1e}},$$

$$y_\infty = \frac{Q K_1}{2 (K_1 h_1 + K_2 h_2) v_{1e}}; \tag{63}$$

для нижнего горизонта

$$x_A = \frac{QK_2}{2\pi (K_1h_1 + K_2h_2) v_{2e}}, \quad y_0 = \frac{QK_2}{4 (K_1h_1 + K_2h_2) v_{2e}},$$

$$y_\infty = \frac{QK_2}{2 (K_1h_1 + K_2h_2) v_{2e}}. \tag{64}$$

Все выводы относительно структуры движения подземных вод, сделанные в главе III, действительны в данном случае. В частности, подтягивание соленых вод к водозабору внутри каждого пласта возможно, если соленые воды захватываются областью питания водозабора.

Время движения подземных вод к водозабору внутри области питания для каждого горизонта определяется по формулам (1) или (2), только вместо Q подставляется значение расхода подземных вод по каждому горизонту согласно (59) и (60).

Влияние перетекания на время движения подземных вод

Рассмотрим два взаимосвязанных водоносных горизонта, разделенных слабопроницаемым глинистым слоем мощностью h_0 и коэффициентом фильтрации K_0. Из нижнего горизонта с параметрами h_1 и K_1 через одиночный водозабор производится отбор подземных вод с постоянным дебитом Q. В процессе водоотбора происходит перетекание подземных вод из верхнего горизонта (параметры h_2, K_2), при этом уровень верхнего понижается. Эта задача в наиболее общей постановке рассматривалась И. А. Чарным [72]. Однако полученные им зависимости сложны и их трудно использовать для практических расчетов. Простые и удобные решения этой задачи получены Ф. М. Бочевером, В. М. Чуйко и В. А. Мироненко [13, 74]. Согласно [13], объем перетекающей закачиваемой жидкости из нижнего горизонта в верхний за время t после начала закачки равен

$$V_п = \frac{Qb_1t}{b_1 + b_2} \left\{1 + \frac{1}{(b_1 + b_2) t} [1 - e^{-(b_1+b_2) t}]\right\}, \tag{65}$$

где

$$b_1 = \frac{K_0a}{h_0K_1h_1}, \quad b_2 = \frac{K_0a}{h_0K_2h_2},$$

a — пьезопроводность нижнего и верхнего горизонтов (предполагается одинаковой).

При $t > 500 \div 1000$ сут и $(b_1 + b_2) > 0{,}01$ зависимость (65) значительно упрощается

$$V_п \approx \frac{Qt}{1 + \frac{K_1h_1}{K_2h_2}}. \tag{66}$$

Средний расход перетекания за время t будет

$$Q_{п.\,ср} = \frac{Q K_2h_2}{K_1h_1 + K_2h_2}. \tag{67}$$

Из (66) видно, что количество перетекающей жидкости в основном зависит от соотношения водопроводимостей водоносных горизонтов. С увеличением водопроводимости эксплуатируемого горизонта (нижний горизонт I) перетекание жидкости из верхнего горизонта II уменьшается. Из формулы (65) видно, что при больших значениях t объем перетекающей жидкости не зависит от свойств слабо проницаемого разделяющего слоя (мощности h_0 и коэффициента фильтрации K_0). Эти параметры существенно сказываются в начальный период откачки при малых значениях t.

Если в нижнем горизонте I, из которого ведется откачка, имеется область соленых вод, то приближенную оценку перемещения соленых вод к водозабору можно произвести следующим образом.

В условиях перетекания движение фронта соленых вод к водозабору в горизонте I будет обусловлено расходом подземных вод, поступающих к водозабору в этом горизонте. Дебит водозабора будет складываться из расхода эксплуатируемого горизонта I и расхода перетекания из верхнего горизонта II. За время t после начала водоотбора объем подземных вод, отобранный водозабором из горизонта I, будет равен

$$V_э = V - V_п \approx Qt - \frac{Qt}{1 + \frac{K_1 h_1}{K_2 h_2}} = \frac{QK_1 h_1 t}{K_1 h_1 + K_2 h_2}. \qquad (68)$$

Следовательно, средний расход движущихся в горизонте I подземных вод равен

$$Q_{э.\,ср} = \frac{V_э}{t} = \frac{QK_1 h_1}{K_1 h_1 + K_2 h_2}. \qquad (69)$$

Сравнение (67) и (69) с формулами (59) и (60) показывает их полную идентичность. Таким образом, при отборе подземных вод в условиях перетекания, спустя достаточно большое время, расход подземных вод эксплуатируемого нижнего горизонта и расход перетекания из верхнего горизонта определяются теми же выражениями, что и расходы подземных вод верхнего и нижнего горизонтов, вскрытых одной скважиной. Поэтому все рассуждения и формулы, приведенные выше для двух горизонтов, разделенных непроницаемой границей, могут быть использованы для приближенных оценок применительно к слоистому разрезу с перетеканием.

Если в верхнем горизонте содержатся соленые воды, то их перетекание может ухудшить качество подземных вод нижнего горизонта. Перетекающие из верхнего горизонта II подземные воды в объеме $V_п$ будут смешиваться с водами горизонта I в объеме $(Qt - V_п)$ и минерализация смеси приближенно может быть оценена по формуле

$$C \approx C_0 + \frac{V_п}{Qt}(C - C_0), \qquad (70)$$

где $v_п$ определяется по формулам (65) или (66).

ГЛАВА V

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ МИНЕРАЛИЗАЦИИ ВОДЫ НА ВОДОЗАБОРЕ

ОДИНОЧНЫЙ ВОДОЗАБОР В НЕОГРАНИЧЕННОМ ПО ПЛОЩАДИ ВОДОНОСНОМ ГОРИЗОНТЕ

Условия бассейна

Прямолинейная граница соленых вод

Рассмотрим одиночный водозабор, расположенный на расстоянии x_1 от прямолинейной границы соленых вод, разделяющей водоносный горизонт на две области — пресных вод с минерализацией C_0 и соленых вод с минерализацией C_1; граница соленых вод параллельна оси y.

В процессе отбора пресных подземных вод граница соленых вод деформируется и образуется «язык» соленых вод, движущийся в сторону водозабора. Время, за которое соленые воды достигнут водозабора, определяется по формуле (3) главы IV. После прорыва соленых вод их доля в дебите водозабора будет постепенно возрастать по мере расширения фронта поступления соленых вод к водозабору. Используя функцию тока (1) главы III, в соответствии с вышеизложенным найдем расход соленых вод q_c в дебите водозабора

$$q_c = \frac{q}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x_1}. \tag{1}$$

Минерализация воды на водозаборе равна

$$C = C_0 + (C_1 - C_0) \frac{q_c}{q}. \tag{2}$$

Подставляя (1) в (2) и выражая координаты x_1 и y через время T и t $\left(x_1 = \sqrt{\frac{qT}{\pi n_0}} \text{ и } y = \sqrt{\frac{q(t-T)}{\pi n_0}}\right)$, окончательно получим

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T}{t}}. \tag{3}$$

Зная минерализации пресных и соленых вод (C_0 и C_1) и время поступления (T) к водозабору первых порций соленой воды, по

формуле (3) можно прогнозировать на последующие моменты времени $t > T$ минерализацию воды на водозаборе.

Максимальная минерализация воды на водозаборе (при $t \to \infty$) равна полусумме минерализаций пресной и соленой вод

$$C_{max} = \frac{C_1 + C_0}{2}. \qquad (4)$$

Схема последовательного поступления соленых вод к водозабору и кривая изменения минерализации отбираемой воды представлены на рис. 22.

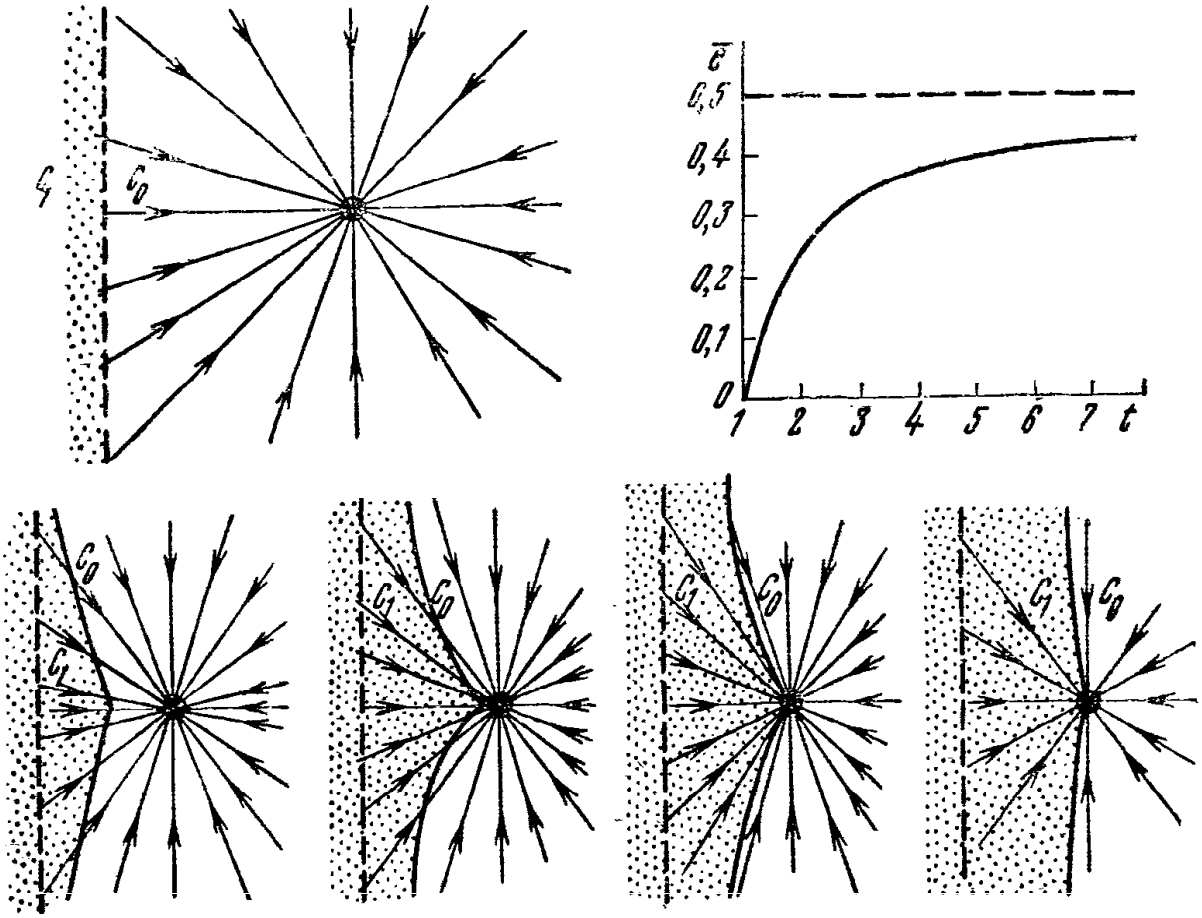


Рис. 22. Схема последовательного поступления соленых вод к водозабору в неограниченном пласте в условиях бассейна и типовая кривая изменения минерализации воды на водозаборе

Интересно, что такой же конечный результат будет при расположении водозабора в области соленых вод: подтягивание пресных вод уменьшает минерализацию воды на водозаборе от C_1 до предельной величины, характеризуемой выражением (4). Формула для этого случая преобразуется к виду

$$C = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T}{t}}, \qquad (5)$$

откуда видно, что при $t \to \infty$.

$$C = \frac{C_0 + C_1}{2}.$$

При наличии переходной зоны от пресных вод к соленым минерализация воды на водозаборе находится из выражения

$$C = C_0 + \sum_{1}^{n} \frac{C_n - C_{n-1}}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_n}{t}}, \qquad (6)$$

где n — число полос, составляющих переходную зону и область соленых вод; $T_п$ — время подтягивания к водозабору n-ой полосы соленых вод.

Число членов ряда в формуле (6), которое необходимо брать в расчет при вычислении минерализации, определяется числом полос солоноватых вод, подтянувшихся к водозабору и участвующих в смешении на данный момент времени.

Так, при $T_1 < t < T_2$ действительным является только первый член суммы Σ, т. е. в этом интервале времени будут смешиваться только воды C_0 и C_1; воды с другими минерализациями за этот период еще не успевают подтянуться к водозабору. При $T_2 < t < T_3$ смешиваются воды C_0, C_1, C_2 и действительны уже два первых члена этой суммы. При $T_3 < t < T_4$ смешиваются воды C_0, C_1, C_2 и C_3, действительны три члена суммы и т. д.

Для практических расчетов переходную зону достаточно представить в виде одной или двух полос; в первом случае в формуле (6) принимается $n = 2$ (одна полоса переходной зоны и область соленых вод), во втором случае $n = 3$ (две полосы переходной зоны и область соленых вод). Формула (6) для указанных вариантов записывается в виде

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{t}} + \frac{C_2 - C_1}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_2}{t}} \qquad (7)$$

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{t}} + \frac{C_2 - C_1}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_2}{t}} + \frac{C_3 - C_2}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_3}{t}}. \qquad (8)$$

Наличие переходной зоны не влияет на значение предельной минерализации (при $t \to \infty$), которая, как и при отсутствии переходной зоны, равна полусумме минерализаций пресной и соленой вод.

Наличие переходной зоны существенно сказывается в начальные периоды смешения; при этом минерализация отбираемой воды, рассчитанная с учетом переходной зоны, меньше, чем минерализация, рассчитанная без учета переходной зоны.

Пример. Водоносный горизонт, представленный песками мощностью $h = 20$ м и пористостью $n_0 = 0{,}1$, содержит пресные и соленые воды. На расстоянии 500 м от границы раздела запроектирован водозабор произ-

водительностью $Q = 3000$ м³/сут. Минерализация пресных вод 0,5 г/л. Переходная зона от пресных вод к соленым имеет ширину 500 м, в ее пределах минерализация возрастает от 1 до 5 г/л. Дать прогноз изменения минерализации воды на водозаборе на срок 20 лет (7300 сут).

Выполним прогноз для двух случаев: без учета и с учетом переходной зоны. В первом случае минерализацию соленых вод в пределах всей площади, включая переходную зону, принимаем одинаковой и равной 5 г/л, т. е. переходная зона в первом случае не учитывается. Во втором случае рассмотрим два варианта: 1) переходная зона моделируется одной полосой шириной 500 м со средней минерализацией 2,5 г/л; 2) переходная зона моделируется двумя полосами шириной 250 м каждая и средней минерализацией 1,5 г/л в первой полосе и 3,5 г/л во второй полосе; минерализация соленых вод за пределами переходной зоны в каждом из этих вариантов равна 5 г/л.

1. По формуле (3) главы IV найдем время прорыва к водозабору солоноватых и соленых вод с отметок 500, 750 и 1000 м.

$$T = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 20}{3000} \cdot 500^2 \approx 520 \text{ сут};$$

$$T = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 20}{3000} \cdot 750^2 \approx 1150 \text{ сут};$$

$$T = \frac{3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 20}{3000} \cdot 1000^2 \approx 2100 \text{ сут}.$$

2. По формуло (3) рассчитаем минерализацию воды на водозаборе без учета переходной зоны (первый случай) на моменты времени $t = 730$, 1460, 2190, 2920, 3650 и 7300 сут после начала работы водозабора. Исходные данные: $T = 520$ сут, $C_0 = 0{,}5$ г/л, $C_1 = 5$ г/л. Результаты расчетов приведены ниже.

Расчет минерализации без учета переходной зоны (первый случай)

t, сут	0	730	1460	2190	2920	3650	7300	∞
C, г/л	0,5	1,3	1,83	2,0	2.12	2,2	2,35	2,75

3. Расчет минерализации на указанные моменты времени с учетом переходной зоны (второй случай) выполним по формуле (7) для первого варианта и по формуле (8) для второго.

Исходные данные 1 варианта: $C_0 = 0{,}5$ г/л, $C_1 = 2{,}5$ г/л, $C_2 = 5$ г/л, $T_1 = 520$ сут, $T_2 = 2100$ сут.

При $t < T_2$ на водозаборе смешиваются пресные C_0 и солоноватые воды C_1 переходной зоны, соленые воды C_2 за это время к водозабору еще не подтянулись; расчет минерализации ведется с использованием только первых двух членов формулы (7) или, что то же, по формуле (4)

$$t = 730 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{2{,}5 - 0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{730}} = 0{,}86 \text{ г/л};$$

$$t = 1460 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{2{,}5 - 0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{1460}} = 1{,}1 \text{ г/л}.$$

При $t > T_2$ на водозаборе смешиваются воды C_0, C_1 и C_2; расчет минерализации выполняется по формуле (7) (с использованием всех трех членов)

$$t = 2190 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{2{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{2190}} + \frac{5-2{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{2100}{2190}} = 1{,}33 \text{ г/л};$$

$$t = 2920 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{2{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{2920}} + \frac{5-2{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{2190}{2920}} = 1{,}66 \text{ г/л}.$$

Результаты расчетов по I варианту

t, сут	0	730	1460	2190	2920	3650	7300	∞
C, г/л	0,5	0,86	1,1	1,33	1,66	1,8	2,13	2,75

Исходные данные II варианта: $C_0 = 0{,}5$ г/л, $C_1 = 1{,}5$ г/л, $C_2 = 3{,}5$ г/л, $C_3 = 5$ г/л, $T_1 = 520$ сут, $T_2 = 1150$ сут, $T_3 = 2100$ сут. Для расчета минерализации используется формула (8).

При $t < T_2$ на водозаборе смешиваются воды C_0 и C_1; расчет выполняется с использованием только первых двух членов формулы (8) или, что то же, по формуле (4).

$$t = 730 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{1{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{730}} = 0{,}68 \text{ г/л}.$$

При $t < T_3$ смешиваются воды C_0, C_1 и C_2; расчет минерализации осуществляется по первым трем членам формулы (8) или, что то же, по формуле (8)

$$t = 1460 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{1{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{1460}} + \frac{3{,}5-1{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{1150}{1460}} = 1{,}09 \text{ г/л}.$$

При $t > T_3$ на водозаборе смешиваются воды C_0, C_1, C_2 и C_3; расчет ведется по полной формуле (8) с использованием всех четырех ее членов

$$t = 2190 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{1{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{2190}} + \frac{3{,}5-1{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{1150}{2190}} +$$

$$+ \frac{5-3{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{2100}{2190}} = 1{,}49 \text{ г/л};$$

$$t = 2920 \text{ сут}$$

$$C = 0{,}5 + \frac{1{,}5-0{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{520}{2920}} + \frac{3{,}5-1{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{1150}{2920}} +$$

$$+ \frac{5-3{,}5}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{2100}{2920}} = 1{,}69 \text{ и т. д.}$$

Результаты расчетов по II варианту

t, сут	0	730	1460	2190	2920	3650	7300	∞
C, г/л	0,5	0,68	1,09	1,49	1,69	1,83	2,13	2,75

Из примера следует, что учет переходной зоны значительно уменьшает прогнозируемую минерализацию отбираемой воды в течение первой половины периода эксплуатации (до 3500—4000 сут); в дальнейшем различие в минерализациях, рассчитанных без учета и с учетом переходной зоны, становится меньше. Отметим также, что более детальный учет изменения минерализации переходной зоны (вариант II) мало сказывается на результатах расчета по сравнению с более грубой схематизацией переходной зоны (вариант I). Это обстоятельство подтверждает сделанный ранее вывод о том, что в практических расчетах переходную зону можно схематизировать в виде одной или двух полос с соответствующими средними минерализациями в пределах этих полос.

Круговая граница соленых вод

Круговая линза пресных вод (минерализация C_0) радиусом R окружена солеными водами с минерализацией C_1. Водозабор расположен в точке O_1, удаленной от центра линзы 0 на расстояние b (рис. 23).

Используя результаты решения аналогичной задачи для контура вода — нефть [30], найдем выражение для определения времени подхода к водозабору частиц соленой воды от контура линзы

$$t = \frac{R^2 + b^2 \cos 2\theta - 2b\sqrt{R^2 - b^2 \sin^2\theta}\cos\theta}{B}, \qquad (9)$$

где

$$B = \frac{Q}{\pi h n_0}$$

Время прорыва соленой воды к водозабору по кратчайшему расстоянию $O'A$ ($< \theta = 0°$) равно

$$T_{\min} = \frac{\pi h n_0}{Q}(R - b)^2. \qquad (10)$$

Время подхода к водозабору наиболее удаленной от него частицы соленой воды B, расположенной по контуру линзы ($< \theta = 180°$), определяется по формуле

$$T_{\max} = \frac{\pi h n_0}{Q}(R + b)^2. \qquad (11)$$

Для расчета изменения минерализации воды на водозаборе нами получена следующая зависимость:

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi}\arccos\frac{R^2 - b^2 - Bt}{2b\sqrt{Bt}}. \qquad (12)$$

Смешение пресных и соленых вод на водозаборе начнется с момента времени $t = T_{min}$ и будет продолжаться до момента времени $t = T_{max}$. Следовательно, выражение (13) главы III как уравнение смешения будет действительно в интервале времени $T_{min} < t < T_{max}$. Подставив в (12) значения T_{min} и T_{max}, из выражений (9) и (11) найдем, что минерализация воды на водозаборе соответственно этому интервалу времени будет изменяться в пределах $C_0 \leqslant C \leqslant C_1$. При $t \geqslant T_{max}$ водозабор полностью засолится. Определив по формуле (11) время T_{min} и подставляя в (12) значения $t > T_{min}$, найдем минерализацию воды на водозаборе для времени в интервале $T_{min} < t < T_{max}$.

