

Е. Л. МИНКИН

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН
САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ
ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

В. Л. Минкин
МИНИСТЕРСТВО ГЕОЛОГИИ СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОГЕОЛОГИИ И ИНЖЕНЕРНОЙ ГЕОЛОГИИ (ВСЕГИНГЕО)

Е. Л. МИНКИН

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ
РАСЧЕТЫ
ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН
САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ
ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Под редакцией *Н. Н. Биндемана*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»

Москва 1967

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД. МИНКИН Е. Л. 1967 г. 1—124 стр.

В работе приводятся краткие сведения о практике проектирования зон санитарной охраны водозаборов подземных вод в СССР и за рубежом. Описаны существующие и предлагаются новые методы расчета и выделения зон санитарной охраны для различных видов водозаборов, работающих в различных схематизированных гидрогеологических условиях. Подробно рассмотрены одиночный или приводимый к одиночному, два взаимодействующих и линейный водозаборы. Показано выделение зон санитарной охраны перечисленных водозаборов для схематизированных условий неограниченного и полугограниченного фильтрационных потоков. Большинство предлагаемых расчетных формул представлены в удобной для использования графической форме. Рассмотрены условия защищенности от загрязнения различных по характеру залегания водоносных горизонтов. Для этого кратко рассмотрены источники загрязнения подземных вод и пути, какими попадают к последним загрязняющие растворы. На этой основе определены необходимые ограничения в пределах зон санитарной охраны водозаборов, эксплуатирующих различные водоносные горизонты.

Приводятся рекомендации по размещению водозаборов при обнаружении в разведваемом районе очагов загрязнения в подземных водах или существовании источников загрязнения, могущих вызвать образование таких очагов.

В работе охарактеризован комплекс гидрогеологических исследований, необходимых для получения расчетных параметров и для обоснованного выбора расчетных схем.
Табл.—4, илл.—53, библ.—15.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ, ПРИНЯТЫЕ В ПРИВЕДЕННЫХ НИЖЕ ФОРМУЛАХ И ГРАФИКАХ

- H_0 — напор в точке, соответствующей началу координат, до ввода водозаборов в эксплуатацию;
- k — коэффициент фильтрации;
- i — уклон естественного потока;
- m — мощность водоносного горизонта;
- $q = kmi$ — единичный расход естественного потока;
- Q — расход каждого водозабора (в случае линейного ряда скважин — суммарный расход всех скважин ряда);
- S — понижение уровня в рассматриваемой точке, вызванное влиянием водозаборов;
- R — приведенный радиус области питания водозабора, который может быть зависящим и не зависящим от времени t ;
- t — время, прошедшее с начала эксплуатации водозабора;
- μ — активная пористость;
- l — половина длины горизонтальной дрены, эквивалентной по дебиту линейному ряду скважин (если число скважин n , а расстояние между соседними скважинами 2σ , то $l = n\sigma$, т. е. концом ряда считается точка, находящаяся за последней скважиной на расстоянии, равном σ);
- C — значение функции тока для каждой данной линии тока, определяемое подстановкой в уравнение линий тока координат любой точки на данной линии тока.

ВВЕДЕНИЕ

Охрана поверхностных и подземных вод от загрязнения является в настоящее время весьма серьезной проблемой.

Колоссальное количество недостаточно очищенных, а зачастую и совсем не очищенных сточных вод от разного рода производств, и особенно предприятий химической промышленности, сбрасывается в поверхностные водоемы и водотоки, недопустимо загрязняя последние и создавая реальную угрозу здоровью людей.

Сотни рек во всех развитых в промышленном отношении странах загрязнены настолько, что в них перестала водиться рыба.

В значительной мере загрязнены и все крупные реки Европейской части СССР, Урала и Казахстана. Все они являются или действительными или потенциальными источниками загрязнения подземных вод, эксплуатируемых береговыми водозаборами.

Все возрастающее количество сточных вод подается на очистные сооружения, поля фильтрации и на другие участки сброса. Как правило, очистные сооружения работают с большой перегрузкой, не справляясь со своими задачами. Большое количество сточных вод вследствие этого выливается на дневную поверхность почти без очистки и скапливается в понижениях рельефа. Каждый из таких участков сброса сточных вод становится источником загрязнения подземных вод.

Попадание загрязненных таким образом подземных вод в район водозаборов, эксплуатирующих эти подземные воды, приводит в большинстве случаев к выходу водозаборов из строя, так как недопустимо ухудшаются органолептические свойства (вкус, запах, цвет) откачиваемой воды или она становится опасной для здоровья людей.

Одним из важнейших мероприятий по предупреждению попадания загрязненных вод в район водозаборов является создание вокруг этих водозаборов зон санитарной охраны.