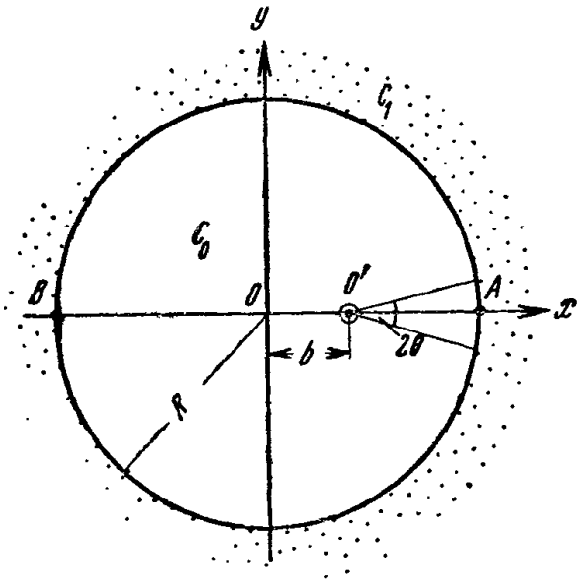


Рис. 23. Схема круговой линзы пресных вод

Наличие переходной зоны учитывается указанным выше способом. Минерализация отбираемой воды будет определяться выражением

$$C = C_0 + \sum_1^n \frac{C_n - C_{n-1}}{\pi} \times \times \arccos \frac{R_n^2 - b^2 - Bt}{2b\sqrt{Bt}}. \quad (13)$$

Если переходную зону представить в виде одной круговой полосы со средней минерализацией воды C_1, за которой расположена область соленых вод с минерализацией C_2, то формула (13) примет вид

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \frac{R_1^2 - b^2 - Bt}{2b\sqrt{Bt}} + \frac{C_2 - C_1}{\pi} \arccos \frac{R_2^2 - b^2 - Bt}{2b\sqrt{Bt}}, \quad (14)$$

где R_1 — радиус линзы пресных вод с минерализацией C_0; R_2 — радиус линзы, включающей пресные воды C_0 и солоноватые воды переходной зоны C_1.

Смешение на водозаборе пресных вод C_0 и солоноватых вод переходной зоны C_1 начнется после того, как к водозабору подтянутся солоноватые воды по кратчайшему расстоянию. Когда к водозабору подтянутся солоноватые воды с противоположной стороны (по наиболее длинному пути), линза пресных вод будет полностью сработана.

Полоса пресных вод

Пресные воды распространены в виде полосы, к которой с боков примыкают соленые воды с минерализациями C_1 и C_2

(рис. 24, *а*). Асимметрично относительно границ полосы расположен водозабор, работающий с постоянным дебитом Q. Пусть T_1 и T_2 — время подтягивания к водозабору соленых вод C_1 и C_2. Для определенности примем, что водозабор расположен ближе к границе C_1, чем к границе C_2, и поэтому $T_1 < T_2$. Значения T_1 и T_2 находятся по формуле (3) главы IV подстановкой в нее соответствующих расстояний от водозабора до границ соленых вод C_1 и C_2. При $t < T_1$ соленые воды еще не успели подтянуться к водозабору. В интервале времени $T_1 < t < T_2$ на водозаборе происходит смешение пресных вод C_0 и соленых вод C_1; прогноз

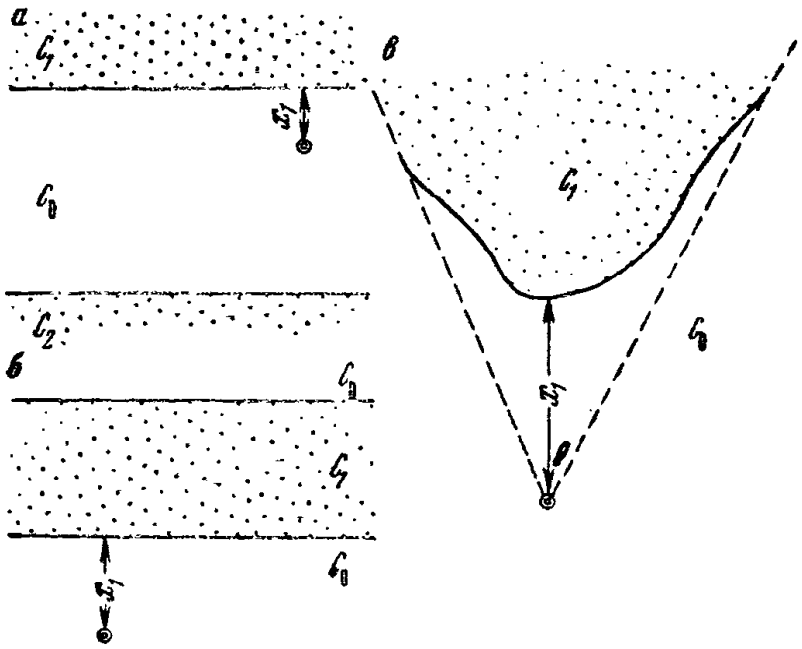


Рис. 24. Схема контактирования пресных и соленых подземных вод в плане

а — полоса пресных вод среди соленых; *б* — полоса соленых вод среди пресных; *в* —«клин» соленых вод

минерализации воды до момента времени $t = T_2$ производится по формуле (3). При $t > T_2$, т. е. после подтягивания к водозабору соленых вод C_2, в смешении участвуют пресные воды C_0 и соленые воды C_1 и C_0. В этом случае для прогноза изменения минерализации воды на водозаборе на моменты времени $t > T_2$ может быть использована формула

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{t}} + \frac{C_2 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_2}{t}}. \quad (15)$$

По мере расширения фронта поступления соленых вод C_1 и C_2 к водозабору минерализация отбираемой воды будет расти и в конечном итоге (при $t \to \infty$) достигнет максимального значения

$$C_{max} = \frac{C_1 + C_2}{2}.$$

Если срок эксплуатации водозабора меньше времени подтягивания соленых вод от дальней границы, то прогноз качества

отбираемой воды производится с учетом подтягивания соленых вод только от ближней границы с использованием формулы (13).

Другие схемы контактирования пресных и соленых вод

Рассмотрим случай, когда соленые воды располагаются на площади в виде вытянутой полосы (рис. 24, *б*). Ширина полосы l, минерализация соленых вод C_1. По обе стороны от полосы соленых вод развиты пресные воды с минерализацией C_0. Водозабор находится на расстоянии x от границы соленых вод.

Во время работы водозабора от ближней границы полосы соленых вод формируется «язык» соленых вод, движущийся к водозабору. Со временем от дальней границы полосы также формируется «язык», но пресных вод, который вторгается в соленые воды и также движется к водозабору. Таким образом, сначала к водозабору прорываются соленые воды, а затем пресные, развитые по другую сторону полосы соленых вод. В соответствии с этим минерализация воды на водозаборе сначала будет увеличиваться, а затем после прорыва пресных вод начнет уменьшаться. Время начала подсоса соленых вод T_1 и прорыва пресных вод T_2 определяется по формуле (3) главы IV подстановкой в нее соответственно расстояний x_1 и $(x_1 + l)$. После того как соленые воды подтянутся к водозабору и до прорыва пресных вод минерализация отбираемой воды будет изменяться согласно формуле (3). Минерализация воды на водозаборе достигнет максимального значения к моменту прорыва пресных вод, т. е. $t = T_2$. Это значение минерализации находится по формуле

$$C_{max} = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{T_2}} \qquad (16)$$

или

$$C_{max} = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \frac{x_1}{x_1 + l}. \qquad (17)$$

После прорыва пресных вод (при $t > T_2$) минерализация воды начнет уменьшаться и характер ее изменения будет характеризоваться зависимостью

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{t}} - \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_2}{t}}. \qquad (18)$$

При $t \to \infty$ минерализация будет равна C_0.

Если соленые воды развиты на площади в виде вытянутого в сторону водозабора выступа или клина (рис. 24, *в*), то максимальную минерализацию воды на водозаборе после прорыва соленых вод можно приближенно оценить следующим образом. Из точки расположения водозабора, как из центра, проводятся две линии «тока», охватывающие этот «выступ» (клин) соленых вод (см. рис. 24, *в*). Графически определяется угол θ, включающий «выступ» соленых вод. В условиях плоско-радиального течения соленые воды будут поступать к водозабору в пределах этого

центрального угла. Максимальная минерализация воды на водозаборе, соответствующая поступлению соленых вод в водозабор через весь угол θ, равна

$$C_{max} = C_0 + \frac{\theta}{2\pi}(C_1 - C_0). \quad (19)$$

Время начала поступления соленых вод определяется по формуле (3) главы IV.

Условия естественного потока

Анализ структуры потока к водозабору в условиях естественного движения подземных вод показал, что движение подземных вод к водозабору происходит только в пределах его области питания, ограниченной нейтральной линией тока. Поэтому в условиях естественного потока подтягивание соленых вод к водозабору возможно лишь, если зона соленых вод захватывается областью питания водозабора. Если соленые воды не попадают в область питания водозабора, подтягивания соленых вод к водозабору не произойдет (см. рис. 14). Следовательно, возможность подтягивания соленых вод к водозабору определяется взаимоположением границ соленых вод и области питания водозабора. Поэтому для выяснения возможности подтягивания соленых вод прежде всего необходимо рассчитать размеры области питания водозабора, используя для этого формулы (6) и (7) главы III. В случае, когда соленые воды захватываются областью питания водозабора, характер изменения минерализации воды на водозаборе будет разный в зависимости от положения границы соленых вод внутри области питания. Рассмотрим особенности подтягивания соленых вод к водозабору и изменения минерализации отбираемой воды для основных типовых схем.

1. Пусть прямолинейная граница соленых вод располагается внутри области питания на расстоянии x_1 от скважины вверх по потоку (рис. 25, *а*). В этом случае движение естественного потока и соленых вод к скважине совпадет.

Расход соленых вод q_c в дебите скважины равен

$$q_c = \frac{q}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{y}{x_1} + 2v_e y. \quad (20)$$

Доля расхода соленых вод в общем дебите водозабора увеличивается по мере расширения поступающего в скважину фронта соленых вод, т. е. с ростом значений y.

Подставляя q_c в равенство (11) главы II, получим выражение, позволяющее рассчитать минерализацию отбираемой воды в зависимости от количества поступающей в скважину соленой воды

$$C = C_0 + (C_1 - C_0)\left(\frac{1}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{y}{x_1} + \frac{2v_e y}{q}\right). \quad (21)$$

Смешение вод начнется, когда к скважине подтянется ближайшая к ней частица соленой воды границы раздела, лежащая на главной линии тока — оси x. Максимальная минерализация насту-

пит, когда скважины достигнут крайние частицы D и D_1 границы раздела внутри области питания. Ординаты этих частиц ($\pm y$) находятся подбором из уравнения (7а) главы III подстановкой в него $\bar{x} = \bar{x}_1$ или из графика $\bar{y} = f(\bar{x})$, представленного на рис. 5 и построенного на основе этого уравнения.

Применительно к рассматриваемой схеме фильтрационного течения (рис. 25, *а*) минерализация отбираемой воды после начала

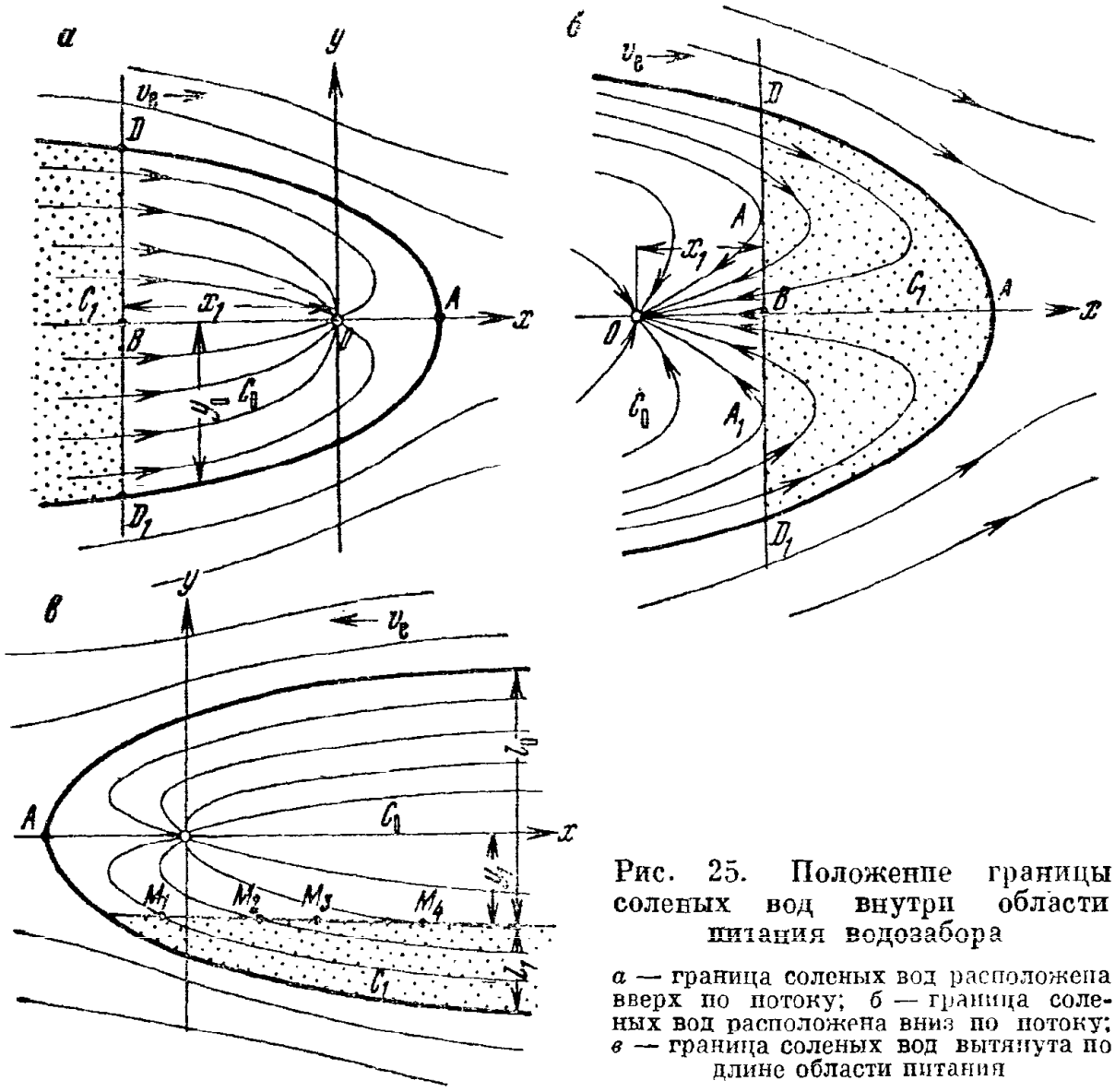


Рис. 25. Положение границы соленых вод внутри области питания водозабора

а — граница соленых вод расположена вверх по потоку; *б* — граница соленых вод расположена вниз по потоку; *в* — граница соленых вод вытянута по длине области питания

подсоса будет непрерывно возрастать и в конечном итоге, когда все пресные воды, заключенные в области питания, будут «сработаны», минерализация отбираемой воды станет равной минерализации соленой воды C_1. Время начала подсасывания соленых вод определяется по формуле (2) главы IV, а время подтягивания к водозабору других точек границы раздела — по формуле (1) главы IV. При наличии переходной зоны от пресных вод к соленым прогнозирование качества воды выполняется по формуле

$$C = C_0 + \sum_{1}^{n} (C_n - C_{n-1}) \left(\frac{1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{y}{x_n} + \frac{2 v_e y}{q} \right). \qquad (22)$$

Минерализация отбираемой воды при наличии переходной зоны меняется от C_0 до C_n.

II. Граница соленых вод расположена внутри области питания вниз по потоку (рис. 25, *б*). В этом случае направление естественного потока противоположно движению соленых вод к скважине. Поскольку зона соленых вод внутри области питания ограничена и локализована, с течением времени соленые воды будут полностью вытеснены, и водозабор после некоторого «засоления» будет снова давать пресную воду. Однако движение соленых вод к скважине, а следовательно, и изменение минерализации отбираемой воды в этом случае являются сложными и своеобразными. Подсос соленых вод произойдет после того, как к скважине подтянется ближайшая к ней частица соленой воды B. С этого момента минерализация воды в скважине начнет возрастать по мере увеличения притока соленых вод и достигнет максимума при подтягивании к скважине частиц A и A_1 границы раздела. Отрезок AA_1 характеризует максимальную ширину фронта поступления соленых вод в скважину при данном положении границы раздела. Точки A и A_1 являются точками касания линии раздела пресных и соленых вод с линией тока, которую условно назовем граничной. Для каждого положения границы раздела будет своя граничная линия тока. Эта граничная линия тока разделяет область питания водозабора на две зоны: 1) внутреннюю (I), где линии тока проходят только через пресные воды, и 2) внешнюю (II), где линии тока проходят через пресные и соленые воды. Из внутренней зоны в скважину поступает только пресная вода, из внешней зоны — сначала пресная, затем соленая и, наконец, одновременно соленая и пресная вода, причем доля соленой воды в дебите скважины будет постепенно уменьшаться. В соответствии с таким характером поступления соленых вод минерализация отбираемой воды, достигнув максимума, начнет уменьшаться, поскольку за пределами отрезка AA_1 соленые воды будут вытесняться пресными и через участок AA_1 в скважину вместе с соленой водой начнет поступать пресная. С течением времени соленые воды будут полностью вытеснены пресными и минерализация отбираемой воды станет равной минерализации пресной воды.

Ординаты точек A и A_1 определяются по формуле

$$y_{A,\,A_1} = \pm \sqrt{\frac{q}{2\pi v_e} x_1 - x_1^2}. \qquad (23)$$

Выражение (23) получено из условия равенства нулю в точке $(x_1,\ y_1)$ составляющей скорости фильтрации v_x. Формула (23) показывает, что при разных расстояниях границы соленых вод от водозабора размеры участка AA_1 будут неодинаковы. С удалением границы соленых вод от скважины значение ординаты y_A растет, достигает при $x_1 = 0{,}5\,x_A$ максимума $y_{A_{max}} = \frac{x_A}{2}$

и затем убывает по мере дальнейшего удаления границы соленых вод и ее приближения к водораздельной точке A.

Минерализация воды находится из формулы

$$C = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi}\left(\operatorname{arctg}\frac{y}{x_1} + \frac{2\pi v_e y}{q}\right), \qquad (24)$$

где выраженный через $\operatorname{arctg}\frac{y}{x_1}$ угол берется из второй четверти.

Максимальная минерализация, наступающая при подтягивании к скважине частиц границы раздела A и A_1, определяется из выражения

$$C_{max} = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi}\left(\operatorname{arctg}\sqrt{\frac{q}{2\pi v_e x_1} - 1} + \frac{2\pi v_e x_1}{q}\sqrt{\frac{q}{2\pi v_e x_1} - 1}\right). \qquad (25)$$

Время наступления максимальной минерализации определяется по времени подтягивания к скважине частиц A (или A_1) границы раздела, которое рассчитывается по формуле (1) главы IV подстановкой в нее значений $x = x_1$ и $y = y_A$.

При наличии переходной зоны прогноз изменения минерализации производится на основе уравнения

$$C = C_n - \sum_{1}^{n}(C_n - C_{n-1})\left(\frac{1}{\pi}\operatorname{arctg}\frac{y}{x_n} + \frac{2v_e y}{q}\right). \qquad (26)$$

Расчет по формуле (26) осуществляется следующим образом. На рис. 13 приведен построенный на основе формулы (1) главы IV график зависимости $\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{y})$, где

$$\bar{t} = \frac{tv_e}{n_0 x_A}, \quad \bar{x} = \frac{x}{x_A}, \quad \bar{y} = \frac{y}{x_A}, \quad x_A = \frac{q}{2\pi v_e}.$$

Параметром этих кривых является расстояние границы соленых вод от водозабора. Начальные точки кривых на указанном графике характеризуют время начала подсасывания соленых вод при разных расстояниях границы раздела от водозабора.

Допустим, требуется определить минерализацию воды на момент времени t_1. Подсчитав $\bar{t}_1$, на указанном графике из точки $\bar{t}_1$ вертикальной оси проводим прямую, параллельную горизонтальной оси координат $\bar{y}$, и находим точки пересечения этой прямой с кривыми. Может оказаться, что прямая $\bar{t} = \bar{t}_1$ пересекает не все кривые, а лишь некоторые из них. Это означает, что если граница соленых вод находится от водозабора на расстоянии, соответствующем параметру непересеченных кривых, то на данный момент времени t_1 эта граница раздела еще не подтянулась к водозабору. По точкам пересечения прямой $\bar{t} = \bar{t}_1$ с кривыми находим (на горизонтальной оси $\bar{y}$) значения ординат точек, подтянувшихся на данный момент к скважине от разных границ раздела. Орди-

наты этих точек характеризуют на данный момент времени ширину фронта поступления соленых вод к водозабору от каждой границы раздела, соответствующей параметру пересеченных кривых. Зная, сколько зон соленых вод участвует в смешении (по числу кривых, пересеченных прямой $\bar{t} = \bar{t}_1$), берем такое же число членов ряда в формуле (26). Подставляя в каждый член ряда соответствующие ему значения x и y и произведя вычисления, найдем минерализацию отбираемой воды на момент времени t_1.

III. Соленые воды внутри области питания водозабора простираются неограниченно вверх и вниз по потоку в виде полосы, примыкающей к границе области питания (см. рис. 25, *в*). Примем для простоты, что граница соленых вод параллельна оси x и располагается на отметке $y = y_1$. Средняя ширина полосы соленых вод l_1. Остальная часть области питания занята пресными водами, простирающимися также в виде полосы, средняя ширина которой l_0.

Время подтягивания соленых вод к водозабору определяется по формуле (1) главы IV путем нескольких последовательных расчетов. Подставляя в формулу (1) главы IV значения координат произвольных точек M_1, M_2, M_3, M_4... границы раздела (см. рис. 25, *в*), рассчитывают время подтягивания этих точек к водозабору. Минимальное время и будет временем начала подсоса соленых вод.

После прорыва соленых вод к водозабору минерализация отбираемой воды будет расти, пока не достигнет постоянного максимального значения, соответствующего максимальному притоку соленых вод. Практически предельные (при $t \to \infty$) притоки пресных и соленых вод к водозабору пропорциональны ширине полос пресных и соленых вод внутри области питания водозабора. В соответствии с этим максимальная минерализация воды на водозаборе равна

$$C_{\max} = \frac{C_0 l_0 + C_1 l_1}{l_0 + l_1}. \qquad (27)$$

Такой же конечный результат (при $t \to \infty$) будет, если полоса соленых вод начинается на некотором удалении от водозабора, но простирается неограниченно вверх по потоку. Различие будет только во времени начала подсоса соленых вод и начальном характере изменения минерализации воды на водозаборе.