В соответствии с «Инструкцией по установлению зон санитарной охраны хозяйственно-питьевых водопроводов с подземными источниками водоснабжения», утвержденной Всесоюзной государственной санитарной инспекцией СССР (ВГСИ) в 1956 г., предусматривается создание двух поясов санитарной охраны водозабо-

ров: первого пояса — зоны строгого режима, второго пояса — зоны ограничений.

Зона строгого режима включает участок вокруг водозабора радиусом не менее 30 м при эксплуатации артезианских вод и не менее 50 м — при эксплуатации грунтовых вод. Эта зона отчуждается, ограждается и обеспечивается охраной.

Зона ограничений, или собственно зона санитарной охраны, охватывает территорию, использование которой ограничивается в целях предохранения эксплуатируемого водоносного горизонта от загрязнения.

Второй пояс санитарной охраны, его размеры и конфигурация в плане определяются прежде всего гидрогеологическими условиями в районе водозабора, а также характером самого водозабора.

К сожалению, до последнего времени в Советском Союзе и за рубежом не было достаточно разработанной методики расчета и выделения зон санитарной охраны, основанной на учете реальной природной обстановки.

Сейчас, когда издано «Положение об охране подземных вод» и принимаются решительные меры по проведению этого Положения в жизнь, отсутствие методики расчета и выделения зон санитарной охраны водозаборов становится недопустимым.

В связи с тем, что на территориальные геологические управления Министерства геологии СССР возложен контроль за охраной подземных вод, а организация зон санитарной охраны является одним из важнейших профилактических мероприятий по охране качества подземных вод в районе водозаборов, во ВСЕГИНГЕО проведены исследования по теме: «Гидрогеологическое обоснование зон санитарной охраны водозаборов подземных вод».

В процессе исследований проведено детальное ознакомление с практикой проектирования зон санитарной охраны в ряде ведущих проектных учреждений страны (Гипроспецпромстрой, Водоканалпроект, Гипрокоммунводканал, Мособлпроект, Институт курортологии и некоторые другие). Рассмотренные при этом проекты зон санитарной охраны около конкретных водозаборов подземных вод позволили выявить основные затруднения, с которыми приходится сталкиваться проектировщикам в их работе, и направить исследования на решение этих вопросов для наиболее типичных гидрогеологических условий.

Работа выполнена в Лаборатории динамики подземных вод ВСЕГИНГЕО. Автор выражает благодарность научному редактору работы Н. Н. Биндману, а также сотрудникам Лаборатории А. Ф. Александровичу, А. А. Комаровой и Ю. Б. Меркову, участвовавшим в исследованиях и оказавшим большую помощь в подготовке рукописи к печати.

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В России, как и в ряде других стран, первые установления по организации зон санитарной охраны относились к источникам минеральных вод и вышли еще в XIX веке. Однако лишь в начале нашего столетия были приняты первые законоположения об охране подземных вод питьевого назначения. При этом речь шла еще не о создании зон санитарной охраны, а прежде всего о мерах по недопущению распространения загрязнения.

Только в последние 25—30 лет в разных странах и в разные годы были приняты законы или постановления об организации зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения.

В Советском Союзе первое «Положение о проектировании зон санитарной охраны водопроводов и источников водоснабжения», в котором предусматривалась организация зон санитарной охраны водозаборов подземных вод, было утверждено 7 мая 1938 г. — Всесоюзной Государственной санитарной инспекцией (ВГСИ).

Это Положение, действующее и в настоящее время, было дополнено в части подземных вод специальной «Инструкцией по установлению зон санитарной охраны хозяйственно-питьевых водопроводов с подземными источниками водоснабжения», выпущенной ВГСИ 7 июня 1956 г.

Как отмечалось по этой инструкции предусматривается организация двух поясов санитарной охраны: первый пояс — зона строгого режима, второй пояс — зона ограничений.

В пределах зоны ограничений, или собственно зоны санитарной охраны водозаборов, запрещается проведение земляных работ с разрушением защитного слоя водоносного горизонта, регулируются все строительные работы, благоустраиваются существующие населенные пункты, не допускается загрязнение водоемов и водотоков, запрещается организация хвостохранилищ, золоотвалов, полей фильтрации, строительство промышленных предприятий, территория которых может быть загрязнена, а также запрещается сброс сточных вод, ограничивается использование ядохимикатов и удобрений в сельском хозяйстве. Размеры зоны ограничений инструкцией не регламентируются.

Две зоны санитарной охраны предусматриваются и законодательством Румынии, где в зону строгого режима отводится территория, ограниченная контуром, время движения от которого к водозабору больше чем 30 суток, в течение которых, как предполагается, происходит естественная очистка бактериально загрязненных вод.

В ФРГ в соответствии с законом, изданным в 1957 г., охранная область состоит из трех зон: района каптажа, узкой зоны охраны и широкой зоны охраны.

В район каптажа в зависимости от данных конкретных условий отводится участок вокруг водозабора радиусом от 10 до 50 м.

Узкая зона охраны охватывает территорию, время движения от границ которой к водозабору достаточно для отмирания микроорганизмов. Таким образом, узкая зона охраны полностью соответствует зоне строгого режима, предусмотренной законодательством Румынии.

В законе ФРГ это время принимается равным 50 суткам для крупнообломочных и трещиноватых пород и 30 суткам — для пород с хорошей очистительной способностью. В последнем случае расстояние от границ зоны до водозабора принимается равным 50 м.

В карстовых областях граница этой зоны располагается на расстоянии до 2 км от водозабора.

При использовании артезианских водоносных горизонтов, надежно защищенных водоупорной кровлей, организации узкой зоны охраны законом не требуется.

Внешняя граница третьей — широкой зоны охраны должна проходить на таком расстоянии от водозабора, чтобы предохранить его от химического и радиоактивного загрязнения. При этом, если область питания горизонта находится ближе 2 км от водозабора, она вся должна отводиться в эту зону. Если же область питания горизонта находится дальше, то предусматривается разделение широкой зоны на две — За и Зб. Во внутренней зоне За, граница которой проходит на расстоянии до 2 км от водозабора, должны выполняться еще санитарные мероприятия, связанные с охраной от бактериального и органического (химического) загрязнения. В пределах зоны Зб, захватывающей и область питания, нельзя допускать образования очагов стойкого химического загрязнения.

Выделение зон санитарной охраны вокруг водозаборов, эксплуатирующих подземные воды, предусматривается также законодательством ряда других стран (ГДР, Австрия, Швеция, США и др.).

Все это показывает, что необходимость в установлении таких зон как важнейшего профилактического мероприятия по охране подземных вод от загрязнения не вызывает сомнения.

Однако методика выделения зон санитарной охраны в разных странах различна и различна поэтому эффективность этих зон.

Румынские ученые Д. Чок и Р. Трофин в двух статьях, помещенных в журнале «Hidrotechnica» за 1956 г. (№ 1 и № 2), разра-

ботали и опубликовали методику выделения первого пояса санитарной охраны, или так называемых зон строгого режима.

Как отмечалось, в зону строгого режима в Румынии отводится территория, ограниченная контуром, время движения от которого к водозабору равно 30 суткам.

Д. Чокм разработана методика выделения таких зон для водозаборов, эксплуатирующих водоносные горизонты, пользующиеся широким распространением и не имеющие гидравлической связи с поверхностными водами. Такие условия характеризуют так называемый «неограниченный» водоносный пласт.

Р. Трофин разработана методика выделения зон строгого режима около береговых водозаборов, эксплуатирующих водоносный горизонт, тесно гидравлически связанный с поверхностными водами.

При этом рассмотрены лишь условия «бассейна», т. е. условия, когда скорость движения подземных вод пренебрежимо мала и может быть принята равной нулю.

Несмотря на известную приближенность предлагаемой Д. Чокм и Р. Трофин методики, она несомненно может служить основой для выделения зон санитарной охраны.

Выделением второго пояса санитарной охраны, названные авторы не занимались.

Можно лишь отметить, что Д. Чокм привел уравнение нейтральной линии тока в фильтрационном поле одиночного водозабора, работающего в условиях «неограниченного» потока подземных вод, и предложил оконтуривать зону захвата водозабора вниз и в сторону по потоку от водозабора. При этом расстояние до боковой границы зоны захвата принимается везде одинаковым и равным максимальной ширине захвата, которая находится лишь в бесконечном удалении от водозабора вверх по потоку.

Первой сводной работой в Советском Союзе по зонам санитарной охраны явилась книга В. И. Муската «Санитарная охрана источников водоснабжения» (1937). В этой работе автор дает обширную сводку зарубежного и отечественного материала по охраняемым зонам и на этой основе рассматривает вопросы выделения и организации зон санитарной охраны. Однако в основном речь идет здесь о поверхностных водосточниках. Что касается зон санитарной охраны водозаборов из подземных вод, то автор ограничивается общими указаниями и говорит лишь об охране от бактериального загрязнения.

В 1951 г. вышла книга Н. Ф. Гуляева «Зоны санитарной охраны подземных источников водоснабжения», в которой рассматриваются вопросы проектирования зон санитарной охраны с разбором примеров на опыте реальных объектов Московской области.

Во второй пояс санитарной охраны автор относит всю область захвата водозабора, принимая эту зону постоянной по ширине на любом расстоянии вверх по потоку от водозабора.