ОДИНОЧНЫЙ ВОДОЗАБОР В ПОЛУОГРАНИЧЕННОМ ПЛАСТЕ С КОНТУРОМ ПОСТОЯННОГО НАПОРА

Условия бассейна

Рассмотрим сначала случай, когда соленые воды подтягиваются со стороны контура постоянного напора (реки, берега моря и т. д.). Поверхностные воды и подземные воды, примыкающие к реке, морю в виде полосы, — соленые с минерализацией C_1. Водозабор расположен в области пресных подземных вод с минерализацией

C_0 на расстоянии d от реки. Граница соленых вод проходит на расстоянии x_1 от линии реки, совпадающей с осью y. Взаимосвязь поверхностных и подземных вод совершенная.

Используя функцию тока (13) главы III, получаем выражение для минерализации отбираемой воды

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x_1^2}. \qquad (28)$$

В эту формулу время t не входит, но ширина фронта поступления в водозабор соленой воды, характеризуемая ординатой y, является функцией времени.

Из формулы (28) видно, что минерализация возрастает с увеличением y, т. е. по мере расширения фронта поступления соленой воды в скважину. Максимальная минерализация воды наступит при $t = \infty$ (что соответствует $y = \infty$) и будет равна C_1. Подставляя из (28) выраженное через C_1, C_0 и C значение $\frac{d^2 - y^2 - x^2}{2yd}$ в зависимость (20) главы IV, получим выражение, позволяющее определить время наступления искомой минерализации (C)

$$t = \frac{2\pi n_0 d^2}{q} \left\{ \left(1 - \frac{x_1}{d}\right) - \left[\pi \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} - \arcsin\left(\frac{x_1}{d} \sin \pi \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \right) \right] \times \right.$$

$$\left. \times \operatorname{ctg}\left(\pi \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \right) \right\} \operatorname{cosec}^2 \left(\pi \frac{C - C_0}{C_1 - C_0} \right), \qquad (29)$$

где $0 \leqslant x_1 \leqslant d$.

На рис. 26 представлен рассчитанный по формуле (29) график функции $\bar{t} = f(\bar{C}, x_1)$, характеризующий изменение минерализации воды во времени при разных удалениях границы соленых вод от реки и, следовательно, от водозабора. По оси ординат графика откладывается относительное время

$$\bar{t} = \frac{qt}{\pi n_0 d^2},$$

а по оси абсцисс — относительная минерализация

$$\bar{C} = \frac{C - C_0}{C_1 - C_0}.$$

Величина C изменяется от 0 до 1 соответственно изменениям минерализации от C_0 до C_1. Параметром кривых является отношение $x_1 : d$. Из графика видно, что наибольший рост минерализации наблюдается в начальный период подсасывания соленых вод. В этот период особенно заметно различие в минерализации отбираемой воды, обусловленное разным удалением скважины от границы соленых вод.

При наличии переходной зоны от пресных вод к соленым минерализация отбираемой воды оценивается по формуле

$$C = C_0 + \sum_1^n \frac{C_n - C_{n-1}}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - x_n^2 - y^2}, \qquad (30)$$

где n равно числу полос, имитирующих переходную зону солоноватых вод с минерализациями от C_1 до C_{n-1} плюс зона собственно

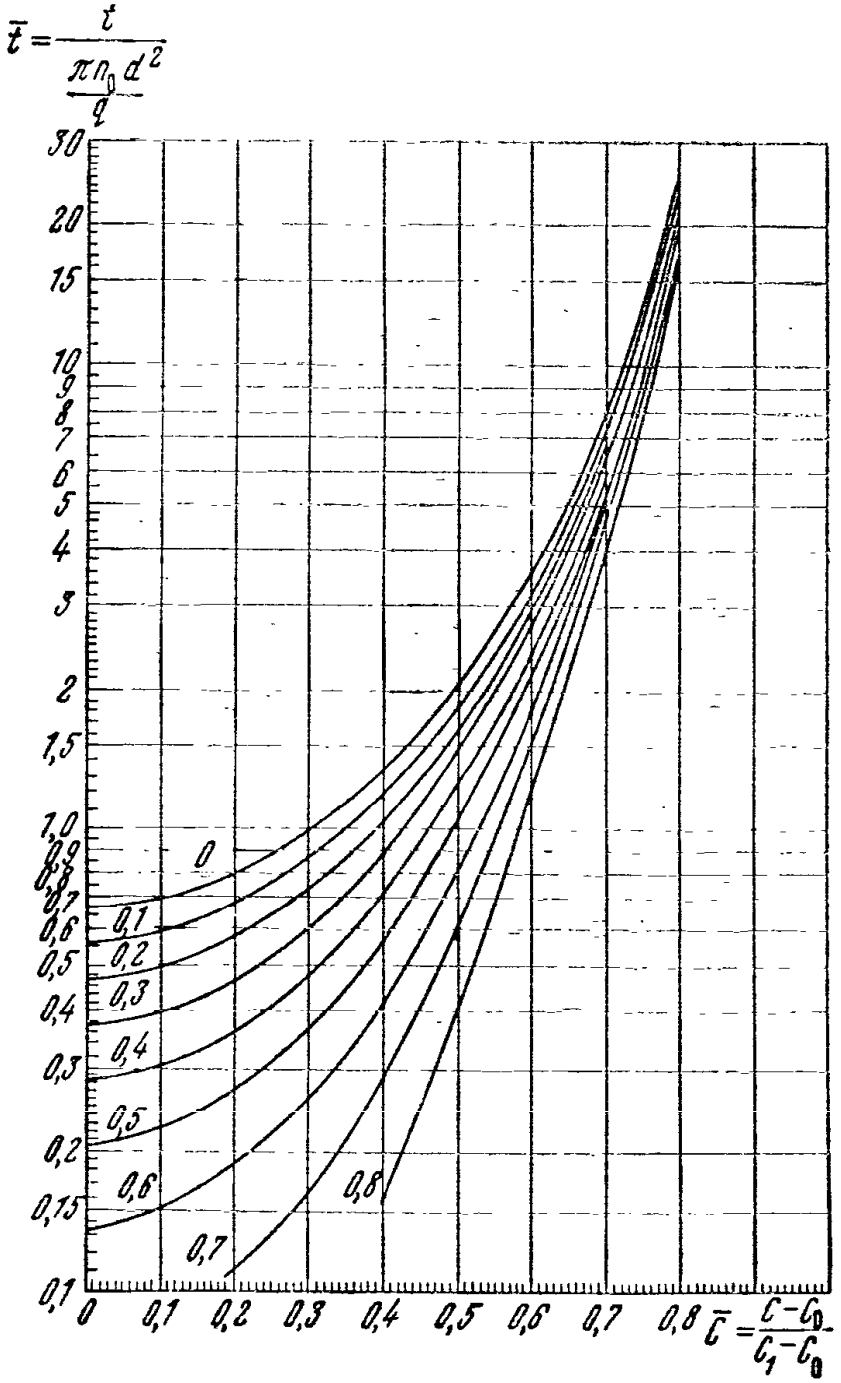


Рис. 26. График зависимости $\bar{t} = f(\bar{C}, \bar{x_1})$ для одиночного водозабора в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора в условиях бассейна при подтягивании соленых вод со стороны контура

соленых вод с минерализацией C_n. Так, при отсутствии переходной зоны ($n = 1$) выражение (30) переходит в (28). При $n = 2$ имеем

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - x_1^2 - y^2} + \frac{C_2 - C_1}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - x_2^2 - y^2}. \qquad (31)$$

Теперь рассмотрим случай подтягивания соленых вод со стороны берега (рис. 27). Водозабор расположен на расстоянии d от реки в полосе пресных подземных вод шириной x_1.

Анализ функции тока свидетельствует о своеобразном характере движения соленых вод к скважине. Ширина фронта соленых вод, движущихся к водозабору, растет, пока не достигнет максимума, а затем постепенно уменьшается. Таким образом, движение соленых вод к водозабору происходит не по всей границе пресных и соленых вод, а только от ограниченного ее участка, размеры которого изменяются во времени, а наибольшая его величина соответствует отрезку AA_1 (см. рис. 27). Длина этого отрезка, т. е. максимальная ширина фронта соленых вод, поступающих в скважину, зависит исключительно от расстояния водозабора до реки и границы соленых вод и не зависит от дебита водозабора. Координаты $y_{A,\,A_1}$ концов этого отрезка определяются по формуле

$$y_{A,\,A_1} = \pm \sqrt{x_1^2 - d^2}. \qquad (32)$$

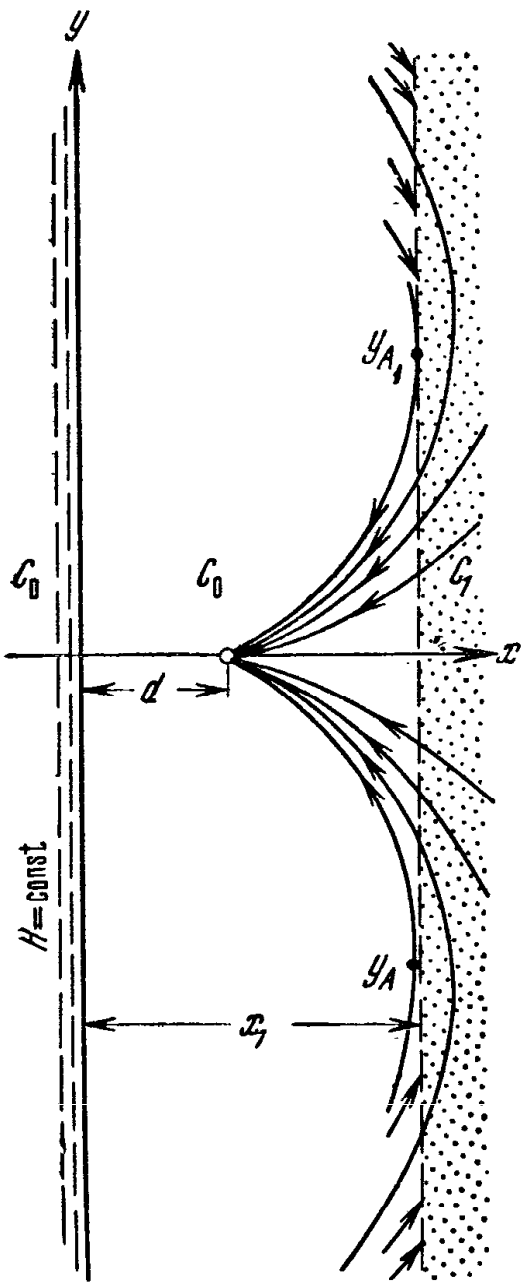


Рис. 27. Схема подтягивания соленых вод со стороны берега к водозабору у реки

Точки $y_{A,\,A_1}$ определяются как точки экстремума линии тока при $x = x_1$ или как точки, в которых горизонтальная составляющая скорости $v_x = 0$ при $x = x_1$.

В пределах участка AA_1 пресные воды вытесняются солеными при их движении к скважине, а за пределами участка AA_1, т. е. при $|y| > y_{A,\,A_1}$, соленые воды вытесняются пресными.

Максимальной ширине фронта соответствует максимальная минерализация отбираемой воды. В дальнейшем фронт поступления соленых вод начинает уменьшаться за счет вытеснения соленых вод пресными и соответственно будет уменьшаться минерализация воды. В конечном итоге при $t = \infty$, что соответствует $y = \infty$, соленые воды полностью вытесняются пресными и минерализация воды станет равной C_0, т. е. происходит самоопреснение отбираемой воды.

Минерализация воды в зависимости от ширины фронта соленых вод, определяемого ординатой y, равна

$$C = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x_1^2}, \tag{33}$$

где $\varphi = \operatorname{arctg} \frac{2yd}{d^2 - y^2 - x_1^2}$ берется из второй четверти. Подставляя значение $y = y_A$ в (33) главы IV, найдем максимальную минерализацию отбираемой воды

$$C_{\max} = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \left(- \frac{d}{\sqrt{x_1^2 - d^2}} \right). \tag{34}$$

Время начала подсасывания соленой воды, т. е. время ее движения по главной линии тока — оси x, находится по формуле (21) главы IV.

Время движения соленой воды по другим линиям тока определяется по формуле (20) главы IV. При ее использовании надо соблюдать следующие условия: 1) при $y < \sqrt{x_1^2 - d^2}$ значения обоих arcsin берутся из второй четверти; 2) при $y > \sqrt{x_1^2 - d^2}$ значение первого arcsin берется из второй четверти, а второго arcsin из первой четверти.

Выразив с помощью выражения (33) значение $\frac{d^2 - y^2 - x_1^2}{2yd}$ через C, C_1 и C_0 и подставляя его в (20) главы IV, получим зависимость вида $t = \mathrm{f}(C, x)$, позволяющую рассчитать время поступления искомой минерализации C

$$t = \frac{2\pi n_0 d^2}{q} \left\{ 1 - \frac{x_1}{d} - \operatorname{ctg} \left(\pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \right) \times \right.$$

$$\left. \times \left[\pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} - \arcsin \left(\frac{x_1}{d} \sin \pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \right) \right] \right\} \operatorname{cosec}^2 \left(\pi \frac{C_1 - C_0}{C_1 - C_0} \right). \tag{35}$$

При пользовании формулой (35) следует иметь в виду:

1) с изменением C от C_0 до $C_{\max}$ угол, определяемый через arcsin, берется из второй четверти

$$\frac{\pi}{2} < \arcsin \left(\frac{x_1}{d} \sin \pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \right) < \pi;$$

2) при значении $C = C_{\max}$

$$\arcsin \left(\frac{x_1}{d} \sin \pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \right) = \frac{\pi}{2};$$

3) с изменением минерализации от $C_{\max}$ до C_0 угол, определяемый через arcsin, берется из первой четверти

$$0 < \arcsin \left(\frac{x_1}{d} \sin \pi \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0} \right) < \frac{\pi}{2}.$$

Для облегчения расчетов на основе формулы (35) построен график зависимости $\bar{t} = f(\bar{x}_1, \bar{C})$, где

$$t = \frac{qt}{2\pi n_0 d^2}, \quad \bar{x}_1 = \frac{x_1}{d}, \quad \bar{C} = 1 - \frac{C_1 - C}{C_1 - C_0}.$$

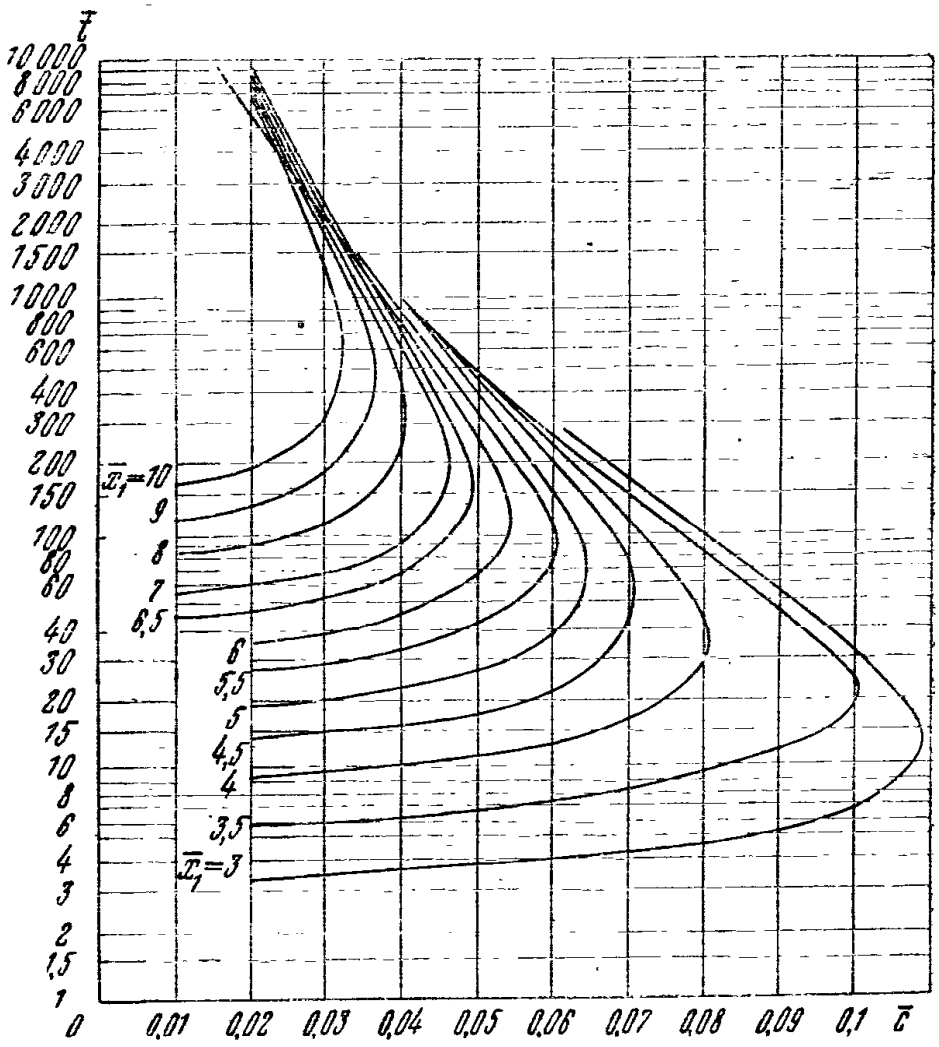


Рис. 28. График зависимости $\bar{t} = f(\bar{C}, x)$ для одиночного водозабора у реки при подтягивании соленых вод со стороны берега

По оси абсцисс откладывается относительная минерализация C, по оси ординат относительное время t (рис. 28), параметром кривых является величина x_1, характеризующая расстояние от водозабора до границы соленых вод.

Условия естественного потока подземных вод

Рассмотрим случай, когда поток направлен от реки, что характерно для подрусловых линз. Если соленые воды подтягиваются со стороны реки, то минерализация отбираемой воды в зависимости от ширины фронта поступления соленой воды определяется по формуле

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi}\left(\operatorname{arctg}\frac{2yd}{d^2 - y^2 - x_1^2} + \frac{2\pi v_e y}{q}\right). \qquad (36)$$

В момент прорыва соленой воды к скважине $y = 0$ и $C = C_0$. По мере расширения фронта соленой воды, поступающей в скважину от границы раздела, т. е. с увеличением ординаты y, минерализация воды также будет расти. Когда ширина фронта поступления соленой воды станет равной ширине области питания, минерализация отбираемой воды достигнет максимального значения и станет равной минерализации соленой воды, т. е. водозабор полностью «засолится». Качественно изменение минерализации здесь не отличается от изменения минерализации в аналогичном случае для водозабора в неограниченном потоке.

Время начала подсоса соленых вод вдоль главной оси тока — оси x определяется по формуле (21) главы IV.

Процесс подтягивания соленых вод с противоположной стороны (со стороны берега) полностью аналогичен этому процессу в случае водозабора в неограниченном потоке, когда движение соленых вод к скважине противоположно направлению естественного потока. Подсос соленых вод произойдет лишь тогда, когда область соленых вод попадет в область питания водозабора. Если это имеет место, то соленые воды подтянутся к водозабору, однако подсос соленых вод будет носить ограниченный характер. Максимальная ширина фронта поступления соленых вод ограничена отрезком AA_1 и приближенно может быть определена по формуле (23) для неограниченного пласта.

Изменение минерализации прогнозируется по формуле

$$C = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\pi}\left(\operatorname{arctg}\frac{2yd}{l^2 - y^2 - x_1^2} + \frac{2\pi w_e y}{q}\right), \qquad (37)$$

где arctg берется из второй четверти.

Подставляя в (37) $y = y_A$, получим максимальную минерализацию отбираемой воды. В дальнейшем минерализация воды начнет убывать, пока не достигнет минерализации пресной воды.

Следует отметить, что задача о движении загрязненной воды в полуограниченном потоке рассматривалась независимо от нас Е. Л. Минкиным, Н. Н. Веригиным и В. С. Саркисяном [23, 50].

Самоопреснение отбираемой воды при работе берегового водозабора

Как было установлено выше, при подтягивании соленых вод со стороны берега к водозабору у реки минерализация отбираемой воды после подсоса соленых вод сначала возрастает, а затем после достижения максимума постепенно уменьшается до минерализации пресной воды. Происходит как бы самоопреснение отбираемой воды. Рассмотрим, насколько быстро протекает этот процесс, при каком расположении водозабора относительно границы пресных и соленых вод самоопреснение будет более интенсивным, на каком расстоянии от границы пресных и соленых вод целесообразнее располагать водозабор с учетом самоопреснения отбираемой воды.

Процесс самоопреснения по существу является отражением естественного увеличения запасов пресных подземных вод (магазинирования), происходящего под влиянием работы берегового водозабора. Опреснение отбираемой воды обусловлено вторжением пресных поверхностных вод в соленые и оттеснением последних. Таким образом, при работе берегового водозабора за счет перевода поверхностных вод в подземные увеличивается площадь пресных подземных вод, в результате происходит пополнение их запасов.

Рассмотрим процесс опреснения на примере берегового водозабора в бассейне подземных вод при расположении водозабора у реки и в удалении от границы соленых вод $\left(\frac{x_1}{d}=5\right)$, в середине полосы пресных вод $\left(\frac{x_1}{d}=2\right)$ и в небольшом удалении от границы соленых вод $\left(\frac{x_1}{d}=1{,}5\right)$. Примем дебит водозабора $Q=10\,000$м³/сут, мощность водоносного пласта $h=20$ м, активную пористость $n_0=0{,}1$, расстояние от границы соленых вод до реки $x_1=1000$ м. Результаты расчетов приведены в табл. 10.

Таблица 10

$\frac{x_1}{d}$	Время начала подсасывания T соленой воды, сут	Время наступления максимальной минерализации t_A, сут	Время, за которое минерализация воды уменьшится и составит 75 % от максимальной t, сут	Максимальная минерализация (при $C_0=0{,}5$ г/л и $C_1=5{,}5$ г/л)
5	940	3400	17 550	1,75
2	210	1020	7 000	2,24
1,5	80	565	5 000	2,96

Данные табл. 10 показывают, что с приближением скважин к границе соленых вод быстрее подсасывается соленая вода и возрастает величина максимальной минерализации, но интенсивнее протекает процесс самоопреснения.

При $x_1>2d$, как видно из формулы (32), $y_A\approx x_1$. Таким образом, если граница соленых вод находится от реки на расстоянии, в несколько раз превышающем расстояние водозабора от реки, можно считать, что соленая вода от границы раздела поступает в скважину через участок AA', ширина которого приблизительно равна удвоенному расстоянию x_1 от границы раздела до реки.

Используя формулу (34), можно определить расстояние, на котором следует расположить водозабор от границы соленых вод, чтобы качество отбираемой воды не ухудшилось сверх допустимой нормы $C_д$

$$l=x_1\left[1-\sin\left(\pi\frac{C_1-C_д}{C_1-C_0}\right)\right]. \qquad (38)$$

Так, для значений $C_0 = 0{,}5$ г/л, $C_1 = 5{,}5$ г/л, $C_д = 1{,}5$ г/л и $x_1 = 500$ м рассчитанная по формуле величина $l = 210$ м.

Таким образом, вытеснение соленых вод пресными и самоопреснение отбираемой воды в целом происходит довольно медленно, тем не менее этот процесс, особенно при длительном и большом водоотборе, может существенно изменить гидрохимическую обстановку в районе водозабора.

ПРОГНОЗ КАЧЕСТВА ВОДЫ В СЛУЧАЕ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ СКВАЖИН

I. Решения, позволяющие прогнозировать изменение минерализации воды одиночного водозабора, могут быть использованы и для концентрированного площадного водозабора, состоящего из группы скважин, при условии, что он удален от границы соленых вод на расстояние, превышающее в 3—5 раз его наибольшие поперечные размеры. В этом случае площадной водозабор может быть заменен одиночной эквивалентной скважиной («большим колодцем»), расположенной в центре водозабора с дебитом, равным суммарному дебиту всех его скважин.

Движение жидкости к «большому колодцу» будет происходить, так же как в рассмотренных выше случаях к одиночной скважине. Однако засоление группы скважин существенно отличается от засоления одиночной скважины. Рассмотрим это на примере неограниченного бассейна.

В одиночной скважине после прорыва соленых вод будет постоянно происходить смешение пресных вод с солеными. В случае площадного водозабора ввиду того, что отдельные скважины будут расположены неодинаково относительно границы соленых вод (одна часть скважин расположена ближе, другая — дальше), характер поступления соленых вод к разным скважинам будет различный. Ближние к границе раздела скважины полностью засолятся и будут давать только соленую воду, центральные скважины — смешанную, а более удаленные — только пресную. Но в целом общая минерализация воды всех скважин будет изменяться примерно так же, как минерализация эквивалентной одиночной скважины («большого колодца»), и в конечном итоге минерализация воды площадного водозабора будет равна полусумме минерализаций пресных и соленых вод.

II. Рассмотрим **линейный ряд скважин большой длины**, расположенный параллельно границе соленых вод и на расстоянии x_1 от нее в условиях неограниченного в плане бассейна ($v_e = 0$). Дебиты всех скважин одинаковые. Для прогноза изменения минерализации воды отдельной скважины ряда получено следующее выражение:

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{e^{tb} - e^{Tb}}{e^{Tb} - 1}}, \qquad (39)$$

где $b = Q_0\pi/hn_0\sigma^2$, σ — расстояние между скважинами в ряду, Q_0 — дебит отдельной скважины ряда, t — текущее время. Входящее в (39) значение T (время начала подсоса соленых вод) определяется по формуле (13) главы IV. Выражение (39) действительно при $t > T$.

При работе линейного ряда в неограниченном бассейне подземных вод характер изменения минерализации качественно такой же, как и для одиночной скважины. Предельная максимальная минерализация воды (при $t \to \infty$), отбираемой отдельной скважиной ряда, как и для одиночного водозабора, равна $C_{max} = \frac{C_1+C_0}{2}$.

При наличии переходной зоны расчет изменения минерализации воды производится по формуле

$$C = C_0 + \sum_1^n \frac{C_n - C_{n-1}}{\pi} \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{e^{tb} - e^{T_n b}}{e^{T_n b} - 1}}, \qquad (40)$$

где

$$T_n = \frac{2n_0 h\sigma^2}{Q_0\pi}\left(\frac{\pi x_n}{\sigma} - 0{,}7\right); \qquad (41)$$

x_n — расстояние от линейного ряда до границы слоя соленой воды с минерализацией C_n. Довольно часто требуется определить время наступления искомой минерализации $C_д$. Для этого зависимость (39) преобразуется к виду

$$t = \frac{n_0 h\sigma^2}{Q_0\pi} \ln\left[e^{Tb} + (e^{Tb} - 1)\operatorname{tg}^2(\pi\bar{C})\right], \qquad (42)$$

где $\bar{C} = \frac{C_д - C_0}{C_1 - C_0}$. Формула (42) после некоторых упрощений (но с сохранением точности расчетов) может быть представлена следующим образом:

$$t = T\left[1 + \frac{\ln \sec(\pi\bar{C})}{\ln \operatorname{ch}(\pi\bar{x})}\right], \qquad (43)$$

где $\bar{x} = x/\sigma$, а величина T определяется по (13) главы IV.

На основе формулы (43) построен график зависимости $\bar{t} = f(\bar{x}, \bar{C})$, изображенный на рис. 29; по оси ординат графика откладывалась величина $\bar{t} = t/T$, по оси абсцисс — величина $\bar{C} = \frac{C_д - C_0}{C_1 - C_0}$, параметром кривых является отношение x/σ.

При работе линейного ряда в неограниченном пласте в условиях потока подземных вод образуется, как уже отмечалось водораздельная линия, отделяющая область питания каждой скважины ряда от остальной части водоносного горизонта. Раз-

меры этой области питания водозабора определяются положением точки перегиба, расположенной внизу по потоку. Если граница соленых вод попадает в область питания водозабора, то в процессе его эксплуатации произойдет подсасывание соленых вод. Этого не будет, если граница соленых вод находится за пределами области питания водозабора.

Таким образом, при выяснении вопроса в возможном подсосе соленых вод необходимо знать размеры области питания и положение точки перегиба. Для описываемого случая (линейный ряд скважин в неограниченном потоке) положение точки перегиба находится по формуле (43) главы III.

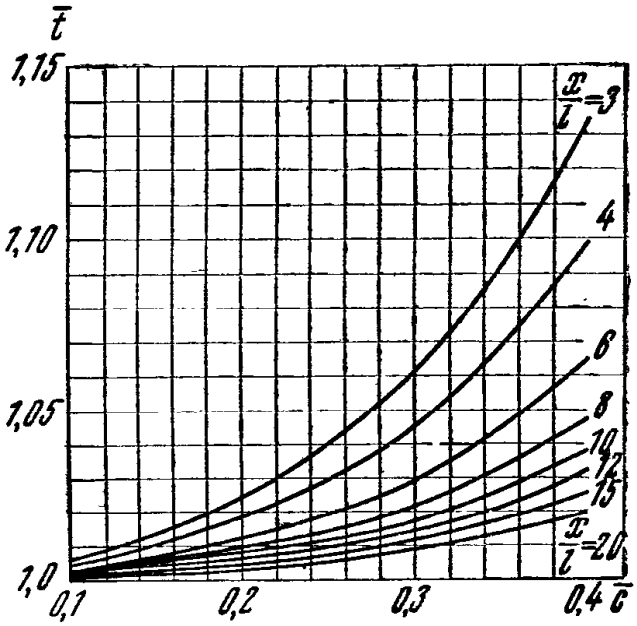


Рис. 29. График зависимости $\bar{t}=f(\bar{C}, \bar{r})$ для линейного ряда скважин в неограниченном пласте

III. Для линейного ряда скважин, расположенного у реки в полосе пресных подземных вод шириной x_1 (в условиях бассейна), время начала подсасывания соленых вод определяется по формуле (25) главы IV. Анализ этой формулы показал, что время подтягивания соленой воды к линейному ряду больше, чем к одиночной скважине, работающей с дебитом, равным дебиту отдельной скважины ряда, и расположенной на таком же расстоянии от реки, что и ряд. С увеличением расстояния между скважинами в ряду время подтягивания соленой воды к ряду приближается ко времени подтягивания ее к одиночной скважине, работающей с тем же дебитом, что и отдельная скважина ряда.

Характер изменения минерализации воды для отдельной скважины ряда такой же, как и для одиночной скважины у реки: минерализация отбираемой воды в начальный период подсасывания соленых вод растет, достигает максимума и затем начинает убывать.

Формулы для прогноза изменения минерализации воды, отбираемой линейным рядом, не приводятся вследствие их громоздкости. Приближенный расчет изменения минерализации можно производить по формуле (39) для ряда в неограниченном бассейне подземных вод. Входящее в выражение (39) время начала подсасывания соленых вод T определяется по формуле (25) главы IV для линейного ряда в полуограниченном бассейне.

Прогноз качества воды, отбираемой линейным водозабором ограниченной длины, может быть осуществлен с помощью графоаналитических методов, разработанных Е. Л. Минкиным [50, 51].

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ПОДТЯГИВАНИЯ СОЛЕНЫХ ВОД СНИЗУ

Во многих случаях пресные подземные воды залегают на соленых водах. Подтягивание соленых вод снизу происходит во много раз быстрее, чем по пласту. Наиболее радикальным способом предотвращения подтягивания соленых вод снизу является одновременный и раздельный отбор пресных и соленых вод — метод спаренных откачек. На эту возможность борьбы с засолением водозабора впервые указал Н. К. Гиринский (1952 г.). Детальные исследования этого вопроса были осуществлены В. Д. Бабушкиным.

I. Подтягивание соленых вод ухудшает качество воды на водозаборе, но если при этом общая минерализация воды и содержание отдельных компонентов не превышают допустимой нормы, водозабор может работать в условиях подтягивания соленых вод.

Поэтому прежде всего необходимо оценить максимальную минерализацию воды, соответствующую полному отбору и смешению пресных и соленых вод, содержащихся в водоносном горизонте.

В однородном пласте максимальная минерализация воды C_{max}, отбираемой совершенной скважиной, равна [2]:

$$C_{max} = C_1 - (C_1 - C_0)\frac{h_0}{H}. \qquad (44)$$

В двухслойном пласте при расположении границы раздела пресных и соленых вод в верхнем слое с коэффициентом фильтрации K_1 максимальная минерализация воды составит

$$C_{max} = C_1 - (C_1 - C_0)\frac{h_1 K_1}{HK}. \qquad (45)$$

Если граница соленых вод располагается в нижнем слое с коэффициентом фильтрации K_2, то

$$C_{max} = C_1 - (C_1 - C_0)\frac{h_2 K_2}{HK}. \qquad (46)$$

В формулах (44)—(46): C_0 и C_1 — минерализация пресных и соленых вод; h_1 и h_2 — мощности пресных и соленых вод; $K = \frac{h'K_1 + h''K_2}{H}$, h' и h'' — мощности слоев с коэффициентами фильтрации K_1 и K_2; H — общая мощность водоносного горизонта.

II. В пласте большой мощности в условиях бассейна время подтягивания соленых вод к колодцу, работающему с постоянным дебитом Q, определяется по формуле

$$T = \frac{2\pi n_0 h_0^3}{3Q}, \qquad (47)$$

где h_0 — мощность слоя пресных вод, залегающих на соленых водах; h_0 — пористость водовмещающих пород. Предполагается, что колодец вскрывает самую верхнюю часть слоя пресных вод.

Минерализация воды на любой момент времени t после начала T подсоса соленых вод равна:

$$C = C_1 - (C_1 - C_0)\sqrt[3]{\frac{T}{t}}. \qquad (48)$$

Выражение (48) действительно при $t > T$.

С учетом переходной зоны выражение для расчета минерализации имеет вид

$$C = C_n - \sum_{1}^{n}(C_n - C_{n-1})\sqrt[3]{\frac{T_n}{t}}, \qquad (49)$$

где $T_n = \frac{2\pi n_0 h_n^3}{3Q}$, h_n — расстояние от колодца до границы n-го слоя.

Если переходная зона отсутствует, то $n = 1$ и из выражения (49) получим формулу (48).

Если переходная зона моделируется одним слоем ($n = 2$), то

$$C = C_2 - (C_2 - C_1)\sqrt[3]{\frac{T_2}{t}} - (C_1 - C_0)\sqrt[3]{\frac{T_1}{t}}; \qquad (50)$$

при $n = 3$ имеем

$$C = C_3 - (C_3 - C_2)\sqrt[3]{\frac{T_3}{t}} - (C_2 - C_1)\sqrt[3]{\frac{T_2}{t}} - (C_1 - C_0)\sqrt[3]{\frac{T_1}{t}}. \qquad (51)$$

Для практических расчетов переходную зону достаточно представить одним или двумя слоями.

Пример. Колодец работает с дебитом $Q = 200$ м³/сут. Мощность пресных вод $h_0 = 20$ м, минерализация $C_0 = 0{,}5$ г/л. Под пресными водами залегают слабо солоноватые воды, минерализация которых изменяется от 1 до 3 г/л, мощностью 20 м. Ниже переходной зоны залегают соленые воды с минерализацией 3—4 г/л. Пористость водовмещающих пород $n_0 = 0{,}1$. Дать прогноз изменения минерализации воды на момент времени $t = 20$, 50 и 100 сут.

Для расчетов переходную зону заменим одним слоем со средней минерализацией $C_1 = 2$ г/л; минерализацию соленых вод C_2 примем равной 3,5 г/л.

1) По формуле (47) найдем время подтягивания солоноватых вод переходной зоны

$$T = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 20}{3 \cdot 200} = 8{,}4 \text{ сут.}$$

2) Время начала подсоса соленых вод равно

$$T = \frac{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}1 \cdot 40^3}{3 \cdot 200} = 67 \text{ сут.}$$

3) На моменты времени $t = 20$ и $t = 50$ сут к колодцу подтянулись только солоноватые воды переходной зоны, поэтому расчет минерализации будем вести по формуле (48)

$$t = 20 \text{ сут} \quad C = 2 - (2 - 0{,}5)\sqrt[3]{\frac{8{,}4}{20}} = 0{,}87 \text{ г/л};$$

$$t = 50 \text{ сут} \quad C = 2 - (2 - 0{,}5)\sqrt[3]{\frac{8{,}4}{50}} = 1{,}18 \text{ г/л}.$$

4) На момент времени $t = 100$ сут к колодцу подтянулись солоноватые воды C_1 и соленые воды C_2, поэтому расчет минерализации ведем по формуле (50).

$$C = 3{,}5 - (3{,}5 - 2)\sqrt[3]{\frac{67}{100}} - (2 - 0{,}5)\sqrt[3]{\frac{8{,}4}{100}} = 1{,}54 \text{ г/л}.$$

III. Теперь рассмотрим процесс подтягивания соленых вод к колодцу при наличии естественного движения подземных вод, характеризующегося средней скоростью v_e. Потенциальная функция течения φ имеет вид [29, 49]

$$\varphi = v_e z - \frac{Q}{2\pi} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}}. \qquad (52)$$

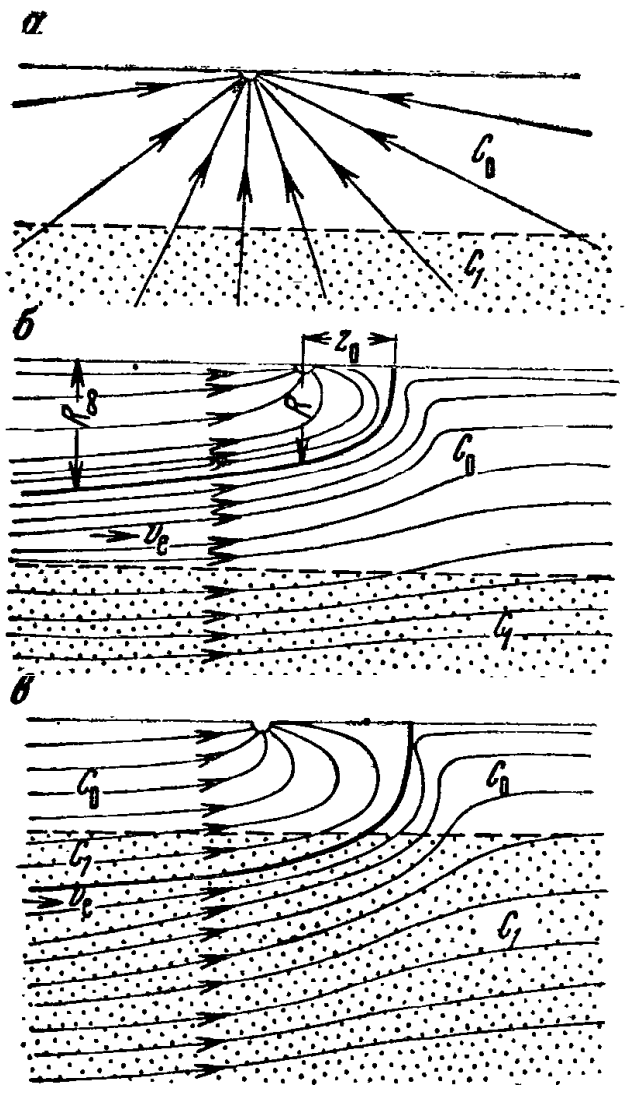


Рис. 30. Схема подтягивания соленых вод снизу в условиях бассейна (*а*) и в условиях потока (*б*, *в*); *б* — подтягивания соленых вод не происходит; *в* — подтягивание соленых вод происходит

В этих условиях токовые линии, по которым происходит движение частиц жидкости, искривляются и сам процесс движения существенно отличается от рассмотренного выше осесимметричного радиального течения. При $v_e = 0$ (рассмотренный выше случай) движение частиц жидкости к колодцу происходит из любой точки водоносного горизонта, как бы глубоко она ни была расположена. При наличии естественного движения подземных вод, т. е. когда $v_e \neq 0$, образуется область питания колодца или область захвата, и движение жидкости к колодцу происходит только внутри этой области питания. Область питания ограничена

нейтральной линией тока (рис. 30), уравнение которой в цилиндрической системе координат (z, R) имеет вид [30, 61]

$$-v_e R^2 + \frac{Q}{\pi} \cdot \frac{z}{z^2 + R^2} + \frac{Q}{\pi} = 0. \tag{53}$$

Размеры области питания определяются величинами z_0, R_0 и R_∞. Расстояние z_0 найдем из условия $v_z = \frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$.

$$z_0 = \sqrt{\frac{Q}{2\pi v_e}}. \tag{54}$$

Ширину области питания в точках $z = 0$ и $z = \infty$, т. е. величины R_0 и R_∞, получим из (53) подстановкой $z = 0$ и $z = \infty$

$$R_0 = \sqrt{\frac{Q}{\pi v_e}}, \tag{55}$$

$$R_\infty = \sqrt{\frac{2Q}{\pi v_e}}. \tag{56}$$

Частицы жидкости, расположенные за пределами области питания, в колодец не попадают. Следовательно, если граница соленых вод лежит ниже нейтральной линии тока MN, подсоса соленых вод не будет. Если нейтральная линия захватывает область соленых вод, произойдет их частичный подсос. Таким образом, условиями подсоса соленых вод являются:

$$\sqrt{\frac{2Q}{\pi v_e}} < h_0 \text{ — подсоса не будет} \tag{57}$$

$$\sqrt{\frac{2Q}{\pi v_e}} > h_0 \text{ — подсос произойдет,} \tag{58}$$

где h_0 — средняя мощность пресных вод. Из условия (57) можно оценить величину дебита, при котором подтягивания соленых вод не будет

$$Q < \frac{\pi h_0^2 v_e}{2}. \tag{59}$$

Если соленые воды захватываются областью питания колодца, предельная минерализация смеси приближенно определяется по формулам (44)—(46), при этом под мощностью и минерализацией соленых вод понимаются мощность и минерализация соленых вод внутри области питания. Время начала подсоса соленых вод в этом случае можно оценивать по формуле (47). Рассчитанное таким путем время начала подсоса соленых вод будет содержать «запас прочности», поскольку расчет по формуле (47) предполагает движение соленой воды по прямой линии тока, тогда как действительный путь движения криволинейный и поэтому более длинный. Таким образом, для прогноза подтягивания соленых

вод снизу важно знать естественную скорость движения подземных вод.

IV. В пластах ограниченной мощности на движение соленой воды к водозабору будет влиять подошва пласта. Не останавливаясь на этом вопросе подробно, отметим лишь, что, согласно [45, 70], если слой пресной воды составляет 0,5 ÷ 0,7 или менее мощности водоносного горизонта, т. е. $h_0 \leqslant 0{,}7\,H$, то влиянием подошвы пласта на время движения соленой воды к колодцу можно пренебречь.

Интересно выяснить, при каких условиях для прогноза подтягивания соленой воды вместо формулы для несовершенной скважины можно применять наиболее простую формулу (47) для колодца. Ниже приводится величина $\frac{T_{скв}}{T_{кол}}$ в зависимости от соотношения длины фильтра скважины и мощности пресных вод, рассчитанная для условий неограниченного по мощности пласта. Для оценки времени подтягивания соленых вод к скважине использована формула [64]

$$T = \frac{2\pi n_0 h_0^3}{3Q}\left(1 - \frac{l}{h_0}\right)^2\left(1 + \frac{2l}{h_0}\right), \qquad (60)$$

где l — длина фильтра, h_0 — мощность пресных вод.

Зависимость $\frac{T_{скв}}{T_{кол}}$ от $\frac{l}{h_0}$

$\bar{l} = \frac{l}{h_0}$	0,01	0,05	0,07	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7
$\frac{T_{скв}}{T_{кол}}$	1	1	0,99	0,97	0,9	0,79	0,65	0,5	0,22

При $\frac{l}{h_0} <$ отношение $\frac{T_{скв}}{T_{кол}}$ близко к 1.

Следовательно, если в пласте ограниченной мощности соблюдаются условия $\frac{l}{h_0} \leqslant 0{,}3$ и $h_0 \leqslant 0{,}7\,H$, где H — мощность водоносного горизонта, прогноз времени подтягивания соленых вод к несовершенной скважине приближенно можно выполнить по формуле (47) для колодца.

Прогноз изменения минерализации отбираемой воды в скважине после начала подсоса соленых вод производится по формуле

$$C = C_1 - (C_1 - C_0)\left[\frac{1}{\beta} + \left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\sqrt[3]{\frac{T}{t}}\right], \qquad (61)$$

где T — время начала подсоса соленых вод определяется по формуле (47) или (60); β — коэффициент, учитывающий несовершенство скважины, определяется по приведенной ниже табличной зависимости $\beta_{ср}$ от величины $\bar{l} = \frac{l}{H}$, где H — мощность водоносного горизонта.

Зависимость $\beta_{ср}$ от $\bar{l}$

$\bar{l}$	0,05—0,1	0,1—0,2	0,2—0,4	0,4—0,6	0,6—0,8
$\beta_{ср}$	2	1,7	1,4	1,3	1,1

Коэффициент β получен из решения Маскета для несовершенной скважины; при $\bar{l} \to 0$ величина $\beta \to \infty$.

Выражение (61) действительно при $t > T$. В начальный момент смешения, когда $t = T$, минерализация отбираемой воды равна C_0. Максимальная минерализация C_{max} наступает при $t \to \infty$ и определяется равенством

$$C_{max} = C_1 - \frac{C_1 - C_0}{\beta}. \qquad (62)$$

Если $\beta \to \infty$, что соответствует $\frac{l}{H} = 0$, величина $C_{max} = C_1$ (как для колодца).

При наличии переходной зоны от пресных вод к соленым прогноз изменения минерализации воды производится с помощью следующей зависимости:

$$C = C_n - \sum_{1}^{n} (C_n - C_{n-1}) \left[\frac{1}{\beta} + 1 - \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{T_n}{t}} \right], \qquad (63)$$

где n — число слоев, моделирующих переходную зону и соленые воды; T_n — время начала подсасывания верхней границы слоя с минерализацией C_n, определяемое по формулам (47) или (60).

V. Во многих случаях водоносный горизонт является неоднородным по фильтрационным свойствам, что обусловлено слоистостью разреза, анизотропностью пород, наличием слабо проницаемых прослоев и линз.

Довольно часто встречаются условия, когда слой пресных вод отличается по фильтрационным свойствам от нижележащего слоя соленых вод, причем обычно коэффициент фильтрации K_1 верхней части водоносного горизонта больше коэффициента фильтрации K_2 нижней части. В условиях такого двухслойного пласта и когда граница пресных и соленых вод проходит в нижнем слое с коэффициентом фильтрации K_2, время подтягивания соленых

вод к скважине (или колодцу при $\frac{l}{h_0} \leqslant 0{,}3$, где l — длина фильтра) оценивается по формуле, приведенной в работе [64]

$$T = \frac{2\pi n_{01} h_0^3}{3Q}\left[-\frac{9h_1^3}{8\varkappa h_0^3}\ln\left(1-\frac{8\varkappa}{9}\right)+\frac{n_{01}}{2n_{02}}\left(1+\frac{K_1}{K_2}\right)\left(1-\frac{h_1^3}{h_0^3}\right)\right], \quad (64)$$

где h_1 — мощность слоя с коэффициентом фильтрации K_1 (мощность нижнего слоя с коэффициентом фильтрации K_2 принимается весьма большой); h_0 — мощность пресных вод; n_{01}, n_{02} — пористость нижнего и верхнего слоев, $\varkappa = \frac{K_1 - K_2}{K_1 + K_2}$.

Нередко слои разной проницаемости характеризуются примерно одинаковой пористостью, т. е. $n_{01} \approx n_{02} = n_0$, тогда формулу (64) запишем в виде

$$T = \frac{2\pi n_0 h_0^3}{3Q}\left[-\frac{9h_1^3}{8\varkappa h_0^3}\ln\left(1-\frac{8\varkappa}{9}\right)+0{,}5\left(1+\frac{K_1}{K_2}\right)\right]. \quad (65)$$

В табл. 11 приведены результаты расчета отношения времени подтягивания соленых вод в неоднородном пласте $T_{н.\,п}$ и в однородном пласте $T_{о.\,п}$ с использованием формул (65) и (47).

Таблица 11

Расчет отношения $\frac{T_{н.\,п.}}{T_{о.\,п.}}$

$\varkappa\left(\frac{K_1}{K_2}\right)$	$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{h_0}$						
	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,9	0,95
$\frac{1}{3}$, (2)	1,49	1,48	1,46	1,43	1,4	1,27	1,23
$\frac{1}{2}$, (3)	1,98	1,95	1,9	1,85	1,77	1,5	1,42
$\frac{2}{3}$, (5)	2 97	2,93	2,86	2,75	2,6	2,17	2,02
$\frac{9}{10}$ (10)	5 4	5,16	5,06	4,75	4,3	2,95	2,5

Из табл. 11 видно, что слоистая неоднородность разреза существенно влияет на время продвижения соленых вод к водозаборному устройству. И только при $\frac{k_1}{k_2} < 2$ это влияние становится менее заметным. Формула (64) получена для колодца, но ею можно пользоваться и для скважин при условии $\frac{l}{h_0} \leqslant 0.3$.

Приближенно оценим изменение минерализации отбираемой воды для случая, когда граница соленых вод находится в нижнем, менее проницаемом слое.

Такая оценка является предельной и соответствует условию, когда скважина прорезает всю мощность верхнего слоя с коэффициентом фильтрации K_1 и только вскрывает нижний слой с коэффициентом фильтрации K_2. Предполагается, что мощность соленых вод соизмерима с мощностью пресных вод или больше ее. Для этих условий можно допустить, что приток через дно скважины близок к радиально-сферическому. Учитывая эти допущения, получим приближенную формулу, позволяющую оценить изменение минерализации отбираемой воды в двухслойной среде.

$$C = C_0\left[1 - \frac{K_2}{K_1}\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\right] + \frac{K_2}{K_1}\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\left[C_1 - (C_1 - C_0)\sqrt{\frac{T}{t}}\right], \tag{66}$$

где T определяется по формуле (60), а коэффициент β — по табличной зависимости (стр. 119). Если в формуле (66) примем $t \to \infty$, то получим выражение, характеризующее максимальную минерализацию отбираемой воды

$$C_{max} = C_1\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\frac{K_2}{K_1} + C_0\left[1 - \frac{K_2}{K_1}\left(1 - \frac{1}{\beta}\right)\right]. \tag{67}$$

Обычно фильтр водозаборной скважины стараются расположить в зоне пресных вод и по возможности отдалить от границы соленых вод. Поэтому оценка изменения минерализации на основе формул (66) и (67), предполагающих, что скважина вскрыла слой соленых вод, является, как уже отмечалось, предельной и содержит «запас прочности».

ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ КАЧЕСТВА ВОДЫ НА ВОДОЗАБОРАХ

Результаты анализа, изложенные в настоящей главе и в главе III, позволяют установить следующие закономерности подтягивания по пласту соленых вод к водозабору и изменения качества воды в нем.

Характер подтягивания соленых вод к водозабору и изменения качества отбираемой воды существенно зависят от граничных условий пласта и естественного движения подземых вод. При отсутствии естественного потока в условиях бассейна подтягивание соленых вод к водозабору произойдет всегда, но это может случиться быстро или спустя очень длительное время в зависимости от дебита водозабора и его удаленности от границы соленых вод.

В неограниченном по площади однородном водоносном горизонте в условиях бассейна, когда граница пресных и соленых вод разделяет пласт на две полуплоскости, одна из которых занята пресной водой, а другая соленой, максимальная минерализация воды на водозаборе после длительного подсасывания соленых вод

равна $\frac{C_0+C_1}{2}$ — полусумме минерализаций пресных C_0 и соленых C_1 вод. Эта предельная величина минерализации, действительная для одиночного водозабора, группового площадного водозабора и линейного ряда, не зависит от формы границы соленых вод, разделяющей пласт на две полуплоскости, и объясняется симметричностью притока подземных вод к водозабору в неограниченном пласте-бассейне.

В условиях естественного потока подтягивание соленых вод к водозабору может быть, а может и не быть. Возможность подтягивания соленых вод к водозабору определяется взаимным положением границы соленых вод и границы области питания (захвата) водозабора. Подсос соленых вод к водозабору возможен лишь, если граница соленых вод попадет в область питания водозабора, в противном случае подтягивания соленых вод не произойдет (см. рис. 14). В зависимости от положения границы соленых вод внутри области питания водозабора приток соленых вод к нему со временем будет возрастающим, стационарным или убывающим. Таким образом, для обоснованного прогноза движения соленых вод к водозабору необходимо знать направление и скорость естественного движения подземных вод. На приток соленых вод к водозабору значительно влияет неоднородность водоносного горизонта.

Могут быть три основных случая изменения качества воды на водозаборе: 1) полное засоление водозабора, 2) частичное и 3) убывающее. Типовые кривые изменения минерализации воды водозабора приведены на рис. 31. Полное засоление водозабора имеет место при подтягивании соленых вод из реки (рис. 31, *г*) или в условиях неограниченного пласта при наличии естественного потока подземных вод, когда граница соленых вод пересекает всю область питания водозабора и располагается вверх по потоку от него (рис. 31, *в*). Частичное засоление водозабора происходит, например, в условиях неограниченного бассейна (рис. 31, *а*). Убывающее засоление водозабора имеет место (рис. 31, *д*) при подтягивании к береговому водозабору соленых вод со стороны речных террас (см. выше самоопреснение отбираемой воды) или в неограниченном пласте в условиях потока при расположении границы соленых вод внутри области питания вниз по потоку от водозабора (рис. 31, *б*).

При полном засолении водозабора минерализация отбираемой воды постепенно возрастает до минерализации соленой воды. При частичном засолении минерализация отбираемой воды возрастает и, достигнув максимума, обусловленного соответствующими долями притока пресных и соленых вод, остается постоянной, как в рассмотренном выше случае предельной минерализации воды в условиях неограниченного водоносного горизонта (бассейна). При убывающем засолении минерализация отбираемой воды сначала возрастает, а затем, достигнув максимума,

начинает уменьшаться до минерализации пресной воды. Минерализация отбираемой воды быстро возрастает в начальный период подсоса соленых вод и медленно падает после достижения максимума (при убывающем засолении).

Отмеченные особенности подтягивания соленых вод и изменения качества воды на водозаборе имеют непосредственное отношение к методике оценки запасов пресных подземных вод, контактирующих с солеными. Например, при оценке эксплуатационных запасов приречных и приканальных линз величина проектного

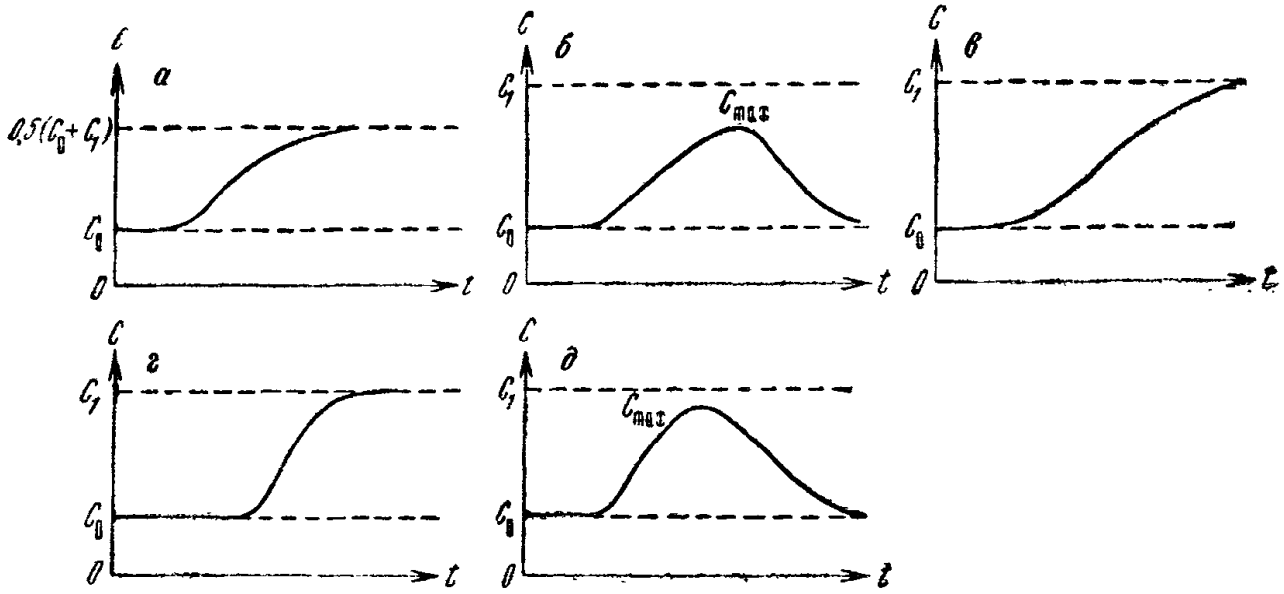


Рис. 31. Типовые кривые изменения минерализации воды на водозаборе в неограниченном пласте (*а*, *б*, *в*) и в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора (*г*, *д*):

а — условия бассейна; *б* — условия потока, соленые воды расположены вниз по потоку от водозабора; *в* — условия потока, соленые воды расположены вверх по потоку; *г* — подтягивание соленых вод со стороны реки; *д* — подтягивание соленых вод со стороны берега

дебита водозабора (обычно линейного ряда скважин) выбирается такой, чтобы в процессе эксплуатации не произошло подсасывания соленых вод со стороны боковой границы линзы и изменения качества подземных вод сверх допустимой нормы.

Во многих случаях эти опасения необоснованны: притока соленых вод не будет, если точка перегиба находится между водозабором и границей соленых вод; если же точка перегиба попадет в область соленых вод, то приток соленых вод к водозабору будет ограниченным во времени и по площади. Поэтому представляется вполне оправданным увеличение проектного дебита водозабора даже при частичном подсосе солоноватых вод переходной зоны, что значительно увеличит эксплуатационные запасы пресных подземных вод линзы без существенного ухудшения их качества, тем более что во многих районах Средней Азии, бедных пресными водами, предъявляются несколько иные требования к минерализации питьевых вод. Несомненно, что для обоснованного решения этого вопроса необходима тщательная разведка с определением всех гидрогеологических и гидрохимических показателей.

ГЛАВА VI

ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В СЛОЖНЫХ ГИДРОХИМИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕСНЫХ ПОДЗЕМНЫХ ВОД, КОНТАКТИРУЮЩИХ С СОЛЕНЫМИ ВОДАМИ

Ниже будут рассмотрены некоторые вопросы методики разведки и оценки запасов подземных вод, контактирующих с солеными водами.

Задачи и методика разведочных работ рассматриваются применительно к пресным водам морских побережий и к линзам пресных вод.

Задачи разведочных работ на пресные подземные воды морских побережий

Рассмотрим особенности разведки пресных подземных вод на морских побережьях.

При разведочных и опытных работах для оценки эксплуатационных запасов пресных подземных вод морских побережий помимо гидродинамических условий водоносного горизонта и его фильтрационных свойств необходимо изучить условия и размеры питания разведуемого водоносного горизонта и особенности разгрузки подземных вод в море.

В прибрежных районах изучение питания пресных вод осуществляется обычными методами, но этому вопросу надо уделить особое внимание.

Оценку условий разгрузки пресных вод в море можно производить гидрохимическими, геофизическими и термометрическими методами с учетом геологического строения и тектоники района. Бурение в море осуществляется в редких случаях.

На стадии поисков из всех пробуренных гидрогеологических скважин проводятся непродолжительные одиночные откачки для предварительной оценки фильтрационных свойств пород и расхода потока пресных вод.

Часть скважин, пробуренных в процессе поисковых работ, должна быть оставлена для наблюдений за режимом подземных вод горизонтов, намечаемых для разведки. При этом часть режимных скважин должна располагаться на створе, перпендикулярном берегу. Отдельные скважины должны быть оборудованы для наблюдения за режимом соленых вод. Помимо режимных наблюдений за подземными водами, большое значение имеет исследование уровенного и химического режимов рек, каналов и озер, что чрезвычайно важно для изучения нагона в них морских вод. Последнее приобретает особое значение при разведке водоносных горизонтов, гидравлически связанных с реками и каналами, подверженными нагону морских вод. В качестве примера можно сослаться на разведку подземных вод аллювиальных отложений в долине р. Сучан. Гидрохимические условия этого участка осложнялись нагоном морских вод в р. Сучан и возможностью периодического засоления грунтовых вод в процессе эксплуатации инфильтрационного водозабора.

При изучении нагона морских вод в реки и каналы должны быть выявлены периодичность и распределение нагонных явлений по сезонам в течение года и в многолетнем разрезе. Должны быть установлены средняя и максимальная продолжительность распространения соленых морских вод вверх по реке (каналу), минерализация речных вод во время нагона морских вод и продолжительность сохранения в реке повышенной минерализации. Должен быть получен материал о среднемесячных, сезонных и годовых величинах минерализации речной воды.

В период предварительной разведки следует организовать комплексные наблюдения за питанием пресных подземных вод в районах выхода исследуемых водоносных горизонтов на дневную поверхность, если область основного питания этих водоносных горизонтов не слишком удалена от берега моря (не более 15—20 км).

Размеры площади предварительной разведки определяются потребностью в воде, местоположением области питания, дальностью влияния проектируемого водозабора и возможностью выбора участка детальной разведки.

На этой стадии скважины разбуриваются по нескольким поперечникам, равномерно охватывающим площадь предварительной разведки. Расстояния между створами и расположение скважин на них определяются в зависимости от степени однородности гидрогеологического разреза. Из скважин производятся пробные и опытные одиночные откачки. При этом особое внимание следует уделять характеристике фильтрационных свойств и пористости водоносного горизонта в прибрежной полосе с целью выяснения возможности вторжения морских вод в пресноводные горизонты в процессе будущей эксплуатации водозаборов, так как это в известной мере определяет выбор местоположения участков детальной разведки. По результатам предварительной

разведки необходимо выполнить ориентировочные расчеты возможных вариантов будущего водозабора. Должны быть сделаны прогнозы подтягивания соленых вод к водозабору и изменения гидрохимической обстановки на участке водозабора в процессе его эксплуатации. Все эти расчеты существенно помогут в выборе участка детальной разведки и определят объемы и методику последующих разведочных работ. Участок детальной разведки, на котором будет расположен водозабор, выбирается по результатам предварительной разведки. Основными признаками, по которым выбирается местоположение будущего водозабора, являются повышенная водопроводимость пород эксплуатационного горизонта, обеспеченность питания водозабора, благоприятная гидрохимическая обстановка. В гидрогеологической литературе пока отсутствуют рекомендации по определению размеров участка детальной разведки. Вследствие этого площадь участка детальной разведки в известной мере принимается произвольно, хотя при этом и учитываются объективные гидрогеологические и другие факторы. Так, если эксплуатационные запасы подземных вод оцениваются по линейному ряду скважин, то размеры участка детальной разведки в значительной степени определяются длиной проектируемого ряда. В то же время общий критерий для определения размеров участка разведки отсутствует. Представляется, что в обоснование размеров участка детальной разведки могут быть положены требования о сохранении неизменным качества подземных вод (или его изменения в допустимых пределах). Несомненно, что этот принцип должен сочетаться с другими гидрогеологическими показателями.

Размеры участка детальной разведки предлагается определять, исходя из того, чтобы в течение всего срока эксплуатации водозабора не произошло подтягивания к нему соленых вод. Подробнее этот вопрос будет рассмотрен ниже. Следует отметить, что этот принцип может быть положен в основу определения размеров участка детальной разведки пресных подземных вод не только в районах морских побережий, но и вообще месторождений пресных подземных вод в сложных гидрохимических условиях.

Наряду с изучением фильтрационных свойств пород (коэффициенты фильтрации, водопроводимости, пьезопроводности) требуется определять и активную пористость, необходимую для прогнозов перемещения границы пресных и соленых вод в процессе работы водозаборов. Величина пористости может быть определена с помощью индикаторных исследований, а также по результатам откачек вблизи границы соленых вод. Методика индикаторных работ описана в работе [15].

Задачи и направления гидрогеологических исследований на линзах пресных вод

Комплекс геологических исследований, осуществляемых при разведке подземных вод вообще, сохраняется и при изучении линз

пресных вод. Однако особенности формирования линз пресных вод, гидрогеологические условия их залегания, распространение, особенности эксплуатации обусловливают некоторую специфику поисков и гидрогеологических исследований при детальной разведке.

Как уже отмечалось, основным условием фрмирования линз пресных вод инфильтрационного питания является наличие периодического сосредоточенного питания. Это условие формирования линз одновременно является их поисковым признаком.

Сосредоточенное питание в виде инфильтрации атмосферных осадков может возникнуть за счет понижений в рельефе и наличия с поверхности хорошо проницаемых «окон», причем последние иногда бывают связаны и с положительными формами рельефа (барханные пески). Следует отметить, что само по себе понижение в рельефе не всегда является достаточным условием для возникновения интенсивной инфильтрации. Нередко под понижениями, иногда довольно значительными, пресные воды не обнаруживались. Это объясняется тем, что дно таких понижений (падин) бывает выполнено глинистыми отложениями, затрудняющими инфильтрацию. Однако в большинстве случаев пресные воды приурочены к пониженным участкам рельефа. Поэтому при поисках линз пресных вод инфильтрационного питания очень важно изучать геоморфологические условия территории. Большое значение имеет детальная топографическая съемка.

Должны быть по возможности собраны сведения о колодцах и естественных источниках пресной воды, а также данные о длительности работы имеющихся колодцев и режиме их эксплуатации. Весьма полезным может оказаться сопоставление площадей, на которых имеются колодцы с пресной водой, с перспективными участками, выделенными на основе анализа геолого-гидрогеологических условий района.

Важное значение при поисках небольших линз имеют геоботаническая съемка и геофизические работы, в частности электроразведка. По данным геофизических исследований могут быть приближенно выделены площади развития пресных вод и намечены участки для более детальных работ.

Оконтуривание линз целесообразно начинать на участках, по которым имеются сведения о наличии пресной воды (колодцы, источники). Это позволяет уточнить методику поисковых работ, особенно геофизических исследований.

При поисках и разведке подрусловых линз пресных вод следует помнить, что линзы формируются при пересечении рекой или каналом пород с относительно хорошими фильтрационными свойствами. Поэтому при поисках пресных вод, приуроченных к поверхностным водотокам (как и линз инфильтрационного питания), важное значение имеет крупномасштабная гидрогеологическая съемка масштаба 1 : 100 000—1 : 50 000, позволяющая выявить геологические и гидрогеологические условия исследуемого

района, литологию пород в плане и в разрезе и особенно местоположение проницаемых разностей пород. Очевидно, что основной объем разведочных работ должен быть сосредоточен на участках, сложенных породами с высокими фильтрационными свойствами.

В результате разведочных работ должны быть выявлены условия питания линзы, залегания ее в плане и в разрезе и получены все гидрогеологические параметры, необходимые для выбора рационального способа эксплуатации линзы. Важное значение имеют наблюдения за режимом подземных вод в районе линз пресных вод, длительность которых должна составить по меньшей мере один год.

Очевидно, на небольших линзах пресных вод, предназначенных для периодического отбора воды, объем гидрогеологических исследований целесообразно максимально ограничить. Для этих линз основными должны быть геофизические и геоботанические методы с доведением до минимума буровых и опытных работ.

Для средних линз пресных вод, предназначаемых для постоянного централизованного водоснабжения, необходим полный комплекс гидрогеологических работ, причем основное внимание должно быть уделено изучению их питания, а также возможного изменения его в процессе эксплуатации. Без получения достаточно ясной количественной характеристики питания средних линз пресных вод невозможна сколько-нибудь обоснованная оценка их эксплуатационных запасов.

При разведке крупных линз пресных вод также необходим весь комплекс гидрогеологических исследований, причем количественную оценку питания можно произвести лишь в первом приближении, так как эксплуатационные запасы их базируются в основном на статических запасах пресных вод этих линз.

Если в разрезе имеются прослои глин, отделяющих пресные воды от соленых, следует выяснить размеры и мощность глинянных прослоев. Если пресные воды на всей площади линзы подстилаются водоупорным слоем, ниже которого залегают соленые воды, то также должны быть получены данные о мощности этого водоупора и его сплошности на территории линзы. Если в водоупорном слое предполагаются «окна», через которые будет происходить подток соленых вод, то их по возможности необходимо выявить. Наличие таких «окон» в ряде случаев устанавливается с помощью достаточно мощных опытных откачек; посредством геофизических исследований выявляются участки, где минерализация воды заметно повышается в результате проникновения соленых вод через «окна».

При гидрогеологических исследованиях на линзах пресных вод с близким залеганием уровня воды от поверхности земли необходимо получить данные, на основе которых можно было бы оценить расход грунтовых вод на испарение в естественных усло-

виях, а также уменьшение потерь воды на испарение в процессе эксплуатации.

В случае расположения водозабора вблизи реки или канала в ходе эксплуатации линзы возможна кольматация русла реки (канала), в связи с этим нужны сведения о содержании взвешенных частиц в речных водах, особенно во время паводка.

Как было показано выше, проницаемость водосодержащих песчаных пород может быть в той или иной степени различна для пресных и соленых вод. Поэтому фильтрационные свойства пород следует изучать как в зоне пресных вод, так и в зоне соленых вод. Необходимо определить содержание в песках глинистых фракций и их минеральный состав.

Значительное внимание в процессе гидрогеологических исследований должно быть уделено опытам по определению действительных скоростей потока. Эти материалы могут дать представление об активной пористости пород, величина которой входит в расчетные формулы.

При проектировании водозабора из спаренных скважин необходимо предусмотреть сброс откачиваемых соленых вод. Во избежание загрязнения пресных вод линзы сброс соленых вод желательно производить за пределами линзы. Наилучшими коллекторами при сбросе соленых вод могут быть естественные понижения в рельефе, сложенные глинистыми и суглинистыми породами. Вопросу отвода соленых вод должно уделяться серьезное внимание при опытных гидрогеологических работах.

Гидрогеологическими исследованиями должна быть охвачена вся площадь линзы, включая и ее переходную зону. Но наиболее детально следует изучить участок проектируемого водозабора.

Изучение режима подземных вод организуется с начала поисково-разведочных работ. Наблюдательные скважины на линзе располагаются таким образом, чтобы охарактеризовать участки с различной глубиной залегания уровня грунтовых вод от поверхности земли, различным характером пород в зоне аэрации и растительного покрова. Вблизи границ линзы скважины оборудуются фильтрами длиной 5—10 м, расположенными наполовину в соленых и наполовину в пресных водах. Наблюдения за положением границы пресных и соленых вод в этих скважинах ведутся методом резистивиметрии. Наиболее часто наблюдения за изменением химического состава подземных вод организуются в переходной зоне, в плане и в разрезе.

Учитывая, что естественный режим подземных вод вообще и на линзах в частности характеризуется медленными изменениями, наблюдения могут быть достаточно редкими: в периоды отсутствия питания 1—2 раза в месяц, в периоды питания ежедневно или через день.

После начала работы водозабора режим подземных вод усложняется. Наибольшие изменения в режиме подземных вод будут иметь место в районе водозаборных скважин. Соответственно

наблюдения за режимом подземных вод должны с большей детальностью производиться в районе водозабора и на ближайшем к нему участке контура линзы. Эти работы включают наблюдения:

1) за производительностью водозабора и изменением минерализации отбираемой воды;

2) за положением уровней воды и минерализацией подземных вод в районе водозабора, а также в районе предполагаемых «окон», через которые возможен подсос соленых вод;

3) за положением уровня воды и границы пресных и соленых вод на ближайшем контуре линзы.

Число наблюдательных скважин и их размещение определяются в зависимости от конкретных гидрогеологических условий линзы.

Следует отметить, что перечисленные требования к наблюдениям за режимом грунтовых вод относятся в основном к средним и крупным линзам. Для мелких линз с небольшим отбором воды объем режимных наблюдений может быть значительно меньшим.

Определение размеров участка детальной разведки

К эксплуатационным запасам подземных вод предъявляется требование неизменности качества воды в течение всего расчетного срока водопотребления [83]. Этот признак предлагается положить в основу определения размеров участка детальной разведки, на котором будет расположен водозабор. В соответствии с этим границы участка детальной разведки должны быть удалены от водозабора на такое расстояние, чтобы в течение всего срока эксплуатации водозабора не произошло подтягивания к нему некондиционных (соленых) вод.

В случае неограниченного в плане пласта размеры участка детальной разведки определяются по формулам

для площадного сосредоточенного водозабора

$$R = \sqrt{\frac{Qt_э}{\pi n_0 h}} + \frac{Ki_e t_э}{n_0}, \qquad (1)$$

для линейного ряда скважин

$$x = \frac{Q_0 t_э}{2n_0 h\sigma} + \frac{Ki_e t_э}{n_0}. \qquad (2)$$

В формулах (1) и (2): Q — дебит площадного водозабора, м³/сут; h — средняя мощность водоносного горизонта, м; Q_0 — средний дебит отдельной скважины ряда, м³/сут; i_e — уклон естественного потока; K — коэффициент фильтрации, м/сут; $t_э$ — расчетное время работы водозабора, сут; n_0 — пористость.

По формуле (1) оценивается радиус площади участка детальной разведки, отсчитываемый от центра водозабора. По формуле (2) рассчитываются расстояния по обе стороны от линейного ряда

скважин, которые определяют размеры участка детальной разведки. При этом предполагается, что линейный ряд расположен перпендикулярно к естественному потоку подземных вод; если линейный ряд расположен по потоку, то размеры участка оцениваются по формуле (2) без второго слагаемого. Этими же формулами можно пользоваться для приближенной оценки размеров участка детальной разведки в случае полуограниченного пласта с контуром постоянного напора (река), если подтягивание соленых вод происходит со стороны берега. Если же существует опасность подсоса соленых вод из реки, необходимая удаленность d водозабора от реки определяется подбором по формуле (21) главы IV в случае сосредоточенного водозабора и по формуле (25) главы IV для линейного ряда скважин, расположенного параллельно берегу реки.

При оценке размеров участка детальной разведки по указанным выше формулам в расчете используются среднемаксимальные значения коэффициента фильтрации и уклона естественного потока, проектный дебит водозабора, среднеминимальные значения мощности и пористости.

В формулах (1) и (2), а также (21) и (25) главы IV не учитывается фильтрационная неоднородность пород. Однако это существенно не сказывается на результатах расчетов. Действительно, в подавляющем большинстве случаев водозаборы располагаются в зоне с повышенными фильтрационными свойствами пород. Да и пресные воды обычно приурочены к этим зонам. Если соленые воды развиты в породах с более низкими фильтрационными свойствами, время их движения к водозабору будет более длительным по сравнению с движением соленых вод в однородном пласте с фильтрационными свойствами зоны пресных вод. Следовательно, по приведенным выше формулам размеры участка детальной разведки определяются с некоторым «запасом».

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА СКВАЖИН ДЛЯ УТОЧНЕНИЯ ГРАНИЦЫ СОЛЕНЫХ ВОД НА СТАДИИ ДЕТАЛЬНОЙ РАЗВЕДКИ (НА УЧАСТКЕ ВОДОЗАБОРА)

При разведке месторождений пресных подземных вод в сложных гидрохимических условиях возникает задача определения положения границы пресных и соленых вод.

В настоящее время отсутствуют какие-либо объективные критерии для оценки числа скважин, необходимых для выяснения положения границы соленых вод. В одних случах для этого проектируется излишнее количество скважин, в других — скважин явно недостаточно.

Совершенно очевидно, что количество скважин для этих целей должно выбираться с учетом конкретных гидрогеологических условий. Вместе с тем представляется целесообразным в основу приближенной оценки числа скважин для прослеживания

границы соленых вод положить общий подход, пригодный для месторождений пресных подземных вод в сложных гидрохимических условиях.

Рассмотрим вопрос о количестве скважин, необходимом для изучения гидрохимической обстановки на участке водозабора. Пусть по результатам предварительной разведки установлено наличие в плане зоны соленых вод и намечен участок детальной разведки. По условиям подтягивания соленых вод здесь могут быть два случая. Если граница соленых вод (по данным предварительной разведки) удалена от водозабора на такое расстояние, что время подтягивания соленых вод к водозабору значительно превышает срок его эксплуатации, можно не уточнять положение границы соленых вод. Если же время подтягивания соленых вод к водозабору соизмеримо со временем его работы, необходима детализация гидрохимических условий. Таким образом, после предварительной разведки должны быть выполнены ориентировочные расчеты для обоснования эксплуатационных запасов подземных вод, в том числе расчеты подтягивания соленых вод к водозабору. Эти расчеты для площадного сосредоточенного и линейного водозаборов выполняются по формулам (3) или (13) главы IV для неограниченного в плане пласта и по формулам (21) или (25) этой же главы для полуограниченного пласта.

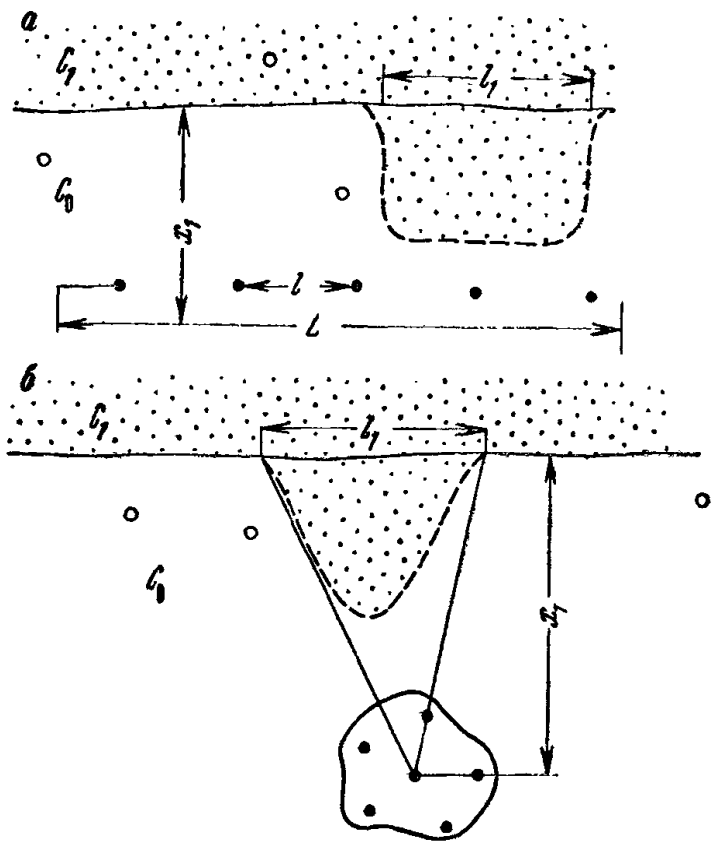


Рис. 32. К обоснованию числа скважин на участке разведки для прослеживания границы соленых вод

В случае, когда на стадии детальной разведки требуется уточнить область распространения соленых вод, можно рекомендовать следующий способ определения необходимого количества скважин.

Уточнение области распространения соленых вод должно заключаться в выявлении крупных отклонений границы соленых вод от ее предполагаемого понижения, установленного по результатам предварительной разведки, причем под крупными отклонениями границы соленых вод понимаются значительные по ширине «языки» соленых вод, вытянутые в сторону водозабора и подсос

соленых вод из которых может изменить минерализацию воды в водозаборе сверх допустимой нормы.

Пусть эксплуатационные запасы подземных вод оцениваются применительно к линейному ряду скважин длиной L. Параллельно ряду на расстоянии x_1 от него проходит граница соленых вод, установленная по результатам предварительной разведки (рис. 32, *а*). Средняя минерализация соленых вод C_1, минерализация пресных вод C_0. Требуется уточнить положение границы соленых вод на участке детальной разведки и прежде всего по фронту водозабора. При обосновании необходимого для этого количества скважин исходим из следующего положения: расстояние l между разведочными скважинами должно быть таким, чтобы возможные невыявленные на этом отрезке l естественные гидрохимические условия («язык» соленых вод шириной l_1) не повлияли на минерализацию воды в водозаборе сверх допустимой нормы $C_д$. Очевидно, что для этого должно быть $l \leqslant l_1$. Заменим ряд скважин галереей с равномерным притоком по всей ее длине L. Для простоты примем, что «пропущенный» язык соленых вод шириной l_1 подступает непосредственно к галерее.

Составим уравнение смешения пресных и соленых вод в галерее

$$qLC_д = ql_1C_1 + q(L - l_1)C_0, \quad \left(q = \frac{Q_{сум}}{L}\right),$$

откуда найдем

$$l_1 = L\frac{C_д - C_0}{C_1 - C_0}. \tag{3}$$

Таким образом, примерное расстояние l между разведочными скважинами, которое должно быть не больше или равно l_1, определяется по формуле (3). Число скважин, необходимых для уточнения распространения соленых вод

$$m = \frac{L}{l} + 1. \tag{4}$$

Например, при $C_0 = 0{,}6$ г/л, $C_1 = 3$г/л, $C_д = 1$ г/л и $L = 5$ км имеем

$$l = 5000 \cdot \frac{1 - 0{,}6}{3 - 0{,}6} = 850 \text{ м},$$

$$m = \frac{5000}{850} + 1 \approx 7 \text{ скважин}.$$

Эти скважины располагаются в зоне пресных вод вдоль границы раздела. Если в этой полосе уже имеется какое-то количество скважин m_0, то требуемое дополнительное число скважин $m_д$ равно

$$m_д = \frac{L}{l} + 1 - m_0 \tag{5}$$

и они равномерно распределяются с учетом имеющихся скважин.

Аналогично поступаем в случае площадного сосредоточенного водозабора (см. рис. 32, *б*). Минерализация воды в водозаборе в зависимости от ширины l_1 фронта поступления соленых вод определяется по формуле

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{l_1}{x_1}. \quad (6)$$

Из (7) найдем оптимальную ширину l_1 фронта поступления соленой воды, соответствующую допустимой минерализации $C_д$ воды в водозаборе

$$l_1 = 2x_1 \operatorname{tg}\left(\pi \frac{C_д - C_0}{C_1 - C_0}\right). \quad (7)$$

Величину l_1 принимаем за расстояние между разведочными скважинами, предназначенными для детализации гидрохимической обстановки на участке водозабора. Скважины равномерно располагаются по периметру (полуокружности вокруг водозабора) в той части пласта, где проходит граница соленых вод (см. рис. 32, *б*). Радиус периметра R расположения скважин равен расстоянию, по которому время движения подземных вод к водозабору будет равно или больше расчетного срока его эксплуатации $t_э$. Отсюда длина периметра составляет

$$L = \sqrt{\frac{\pi Q t_э}{n_0 h}} \quad (8)$$

и число скважин, равномерно располагаемых по его длине, равно

$$m = 0{,}5 \frac{1}{x_1} \sqrt{\frac{\pi Q t_э}{n_0 h}} \operatorname{ctg}\left(\pi \frac{C_д - C_0}{C_1 - C_0}\right). \quad (9)$$

С учетом ранее пробуренных скважин m_0 в этой области дополнительное число скважин составит

$$m_д = m - m_0.$$

Рассмотрим вопрос оконтуривания зоны соленых вод на примере разведки месторождения пресных подземных вод в Кустанайской области. Разведуемый водоносный горизонт приурочен к верхнемеловым отложениям, представленным кварцево-глауконитовыми песками. Горизонт развит повсеместно и залегает на глубине 90—110 м, мощность горизонта 50—60 м. Коэффициент фильтрации водовмещающих пород 10—15 м/сут. Сверху и снизу горизонт перекрыт плотными глинами мощностью 10—30 м. Воды напорные, величина напора 20—30 м, пьезометрические уровни залегают на глубине 60—85 м. Общее движение подземных вод в меловых отложениях направлено к долине реки, где они разгружаются.

Верхнемеловой водоносный горизонт характеризуется сложной гидрохимической обстановкой. С северо-запада на юго-восток

проходит полоса пресных и солоноватых вод шириной 11 км с минерализацией до 1,5 г/л, выявленная в период предварительной разведки. За пределами этой полосы минерализация возрастает до 5—7 г/л. По мощности водоносного горизонта минерализация воды на месторождении не меняется, о чем свидетельствуют результаты зонального опробования по вертикали.

По результатам предварительной разведки был намечен участок для проведения детальных работ. Длина участка (~20 км)

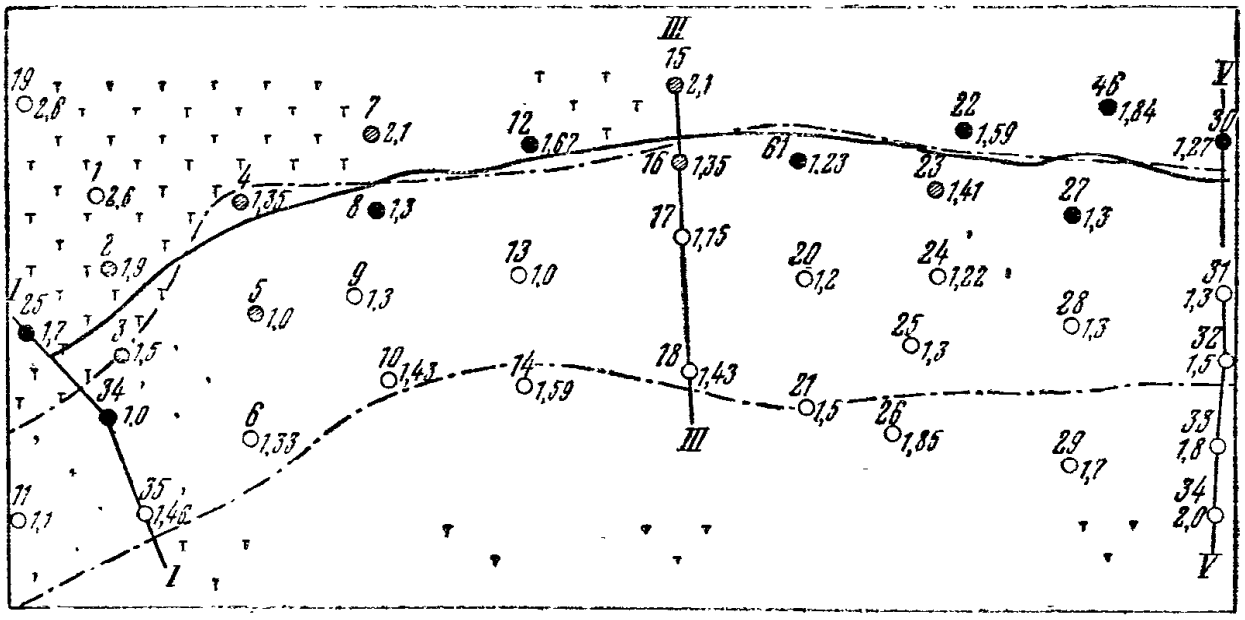


Рис. 33. Положение границы соленых вод на участке детальной разведки; граница, построенная по 17 скважинам (верхняя пунктирная линия, по О. М. Дырдину, 1970 г.), и граница, построенная по 9 скважинам (сплошная линия, скважины показаны черным кружком). Над скважиной ее номер, справа — минерализация (г/л).

была обусловлена длиной линейного ряда скважин (дебит одной скважины 10 л/с, число скважин 35, длина ряда ~17 км), применительно к которому производилась оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Одним из основных факторов, определяющих величину эксплуатационных запасов подземных вод в этих условиях, являлся возможный подсос соленых вод в процессе работы водозабора. В связи с этим на стадии детальной разведки предусматривалось изучение гидрохимических условий на участке водозабора. Всего при детальных разведочных работах было пробурено 16 скважин. Вместе с ранее пробуренными скважинами на участке детальной разведки имелось около 30 скважин. На основе 18 скважин была оконтурена полоса пресных вод и прослежена граница соленых вод.

Оценим по формуле (6), какое количество скважин необходимо для уточнения области распространения соленых вод. Допустимая минерализация питьевых вод принята 1,5 г/л. Средняя минерализация пресных вод ~0,9 г/л, соленых 4 г/л. Расчет показывает, что в этих условиях достаточно 7—8 скважин. На рис. 33

показана граница соленых вод на участке детальной разведки, построенная по 18 скважинам, и эта же граница, построенная по 9 скважинам. Как видно из рис. 33, конфигурация этой границы существенно не меняется при ее прослеживании вдвое меньшим числом разведочных скважин.

ОБ ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПО ДАННЫМ ОПЫТНЫХ ОТКАЧЕК

Для оценки качества воды и его изменения в процессе эксплуатации водозабора нередко проектируются мощные и длительные откачки [83]. Как правило, качество отбираемой воды за время откачки не меняется или меняется очень незначительно. И на этом основании часто дается благоприятный прогноз относительно качества воды на весь период эксплуатации.

Рассмотрим, насколько целесообразно проведение откачек для прогноза качества воды.

Допустим, что в процессе предварительной разведки месторождения пресных подземных вод установлено замещение по площади пресных вод солеными (в разрезе пресные воды залегают на водоупоре). Границу пресных и соленых вод на данном участке месторождения считаем прямолинейной; между пресными водами с минерализацией C_0 и солеными водами с минерализацией C_2 имеется переходная зона шириной b и средней минерализацией солоноватых вод C_1. Примем также (для простоты расчетов), что месторождение пресных подземных вод расположено в пласте больших размеров (неограниченный пласт) с более или менее одинаковыми фильтрационными свойствами. Естественная скорость движения подземных вод мала и ею можно пренебречь. Пусть из скважины, расположенной на расстоянии $x = 150$ м от границы солоноватых вод с минерализацией C_1, производится откачка с дебитом $Q = 5000$ м³/сут.

Исходные данные: $h = 20$ м, $n_0 = 0{,}2$, $C_0 = 0{,}6$ г/л, $C_1 = 1{,}5$ г/л, $C_2 = 5$ г/л, $b = 100$ м, где h — средняя мощность водоносного горизонта, n_0 — активная пористость водосодержащих пород (остальные обозначения приведены выше).

Найдем время, за которое к скважине подтянутся солоноватые воды с минерализацией C_1 и соленые воды с минерализацией C_2, и оценим изменение минерализации воды в процессе откачки. Расчетные формулы для времени минерализации отбираемой воды с учетом переходной зоны

$$C = C_0 + \frac{C_1 - C_0}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_1}{t}} + \frac{C_2 - C_1}{\pi} \arccos \sqrt{\frac{T_2}{t}}, \quad (10)$$

где T_1 — время подтягивания к скважине солоноватых вод переходной зоны (минерализация C_1), сут; T_2 — время подтягивания к скважине соленых вод (минерализация C_2), сут.

Определим время T_1 и T_2

$$T_1 = \frac{3{,}14 \cdot 20 \cdot 0{,}2 \cdot 150^2}{5000} = 56 \text{ сут};$$

$$T_2 = \frac{3{,}14 \cdot 20 \cdot 0{,}2\,(150+100)^2}{5000} = 157 \text{ сут}.$$

Рост минерализации откачиваемой воды начнется после того, как к скважине подтянутся солоноватые воды переходной зоны. Минерализация воды на моменты времени $t_1 = 70$ сут, $t_2 = 100$ сут и $t_3 = 125$ сут равна:

$$t_1 = 70 \text{ сут}: \quad C = 0{,}6 + \frac{1{,}5-0{,}6}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{56}{70}} = 0{,}73 \text{ г/л};$$

$$t_2 = 100 \text{ сут}: \quad C = 0{,}6 + \frac{1{,}5-0{,}6}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{56}{100}} = 0{,}805 \text{ г/л};$$

$$t_3 = 125 \text{ сут}: \quad C = 0{,}6 + \frac{1{,}5-0{,}6}{3{,}14} \arccos \sqrt{\frac{56}{125}} = 0{,}84 \text{ г/л}.$$

Расчеты показывают, что время, за которое соленая вода продвинется к скважине, весьма значительное (десятки суток и месяцев).

Несомненно, приведенные цифры дают лишь представление о порядке величин T и C. В действительности могут быть отклонения в ту или иную сторону, но в целом процесс подтягивания соленых вод и изменения минерализации, учитывая сравнительно удаленное расположение скважин от границы пресных и соленых вод, является весьма длительным и медленным.

Следовательно, чтобы в процессе опытных работ наблюдать заметное изменение качества воды, необходимо запроектировать мощную и длительную откачку, причем продолжительность ее может исчисляться месяцами, что экономически не рационально и недопустимо с точки зрения охраны подземных вод. Но дело не только в этом.

Предположим, что в процессе опытной откачки не произошло подсасывания соленых вод. Это обстоятельство не дает, однако, никаких оснований для вывода, что в условиях многолетней эксплуатации водозабора также не будет подсасывания соленых вод. За сравнительно короткое время проведения опытной откачки соленые воды могли не успеть подтянуться к скважине. Однако в процессе работы водозабора, длящейся годами, с расходом, как правило, значительно бо́льшим дебита откачки, может произойти подсасывание соленых вод. В то же время, если при опытной откачке произошло подтягивание соленых вод, то это вовсе не означает, что подсасывание соленых вод будет иметь место в процессе работы водозабора, так как отдельные опытные кусты могут быть расположены вблизи границы соленых вод, но водозабор стараются по возможности удалить от области соленых

вод. И по этой причине может не быть подсоса соленых вод водозабором.

Самого факта подсасывания соленых вод в процессе откачки недостаточно для суждения о характере поступления соленых вод и изменении качества воды в условиях длительной эксплуатации.

Для долгосрочного прогноза качества отбираемой воды необходимо четкое представление о граничных условиях фильтрационного потока и возможных их изменениях в процессе эксплуатации, типе водозабора и режиме его работы, ибо именно этими факторами определяются особенности поступления соленых вод к водозабору.

Например, при опытной откачке в непосредственной близости от границы соленых вод в условиях приканальной линзы подсос соленых вод может произойти сравнительно быстро. Однако к водозабору (линейному ряду скважин), удаленному от границы линзы, подтягивание соленых вод вследствие этого обстоятельства, а также структуры фильтрационного потока будет весьма длительным. Да и сам характер изменения минерализации воды в процессе эксплуатации приканальной линзы (при подсосе соленых вод) будет иным, чем об этом можно было бы судить по результатам откачки. Минерализация отбираемой воды сначала будет возрастать, затем, достигнув некоторого максимума, начнет убывать. Этих особенностей при откачке ввиду ее кратковременности и несоответствия условиям эксплуатации, конечно, не удалось бы обнаружить.

Приведем пример из практики неправильной постановки задач, которые предполагается решить с помощью опытных исследований. На одном из месторождений пресных подземных вод в Казахстане для получения «надежных данных о качестве воды во времени» была проведена опытно-эксплуатационная откачка продолжительностью 47 сут. Центральная скважина расположена на расстоянии $\sim$200 м от границы солоноватых вод с минерализацией 1,1 $\div$ 2,0 г/л. Водоносный горизонт сложен песчаниками с пористостью $n_0 = 0{,}1$. Средняя мощность водоносного горизонта 50 м. Откачка проводилась с тремя понижениями: максимальное понижение и расход равны соответственно 5 м и 10 л/с (864 м^3/сут). За время откачки качество подземных вод не изменилось. Найдем время, за которое граница соленых вод переместится к скважине при допущении ее постоянной работы с максимальными расходами, зафиксированными при откачке

$$t = \frac{\pi h n_0 x_1^2}{Q} = \frac{3{,}14 \cdot 50 \cdot 0{,}1 \cdot 200^2}{864} = 720 \text{ сут.}$$

Следовательно, за время откачки ($t = 47$ сут) соленая вода не успела подтянуться к скважине. И делать выводы по результатам этой откачки о том, будет или не будет подсасываться соленая вода в процессе эксплуатации водозабора, конечно,

нельзя. Изложенное выше касается подтягивания соленых вод в плане, но в той же мере относится и к условиям залегания соленых вод в разрезе. Таким образом, приходим к следующему.

Проведение опытных фильтрационных исследований с целью изучения подтягивания соленых вод и изменения качества откачиваемой воды неправильно по существу и нерационально с экономической и технической сторон (дорогостоящие, длительные, мощные откачки). В отдельных случаях (трещиноватые и закарстованные породы, сильная изменчивость проницаемости), когда получение достоверных гидрогеологических параметров затруднительно, постановка таких исследований, по-видимому, имеет смысл.

Опытные откачки вблизи границы соленых вод целесообразно использовать для определения таких параметров, как активная пористость водовмещающих пород. Пусть в процессе такой откачки вследствие подсоса соленых вод возрастает минерализация откачиваемой воды. Построим в системе координат t и C кривую $C = \mathrm{f}(t)$. Взяв с этой кривой значение минерализации C_1, соответствующее времени t_1, на основе формулы (3) главы V найдем величину пористости n_0

$$n_0 = \frac{Qt}{\pi h x_1^2} \cos^2\left[\pi\left(\frac{C_1 - C_\text{п}}{C_\text{с} - C_\text{п}}\right)\right], \tag{11}$$

где x_1 — расстояние от центральной скважины до границы соленых вод.

Получив значение n_0 для нескольких точек на кривой $C = \mathrm{f}(t)$, определим среднее значение пористости. Если минерализация соленых вод ($C_\text{с}$) неизвестна, то, определив минерализацию откачиваемой воды C_1 и C_2 для двух моментов времени t_1 и t_2, величину n_0 находим подбором из выражения

$$\frac{C_1 - C_\text{п}}{C_2 - C_\text{п}} = \frac{\arccos\sqrt{\dfrac{\pi h n_0 x_1^2}{Qt_1}}}{\arccos\sqrt{\dfrac{\pi h n_0 x_1^2}{Qt_2}}}. \tag{12}$$

Могут быть другие варианты использования кривой $C = \mathrm{f}(t)$ для определения параметров водоносного горизонта.

Для прогноза подтягивания соленых вод и изменения качества воды в процессе эксплуатации необходимо знать граничные условия фильтрационного потока и возможные изменения их во времени. Должны быть выявлены граница соленых вод в плане и в разрезе, размеры переходной зоны, минерализация солоноватых и соленых вод, фильтрационные свойства и пористость пород (особенно в районе водозабора), мощность водоносного горизонта в области пресных и соленых вод, естественный расход и направление потока. Особое внимание должно быть уделено изучению

фильтрационной неоднородности пород по площади и в разрезе. На основе этих данных с помощью аналитических расчетов и моделирования может быть дан прогноз изменения качества воды во времени, который в последующем должен уточняться результатами режимных наблюдений за действующим водозабором.

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОГНОЗОВ

Подход к оценке точности прогнозов

Для практического использования приведенных выше формул необходимо знать величины входящих в эти формулы параметров: мощность h и пористость n_0 водовмещающих пород, расстояние d от водозабора до контура постоянного напора или до непроницаемой границы, естественную скорость движения подземных вод v_e, коэффициент фильтрации K_0 и мощность h_0 слабопроницаемого разделяющего слоя, соотношение коэффициентов фильтрации α, мощность пресных вод $h_п$ и др. Поскольку все эти величины определяются приближенно, очевидно, что и расчеты перемещения соленых вод в плане или в разрезе также будут приближенными. Мы не говорим здесь о дополнительных погрешностях, обусловленных несовершенством самих формул, практической и теоретической невозможностью учета всех особенностей гидрогеологических условий.

Ниже будет рассмотрен вопрос о погрешностях гидрогеологических прогнозов перемещения жидкости в пласте, возникающих вследствие неточности определения исходных гидрогеологических параметров. Как известно, относительная ошибка определения какой-либо величины (в нашем случае времени движения границы раздела подземных вод или минерализации) находится следующим образом:

$$\delta T = \frac{T_0 - T_1}{T_0}, \qquad (13)$$

где T_0 — точное значение искомой величины (времени); T_1 — приближенное значение времени; δT — относительная погрешность определения T.

Величина T является функцией многих переменных, т. е.

$$T = \mathrm{f}(x, y, z, \ldots, u).$$

Неточность определения T может быть обусловлена неточностью определения одного или нескольких параметров. Пусть $T = \mathrm{f}(x)$, тогда точному значению $x = x_0$ будет соответствовать точное значение $T = T_0$, приближенному значению $x = x_1$ — приближенное значение $T = T_1$. Относительная погрешность определения T находится по формуле (13).

Если $T = \mathrm{f}(x, y, z, \ldots, u)$, по формуле (13) вычисляются частные относительные погрешности δT_x, δT_y, ..., δT_u, обуслов-

ленные неточностью определения исходных величин x, y, ..., u. Общая относительная погрешность будет складываться из частных относительных погрешностей

$$\delta T = \delta T_x + \delta T_y + \ldots + \delta T_u. \tag{14}$$

Для относительной погрешности может быть записана также следующая формула [85]:

$$\delta T = \left|\frac{\frac{\partial T}{\partial x}}{T}\right| \Delta x + \left|\frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{T}\right| \Delta y + \ldots + \left|\frac{\frac{\partial T}{\partial u}}{T}\right| \Delta u, \tag{15}$$

где $\Delta x = x_0 - x_1$, $\Delta y = y_0 - y_1$, ..., $\Delta u = u_0 - u_1$ — абсолютные погрешности аргументов x, y, ..., u.

Учитывая, что

$$\frac{\frac{\partial T}{\partial x}}{T} = \frac{\partial}{\partial x} \ln T, \quad \frac{\frac{\partial T}{\partial y}}{T} = \frac{\partial}{\partial y} \ln T \text{ и т. д.}$$

выражение (15) может быть записано в виде [85]:

$$\delta T = \Delta x \left|\frac{\partial}{\partial x} \ln T\right| + \Delta y \left|\frac{\partial}{\partial y} \ln T\right| + \ldots + \Delta u \left|\frac{\partial}{\partial u} \ln T\right|. \tag{16}$$

Ниже будет дана оценка точности прогнозов времени t движения соленых вод по пласту и изменения качества отбираемой воды C. Принимая какое-либо значение того или иного параметра за «точное» и задаваясь отклонениями этого параметра от точного значения, оценим погрешности определений t или C.

Влияние погрешности определения мощности водоносного горизонта на точность прогнозов времени движения соленых вод в пласте

Мощность водоносного горизонта неодинаково влияет на время движения подземных вод по пласту в условиях бассейна ($v_e = 0$) и в условиях потока ($v_e > 0$).

Пусть h_0 и t_0 — точные величины мощности и времени, а h_1 и t_1 — приближенные значения этих величин.

В условиях бассейна ошибка в оценке времени такая же, как и в определении мощности. Например, при относительной погрешности мощности $\delta h = 50\%$, относительная погрешность времени δt также будет 50%. При этом, если $h_1 > h_0$, то $t_1 > t_0$ и, наоборот, если $h_1 < h_0$, то $t_1 < t_0$.

В условиях потока зависимость t от h более сложная, хотя качественная направленность ошибки t такая же, как в условиях бассейна. В условиях потока влияние мощности водоносного горизонта на время движения подземных вод, как это следует из

формулы (2) главы IV, сильнее сказывается при больших дебитах водозабора, малой скорости естественного потока и вблизи скважины. Наоборот, при малых расходах скважин, больших скоростях естественного потока и в удалении от скважины влияние мощности незначительно.

Были выполнены расчеты относительной погрешности времени, δt_h движения подземных вод в зависимости от погрешности определения мощности водоносного горизонта h.

Расчеты точного t_0 и приближенного t_1 значений времени, соответствующие точному h_0 и приближенному h_1 значениям мощности, выполнялись по формуле (2) главы IV, а расчет погрешности δt_h — по формуле (13).

Значения исходных параметров: $\gamma = 1000$, 10 000 и 100 000, где

$$\gamma = \frac{Q}{2\pi v_e};$$

$h_0 = 5$ м ($h_1 = 2{,}5$, 4, 6 и 7,5 м), $h_0 = 10$ м ($h_1 = 5$, 7, 12 и 15 м), $h_0 = 20$ м ($h_1 = 10$, 15, 25 и 30 м); $x_1 = 100$, 500, 1000 м.

Результаты расчетов показали:

1) относительная погрешность определения t (времени движения подземных вод) за счет погрешности определения мощности водоносного горизонта значительно меньше в условиях потока, чем в условиях бассейна. Величина погрешности $(\delta t_h)_б$ в условиях бассейна для заданной погрешности δh является максимальной величиной погрешности $(\delta t_h)_п$ в условиях потока, т. е.

$$(\delta t_h)_п \leqslant (\delta t_h)_б;$$

2) относительная погрешность δt_h убывает с возрастанием мощности водоносного горизонта;

3) при $\gamma \leqslant 1000$—5000, $x > 500$ м, $h_0 > 10$ м и $\delta h \leqslant 50\%$ средняя относительная погрешность $\delta t_h = 15 \div 20\%$; при $\delta t_h < 20$—30% и для указанных значений x, γ и h_0 средняя величина $\delta t_h < 10\%$.

Таким образом, при $h_0 > 10$ м и $\delta h \leqslant 30$—50% влиянием погрешности измерения мощности водоносного горизонта на точность расчетов t практически можно пренебречь.

Влияние погрешности определения скорости естественного потока подземных вод на прогноз времени движения

Пусть v_{e0} и v_{e1} соответственно точное и приближенное значения естественной скорости движения подземных вод. Расчет погрешности δt_v за счет погрешности определения v_e выполнен на основе формулы (2). Относительная погрешность δt_v подсчитана для значений $\frac{v_{e1}}{v_{e0}} = 0{,}5$, 1,5 и 2,0.

На основании расчетов можно сделать следующие выводы:

1) относительная погрешность δt_v возрастает с увеличением расстояния x миграции подземных вод;

2) относительная погрешность δt_v убывает с уменьшением величины v_{e0} и ростом дебита скважин;

3) при $v_{e0} \leqslant 0{,}01$ м/сут, $q \geqslant 100$ м²/сут и $x < 1000—2000$ м относительная погрешность расчетов t при ошибке определения v_{e0} в 2 раза (в сторону увеличения или уменьшения) не превышает 20—25% и в среднем составляет 7—10%. При $q < 100$ м²/сут и больших расстояниях движения загрязненных вод погрешность расчетов t за счет погрешности определения v_e возрастает и может достигать 50—70% и более;

4) приближенным критерием необходимости учета естественного движения подземных вод является условие (8) главы III;

5) для прогноза движения загрязненных подземных вод при больших дебитах водоотбора или закачки ($q > 100$ м²/сут) и при движении на сравнительно небольшие расстояния ($<1000—2000$ м) скорость естественного движения подземных вод может быть определена с относительной погрешностью $\pm 50—100\%$; погрешность расчетов δt_v при этом составит $\leqslant 10\%$.

Влияние погрешности определения расстояния до границ пласта на расчет времени движения подземных вод

Рассмотрены схемы: полуограниченный пласт с контуром постоянного напора (к. п. н.) и полуограниченный пласт с непроницаемым контуром. Некоторые оценки влияния границ были уже сделаны при исследовании структуры потоков в этих пластах (см. гл. III).

Пусть d_0 и d_1 — точное и приближенное расстояние от водозабора до контура постоянного напора, а t_0 и t_1 — точное и приближенное время движения соленых вод к водозабору. Оценка погрешности времени δt_d за счет погрешности определения расстояния до к. п. н. производилась с использованием формулы (21) главы IV.

Величины погрешности δt_d оценивались для случая, когда движение подземных вод к водозабору происходит со стороны к. п. н., т. е. на отметках $x < d$, и для случая движения подземных вод к водозабору с противоположной стороны, т. е. на отметках $x > d$.

«Истинные» и «ошибочные» значения расстояний от водозабора до к. п. н. принимались: $d_0 = 200$ м, $d_1 = 100$, 150, 250 и 300 м; $d_0 = 1000$ м, $d_1 = 500$, 700, 1300 и 1500 м.

Из проведенного анализа следует:

1) погрешность δt_d за счет неточного определения расстояния d до к. п. н. в общем невелика и не превышает 30—40%;

2) погрешность δt_d больше в области $x > d$ и меньше в области $x < d$;

3) погрешность δt_d больше при $d_1 < d_0$ и меньше при $d_1 > d_0$;

4) погрешность δt_d убывает с удалением водозабора от реки (к. п. н.).

Аналогичные расчеты δt_d были выполнены для полуограниченного пласта с непроницаемым контуром. Вычисления производились на основе формулы (30) главы IV. Расчеты выполнены для случая движения подземных вод от водозабора в сторону от непроницаемого контура (для $x > d$).

Эти расчеты показали, что погрешность δt_d за счет неточного определения расстояния до непроницаемой границы невелика и составляет в среднем 5—8%. Интересно следующее обстоятельство. Вблизи скважины, т. е. при небольших $|d-x|$, погрешность δt_d небольшая, с увеличением $|d-x|$ погрешность δt_d сначала возрастает, а затем начинает убывать. Это объясняется тем, что вблизи скважины влияние границы подавляется, на некотором удалении от скважины влияние границы достигает максимума, на большом удалении от границы влияние ее незначительно и постепенно убывает. Такая же закономерность имеет место при границе $H = \text{const}$.

Влияние погрешности определения ширины пласта-полосы на прогноз времени движения соленых вод к водозабору

Рассматривается пласт-полоса с непроницаемыми границами.

Относительная погрешность оценки времени движения подземных вод в пласте-полосе δt_l за счет ошибки в определении ширины пласта-полосы l в условиях бассейна вычислялась по формуле

$$\delta t_l = 1 - \frac{l_1^2}{l_0^2} \cdot \frac{\ln \operatorname{ch} \frac{\pi y}{l_1}}{\ln \operatorname{ch} \frac{\pi y}{l_2}}, \qquad (17)$$

где l_0 и l_1 — соответственно точное и приближенное значения ширины пласта-полосы. Из формулы видно, что величина δt_l зависит не только от l, но и от расстояния y перемещения подземных вод. Зависимость δt_l от расстояния y в основном сказывается при значениях y, соизмеримых с l. При $y \gg l_0$ и $y \gg l_1$ величина δt_l определяется почти исключительно соотношением между l_0 и l_1.

Для больших y и полагая, что l_1 незначительно отличается от l_0 ($\delta l \leqslant \pm 30$—$50\%$), получается следующая приближенная оценка предельных значений погрешности δt_l:

$$\delta t_l \approx 1 - \frac{l_1}{l_0}. \qquad (18)$$

Вычисления δt_l по формуле (5) производились для следующих значений l_0, l_1 и y:

$l_0 = 1000$ м ($l_1 = 500$, 700, 1300, 1500 м);

$l_0 = 2000$ м ($l_1 = 700$, 1000, 1500, 2500, 3000 м);

$l_0 = 3000$ м ($l_1 = 1000$, 1500, 2000, 4000, 5000 м);
$y = 200$, 500, 700, 1000, 1500, 2000 и 3000 м.

Расчеты показали:

1) погрешность δt_l убывает с увеличением ширины l пласта-полосы;

2) при $l_1 < l_0$ погрешность δt_l больше, чем при $l_1 > l_0$;

3) погрешность δt_l возрастает с увеличением пути движения подземных вод;

4) при ширине полосы $l_0 = 1000$—2000 м и $\delta l \leqslant \pm 50\%$ погрешность $\delta t_e \approx 30$—40% при пути миграции примерно равном l_0; максимальная погрешность δt_l (при пути миграции значительно большем l_0) составит $\sim 50\%$.

Изложенное выше относится к условиям бассейна ($v_e = 0$). При наличии естественного движения подземных вод погрешность δt_l существенно меньше и не превышает $15 \div 20\%$.

Погрешности δt за счет неточности определения расстояния до границ однородного пласта по существу являются предельными величинами погрешностей для неограниченного по площади неоднородного пласта.

Влияние неточности определения параметров слоистого разреза на прогнозы движения подземных вод

Пусть имеются два водоносных слоя, разделенных водоупорным пропластком. Коэффициент фильтрации и мощность верхнего слоя K_1 и h_1, а нижнего слоя K_2 и h_2. Одиночный водозабор вскрывает оба слоя и эксплуатирует их с постоянным расходом. Оценим погрешность определения длины пути движения соленых вод в одном из слоев (например, в верхнем) вследствие неточного определения коэффициента фильтрации этого слоя. Расчеты выполнялись с использованием формулы (61) главы IV, записанной относительно x. Задавались точные значения коэффициентов фильтрации верхнего слоя K_1^0 и приближенные значения K_1^1. Результаты расчетов показали следующее:

1) погрешность $\delta x_к$ за счет неточного определения коэффициента фильтрации одного из прослоев весьма значительная и может достигать 70—90%;

2) погрешность $\delta x_к$ убывает с ростом истинных значений коэффициента фильтрации и мощности исследуемого слоя;

3) при $K_1^0 > K_2^0$ погрешность $\delta x_к$ больше, чем при $K_1^0 < K_2^0$.

Оценка погрешности определения минерализации воды при подтягивании соленых вод в плане в зависимости от точности определения минерализации соленой воды C_1 и времени T начала подтягивания соленых вод

Расчеты относительной погрешности минерализации отбираемой воды δC в зависимости от погрешности определения минерализации соленой воды C_1 выполнялись на основе формулы (3) главы V для неограниченного в плане бассейна.

Таблица 12

Значения $\delta C = f(\delta C_1)$

$\frac{C_1}{C_0}$	$\frac{C_1'}{C_0}$	T/t					
		0,77	0,67	0,5	0,33	0,2	0,1
3	1,5	—0,18	—0,21	—0,25	—0,28	—0,31	—0,33
	2,0	—0,12	—0,14	—0,16	—0,19	—0,206	—0,22
	4,5	0,18	0,21	0,25	0,28	0,31	0,33
	6,0	0,36	0,42	0,499	0,57	0,62	0,66
10	5,0	—0,33	—0,35	—0,38	—0,407	—0,42	—0,43
	6,7	—0,21	—0,23	—0,25	—0,27	—0,28	—0,286
	15	0,33	0,35	0,38	0,407	0,42	0,43
	20	0,65	0,71	0,77	0,81	0,84	0,87
20	10	—0,39	—0,41	—0,43	—0,45	—0,458	—0,465
	13,3	—0,26	—0,28	—0,29	—0,3	—0,307	—0,311
	30	0,39	0,41	0,43	0,45	0,458	0,465
	40	0,79	0,83	0,87	0,9	0,916	0,93

Результаты расчетов представлены в табл. 12. Слева в вертикальных графах таблицы указаны истинные $\frac{C_1}{C_0}$ и ошибочные $\frac{C_1'}{C_1}$ отношения минерализации пресной C_0 и соленой C_1 воды. В горизонтальной графе приведены значения $\frac{T}{t}$, где T — время начала подсасывания соленых вод, t — текущее время.

Анализ расчетов показал следующее:

1) погрешность δC возрастает с увеличением $\frac{C_1}{C_0}$, т. е. с ростом C_1;

2) погрешность δC возрастает со временем $\left(\text{с ростом } \frac{T}{t}\right)$, причем быстрее растет при $\frac{T}{t} > 0{,}5$ и медленнее при больших значениях t $\left(\frac{T}{t} < 0{,}5\right)$;

3) погрешность δC значительно больше при завышении C_1, чем при занижении C_1;

4) при $\frac{C_1}{C_0} \sim 3$ и завышении C_1 в 2 раза $\left(\frac{C_1'}{C_0} \sim 6\right)$ ошибка δC при $\frac{T}{t} > 0{,}5$ составляет 35—50%, а при занижении C_1 в 2 раза $\left(\frac{C_1'}{C_0} \sim 1{,}5\right)$ погрешность $\delta C \approx 18$—25%; при $\frac{C_1'}{C_0} \sim 10$ погрешность δC составляет 65—80% при завышении C_1 в 2 раза.

Таблица 13

Значения $\delta C = f(\delta T)$

$\frac{T}{t}$	$\frac{T_1}{t}$	C_1/C_0				
		3	5	10	15	20
0,77	0,385	0,19	0,31	0,47	0,55	0,6
	0,513	0,13	0,21	0,32	0,37	0,41
	0,85	—0,05	—0,08	—0,12	—0,14	—0,15
	0,9	—0,086	—0,14	—0,21	—0,25	—0,27
0,5	0,25	0,11	0,16	0,23	0,26	0,27
	0,33	0,07	0,11	0,15	0,17	0,18
	0,75	—0,11	—0,16	—0,23	—0,26	—0,27
	0,9	—0,2	—0,29	—0,41	—0,46	—0,48
0,2	0,1	0,05	—0,075	0,1	0,106	0,11
	0,133	0,03	0,048	0,06	0,068	0,071
	0,3	—0,04	—0,06	—0,08	—0,087	—0,09
	0,4	—0,08	—0,12	—0,15	—0,166	—0,173

Рассмотрим погрешность оценок минерализации отбираемой воды вследствие неточности определения времени T начала подсасывания соленых вод. Результаты расчетов относительной погрешности $\delta C = f(\delta T)$ приведены в табл. 13 (T и T_1 — точное и ошибочное значения времени начала подсоса соленых вод; t — текущее время; C_0 и C_1 — минерализация пресных и соленых вод). Оценка погрешности δC производилась на основе формулы (3) главы V.

На основе проведенных расчетов можно сделать выводы:

1) погрешность δC возрастает в начальный период подсасывания соленых вод;

2) погрешность $\delta C = f(\delta T)$ увеличивается с ростом отношения $\frac{C_1}{C_0}$;

3) при больших значениях $t\left(\frac{T}{t} < 0{,}5\right)$, т. е. при долгосрочном прогнозе, при ошибке определения примерно в 1,5 раза и $\frac{C_1}{C_0} \leqslant 20$ величина погрешности δC не превышает 10—15% и в среднем составляет 5—8%; при $0{,}5 \leqslant \frac{T}{t} \leqslant 0{,}8$ величина погрешности δC при тех же прочих условиях не превышает 20—25% и в среднем равна 12—15%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аравин В. И., Нумеров Н. Н. Теория движения жидкостей и газов в неоднородной пористой среде. М.—Л., Гостехтеориздат. 1953.

2. Поиски, разведка, оценка запасов и эксплуатация линз пресных вод. М., «Недра», 1969, 304 с. Авт.: В. Д. Бабушкин, И. С. Глазунов, В. М. Гольдберг, Н. И. Пучугин, А. А. Шавырина.

3. Бабушкин В. Д., Глазунов И. С., Гольдберг В. М. Основные принципы эксплуатации и оценка запасов крупных линз пресных вод. М., Госгеолтехиздат, 1962, 102 с.

4. Бабушкин В. Д. Методы гидрогеологических расчетов с учетом неоднородности пород в плане. — «Бюлл научн.-техн. информ. Госгеолкома СССР, 1963, № 2 (46), с. 21—26.

5. Бабушкин В. Д., Глазунов И. С. Методика определения фильтрационных свойств пород при наличии в плане зон с различной проницаемостью. — «Бюлл. научн.-техн. информ. Госгеолкома СССР», 1962, № 1, (45), с. 17—23.

6. Бабушкин В. Д., Гольдберг В. М. Оценка запасов пресных подземных вод в районе морских побережий. — «Изв. высш. учеб. заведений. Геология и разведка», 1971, № 6, с. 78—83.

7. Барановская Н. Н. Гидродинамическое исследование простейших случаев перемещения контура нефтеносности и обводнения скважин. — «Труды МНИ», 1955, вып. 14, с. 203—212.

8. Барановская Н. Н. Кинематика системы источник — сток на плоскости. «Труды МИНХ и ГП им. Губкина», 1963, вып. 38, с. 200—207.

9. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. М., Гостоптехиздат, 1962, 275 с.

10 Белицкий А. С., Орлова Е. И. О движении продуктов деления урана в подземных водах. — «Гигиена и санитария», 1960, № 6, с. 31—36.

11. Биндеман Н. Н., Язвин Л. С. Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. Изд. 2-е. М., «Недра», 1970, 215 с.

12. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Некоторые вопросы фильтрации загрязненных промстоков в природных водоносных пластах. — «Изв. АН СССР, МЖГ», 1969, № 6, с. 52—57.

13. Бочевер Ф. М. Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. М., «Недра», 1969, 325 с.

14. Основы гидрогеологических расчетов. Изд. 2-е. М., «Недра», 1969, 368 с. Авт.: Ф. М. Бочевер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев, В. М. Шестаков.

15. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Гидрогеологическое обоснование защиты подземных вод и водозаборов от загрязнений. М., «Недра», 1972, 128 с.

16. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Конвективная диффузия солей в радиальном потоке подземных вод в связи с защитой их от

загрязняющих стоков. «Труды ВОДГЕО. Гидрогеология», 1966, вып. 13, с. 159—181.

17. Бочевер Ф. М., Орадовская А. Е. Приближенный метод определения границы раздела между подземными водами разного состава. — «Разведка и охрана недр», 1971, № 11, с. 44—48.

18. Вахитов Г. Г., Говорова Г. Л. Некоторые радиальные задачи вытеснения нефти водой из неоднородного по проницаемости пласта. — «Труды ВНИИ», 1956, вып. 8, с. 212—219.

19. Веригин Н. Г. Нагнетание вяжущих растворов в горные породы. «Изв. АН СССР, ОТН», 1952, № 5, с. 247—255.

20. Веригин Н. Н. Некоторые вопросы химической гидродинамики, представляющие интерес для мелиорации и гидротехники. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1953, № 10, с. 1369—1382.

21. Веригин Н. Н., Шестаков В. М. Методы расчета движения грунтов вод в двухслойной среде. Информ. матер. ВНИИ ВОДГЕО, М., 1954, с. 51.

22. Веригин Н. Н. Миграция растворенных и эмульгированных веществ при сбросах промышленных стоков в водоносные пласты. — «Труды ВОДГЕО, Инженерная гидрогеология», 1969, вып. 22 с. 27—39.

23. Веригин Н. Н., Саркисян В. С. Особенности движения подземных вод в полуограниченном пласте при действии водозаборов подземных вод. — «Водоснабжение и сантехника», 1968, № 3, с. 21—24.

24. Веригин Н. Н., Шержуков Б. С. Диффузия и массообмен при фильтрации жидкостей в пористых средах. — В кн.: Развитие исследований по теории фильтрации в СССР (1917—1967 гг.). М., 1969, с. 210—285.

25. Вопросы гидрогеологических расчетов. Под ред. Ф. М. Бочевера и В. М. Шестакова. М., «Мир», 1964, с. 285.

26. Гиринский Н. К. Расчет фильтрации под гидротехническими сооружениями на неоднородных грунтах. М.—Л., Стройиздат, 1941, 160 с.

27. Гиринский Н. К. Некоторые вопросы динамики подземных вод. — «Вопросы гидрогеологии и инженерной геологии», 1947, № 9, с. 15—63.

28. Глазунов И. С. Методика защиты лучевых водозаборов от подсасывания соленых вод снизу. — «Бюлл. НТИ МГ и ОН СССР», 1962, № 2, с. 21—25.

29. Голубева О. В. Лекции по уравнениям движения сплошных сред и элементам гидродинамики. Изд. МОПИ, М., 1960, 204 с.

30. Голубева О. В. Обобщение теоремы об окружности на фильтрационные течения. — «Изв. АН СССР, МЖГ», 1966, № 1, с. 73—77.

31. Гольдберг В. М. Изменение минерализации подземных вод при эксплуатации береговых водозаборов. — «Разведка и охрана недр», 1963, № 12, с. 36—42.

32. Гольдберг В. М. О прогнозе изменения минерализации при эксплуатации подземных вод в условиях подсасывания соленых вод в плане. — «Вопросы геохимии подземных вод», новая сер., 1964, № 9, с. 206—224.

33. Гольдберг В. М. Движение подземных вод разных минерализаций (обзор зарубежных работ). М., 1966, 65 с., (ВСЕГИНГЕО).

34. Гольдберг В. М. Движение границы раздела двух жидкостей в пласте-полосе. — «Гидрогеологические вопросы подземного захоронения пролстоков». 1969, вып. 14, с. 119—130.

35. Гольдберг В. М. Влияние минерализации воды на фильтрационные свойства пород — «Бюлл. науч.-техн. информ», 1965, № 2 (55), с. 50—54.

36. Гольдберг В. М. Об оценке качества подземных вод по данным опытных откачек — «Разведка и охрана недр», 1967, № 4, с. 47—51.

37. Гольдберг В. М. Структура фильтрационного потока в районе берегового водозабора. М., ВСЕГИНГЕО, вып. 10, 1968, с. 58—79.

38. Гольдберг В. М. К расчету подтягивания соленых вод снизу. М., ВСЕГИНГЕО, 1969, вып. 17, с. 85—91.

39. Гольдберг В. М. Изменение минерализации воды при эксплуатации небольших линз пресных вод в условиях подсасывания соленой

воды снизу. — «Бюлл. науч. - техн. информ. МГ и ОН СССР», 1968, № 10 (44), с. 33—38.

40. Гусейн-Заде М. А. Особенности движения жидкости в неоднородном пласте. М., «Недра», 1965, 276 с.

41. Джалилов К. Н. Некоторые вопросы перемещения контура нефтеносности и динамики обводнения скважин. — В кн.: Теоретические и экспериментальные исследования разработки нефтяных месторождений. Изд-во Казанского ун-та, 1964, с. 281—293.

42. Джалилов К. Н, Джафаров Н. Д. О плоской задаче перемещения водонефтяного контакта в неоднородном пласте. — «Докл. АН Аз.ССР», 1962, т. 18, № 12, с. 29—36.

43. Дементьев Л. Ф. О понятии «геологическая неоднородность» продуктивных пластов и методы ее изучения. — «Труды Пермского филиала ин-та Гипровостокнефть», 1965, вып. 1, с. 153—169.

44. Желтов Ю. П. Исследования в области гидродинамики трещиноватых и литологически неоднородных пластов. — «Теория и практика добычи нефти», 1968, с. 211—218.

45. Карпычев В. А. О перемещении водонефтяного контура в пластах с подошвенной водой. — «Инж. сб.», 1959, т. 25, с. 181—187.

46. Карпычев В. А. О влиянии слабо проницаемых включений на эффект заводнения пластов. — «Изв. АН СССР, ОТН», 1958, № 6.

47. Линзы пресных вод пустыни. М., Изд-во АН СССР, 1963, 380 с.

48. Лейбензон Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М., Гостеортехиздат, 1939, 232 с.

49. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М., Гостехиздат, 1961, 487 с.

50. Минкин Е. Л. Гидрогеологические расчеты для выделения зон санитарной охраны водозаборов подземных вод. М., «Недра», 1967, 122 с.

51. Минкин Е. Л. Исследования и прогнозные расчеты для охраны подземных вод.-М., «Недра», 1972, 109 с.

52. Маскет М. Течение однородных жидкостей в пористой среде. М., Гостоптехиздат, 1949, 628 с.

53. Миллионщиков М. Д. Гидромеханический тампонаж скважин. — «Инж. сб.», 1950, т. 7, с. 112—117.

54. Пилатовский В. П. Применение некоторых понятий математической статистики к исследованию фильтрации жидкости в неоднородном пласте. — «Науч.-техн. сб. по добыче нефти», 1965, № 27, с. 17—23.

55. Пилатовский В. П. Влияние призабойной макронеоднородности пласта на дебит скважин. — «Докл. АН СССР», 1953, т. 93, № 3, с. 53—55.

56. Пирвердян А. М. Нефтяная подземная гидравлика. Баку, Азнефтеиздат, 1956, 310 с.

57. Пискунов Н. С., Теслюк Е. В. К вопросу о времени опускания поверхности водяного контакта при остановке скважины. — «Труды ВНИИ», 1960, вып. 28, с. 97—107.

58. Пискунов Н. С., Говорова Г. Л. Приближенный метод определения контура нефтеносности. — «Труды ВНИИ». 1954, вып. 6, с. 173—185.

59. Полубаринова-Кочина П. Я. О притоке жидкости к скважинам в неоднородной среде. — «Докл. АН СССР», 1942, т. 34, № 2, с. 210—213.

60. Полубаринова-Кочина П. Я. Теория движения грунтовых вод. М., Гостехтеориздат, 1952, 676 с.

61. Милн-Томсон Л. М. Теоретическая гидродинамика. М., «Мир», 1964, 495 с.

62. Пыхачев Г. Б. Подземная гидравлика. М., Гостоптехиздат, 1961, 387 с.

63. Салехов Г. С. Решение некоторых задач управления движением контура нефтеносности по характеру размещения скважин. — «Изв. Казанского филиала АН СССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук», 1957, вып. 11, с. 37—49.

64. К вопросу обводнения нефтяных скважин в пластах с подошвенной водой. — «Изв. Казанского филиала АН СССР. Сер. физ.-мат. и техн. наук», 1954, вып. 5, с. 87—98. Авт.: Г. С. Салехов, В. Л. Данилов, Н. Ф. Иванов, А. Н. Хованский.

65. Стклянин Ю. М. Потенциал несовершенной скважины в двухслойном однородно-анизотропном радиальном пласте. — «Инж. сб.», 1962, т. 2, вып. 1, с. 131—138.

66. Спорышев В. С. Взаимодействие эксплуатационной и нагнетательной скважин в пласте, содержащем круговое включение. — «Науч.-техн. сб. по добыче нефти», 1964, вып. 24, с. 51—58.

67. Сорокина И. А. Некоторые особенности проявления упругого режима фильтрации в пределах Нукусской зоны пресных вод. — В кн.: Гидрогеол. сб. № 4. Свердловск, 1964, с. 163—169.

68. Рошаль А. А., Шестаков В. М. О миграции подземных вод в слоистых пластах. — «Гидрогеологические вопросы подземного захоронения промстоков», 1969, вып. 14, с. 43—56.

69. Рошаль А. А. Массоперенос в двухслойной пористой среде. — «Прикл. механика и техн. физика», 1969, № 4, с. 47—53.

70. Телков А. П., Стклянин Ю. М. О времени безводной эксплуатации несовершенных скважин в пластах с подошвенной водой. — «Науч.-техн. сб. по добыче нефти», 1963, вып. 19, с. 28—37.

71. Чарный И. А. Подземная гидрогазодинамика. М., Гостоптехиздат, 1964, 396 с.

72. Чарный И. А. Фильтрация в пласте с непроницаемой кровлей и подошвой, разделенной слабопроницаемой перемычкой. — «Труды МИНХ им. Губкина», 1961, вып. 33, с. 87—99.

73. Чарный И. А. Приток к скважинам в пластах с неоднородной проницаемостью. — «Инж. сб.», 1954, т. 18, с. 210—218.

74. Чуйко В. М. Прогноз изменения уровней при неустановившейся фильтрации к скважине в водоносных пластах, разделенных слабопроницаемым слоем. — «Труды координационного совещания по гидротехнике», 1967, вып. 35, с. 238—245.

75. Шестаков В. М. О влиянии упругого режима фильтрации в раздельных слоях на взаимодействие водоносных горизонтов. — «Геология и разведка», 1963, № 10, с. 51—57.

76. Шестаков В. М. О фильтрации в напорных горизонтах при выемке котлованов или карьеров. — «Изв. АН СССР. Механика и машиностр.», 1962, № 2, с. 133—135.

77. Шестаков В. М. Исследование внутренней кинематики неустановившегося фильтрационного потока и вывод уравнения неустановившейся фильтрации. — «Докл. АН СССР», 1953, т. 45, № 5, с. 31—36.

78. Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. М., 1961, 73 с, ВНИИ ВОДГЕО.

79. Шестаков В. М. Расчет движения границы раздела двух несмешивающихся жидкостей при фильтрации в горизонтальном напорном пласте. — В кн.: Научные сообщения ВОДГЕО (Водоснабжение). М., 1960, с. 111—123.

80. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. М.—Л., Гостоптехиздат, 1949, 523 с.

81. Щелкачев В. Н., Пыхачев Г. Б. Интерференция скважин и теория пластовых водонапорных систем. Баку, Аз. ГОНТИ, 1939, 380 с.

82. Щелкачев В. Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М., Гостоптехиздат, 1959, 467 с.

83. Щелкачев В. Н. Постановка задачи и исследование некоторых закономерностей обводнения скважины в простейших условиях. — «Труды МНИ им. И. М. Губкина», 1956, вып. 14, с. 184—196.

84. Инструкция по применению классификации эксплуатационных запасов подземных вод. М., Госгеолтехиздат, 1962, 86 с.

85. Кассандрова О. Н., Лебедев В. В. Обработка результатов наблюдений. М., «Наука», 1970, 104 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение 3

Глава I. Гидрогеологические условия взаимосвязи пресных подземных вод с солеными водами . . 6

Пресные воды морских побережий. Внедрение морских вод 7
Линзы пресных вод засушливых и пустынных областей 15
Обоснование расчетных схем для прогноза подтягивания соленых вод к водозабору 18

Глава II. Методика прогноза качества подземных вод на водозаборах 27

Глава III. Структура движения подземных вод к водозаборам 34

Неограниченный по площади водоносный горизонт . 34
Водоносный горизонт с контуром постоянного напора 40
Водоносный горизонт с непроницаемой границей . . 46
Структура потока в пласте-полосе 47

Глава IV. Прогноз времени подтягивания соленых вод к водозабору по пласту 56

Неограниченный по площади водоносный горизонт . 56
Полуограниченный по площади водоносный горизонт с контуром постоянного напора 69
Полуограниченный пласт с непроницаемой границей
Влияние неоднородности водоносного горизонта . . 75
Влияние слоистости разреза на время движения подземных вод 87

Глава V. Прогноз изменения минерализации воды на водозаборе 90

Одиночный водозабор в неограниченном по площади водоносном горизонте 90
Одиночный водозабор в полуограниченном пласте с контуром постоянного напора 103
Прогноз качества воды в случае взаимодействующих скважин 111
Некоторые вопросы подтягивания соленых вод снизу 114
Основные закономерности изменения качества воды на водозаборах 121

Глава VI. Вопросы методики гидрогеологических исследований пресных подземных вод в сложных гидрохимических условиях 124

Гидрогеологические исследования пресных подземных вод, контактирующих с солеными водами 124
Об оценке качества подземных вод по данным опытных откачек 136
Оценка точности гидрогеологических прогнозов . . 140

Список литературы 148

84 коп

НЕДРА