В 1955 г. А. С. Белицкий предложил использовать для расчета зон санитарной охраны формулы Романова, Краснопольского и Биладельяна. Формулы Романова и Краснопольского, рекомендуемые А. С. Белицким для определения зоны захвата соответственно вниз и в сторону от водозабора, завышают расстояния до этих границ вдвое. Балансовая формула, предложенная Н. Н. Биладельяном для условий бассейна, в потоке заведомо преувеличивает время прихода загрязнения сверху по потоку в район водозабора.

В следующей статье, опубликованной в 1961 г. А. С. Белицкий, убедившись в неточности своих прежних рекомендаций, совершенно справедливо предложил использовать для расчета зоны захвата вниз и в стороны по потоку от водозабора строгие формулы В. Н. Щелкачева, а для расчета зоны вверх по потоку предложил хотя и приближенную, но вполне приемлемую для определенного интервала времени формулу. Получив таким образом четыре точки на границе зоны санитарной охраны, можно уже было приближенно построить и эту зону.

Однако предложения А. С. Белицкого были справедливы лишь для условий «неограниченного» потока и для случая только одиночного водозабора.

В 1959 г. вышла книга Е. В. Салтыкова «Проектирование зон санитарной охраны источников водоснабжения», в которой для расчета зон санитарной охраны подземных водосточников использованы два основных положения, с которыми нельзя согласиться: 1) путь самоочищения по бактериологическим показателям длиннее такового по химическим показателям и 2) время, в течение которого патогенная микрофлора остается жизнеспособной при фильтрации по пласту, ограничивается 30 сутками.

Таким образом, автор свел второй пояс санитарной охраны к зоне строгого режима румынского законодательства.

Первое положение Е. В. Салтыкова является вообще неверным, так как большинство химических загрязнений остается в растворе значительно дольше бактериального и, следовательно, проходит по пласту значительно больший путь.

Второе положение является спорным, так как до настоящего времени этот вопрос не решен однозначно. Имеются данные о гораздо большей продолжительности жизни бактерий в условиях подземного потока. Эти данные делают сомнительными, между прочим, и рекомендации румынских авторов по выделению зон строгого режима.

Кроме приведенных соображений, показывающих необоснованность принятых Е. В. Салтыковым основных положений, следует отметить, что значительная часть формул, рекомендуемых им для расчета зон санитарной охраны подземных водосточников, являются ошибочными и вообще не применимыми. В частности, при оценке скорости перемещения загрязненных растворов не учитывалась активная пористость.

В 1962 г. была опубликована статья В. И. Владимирского «О гидрогеологических критериях при установлении зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения», в которой предлагается графоаналитический метод выделения зон санитарной охраны, основанный на построении гидродинамической сетки фильтрационного течения путем наложения влияния водозабора на естественный или нарушенный инфильтрацией загрязненных вод поток подземных вод, заданный картой гидроизолепез или гидроизолине. В статье рассмотрен случай «неограниченного» потока в условиях работы нескольких разнедебитных водозаборов.

Рекомендуемый В. И. Владимирским метод требует весьма трудно выполнимого условия о примерно равной обснованности накладываемых фильтрационных течений и является, кроме того, достаточно трудоемким.

Однако для простых гидрогеологических условий и при большом числе произвольно расположенных и разнедебитных водозаборов он наиболее точен и удобен.

Глава 2

МЕТОДИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

На крупных водозаборах постоянного централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения в условиях возможного химического загрязнения подземных вод разного рода соединениями тяжелых металлов (арсенидов, цианидов) и органических веществ (фекалии, фенолы, нафтеновые кислоты), которые могут оставаться в подземных водах неопределенно долгий срок, размеры второго пояса санитарной охраны должны быть такими, чтобы частицы загрязненной жидкости, попавшие в эксплуатируемый водоносный горизонт за границами этого пояса, никогда не могли достигнуть района водозабора.

Чтобы выполнялось это требование, границы второго пояса санитарной охраны должны проходить вдоль так называемых нейтральных линий тока, ограничивающих в фильтрационном поле данного водозабора область питания (или «область захвата») этого водозабора.

На водозаборах, рассчитанных на ограниченный срок эксплуатации, равный, например, амортизационному сроку работы водозабора или предприятия-водопотребителя, в условиях возможного химического загрязнения, которое может оставаться в растворе неопределенно долгий срок, зона санитарной охраны должна быть такой, чтобы время движения загрязненной воды от ее границы до водозабора было заведомо больше проектируемого срока работы водозабора.

Аналогичное требование предъявляется к зонам санитарной охраны водозаборов любого назначения и масштаба при угрозе бактериального загрязнения. В данном случае граница зоны должна проходить на таком расстоянии от водозабора, чтобы время движения частицы загрязненной жидкости от этой границы до водозабора было больше времени выживаемости вредных бактерий в условиях подземного потока.

При выделении зон санитарной охраны, рассчитываемых на определенный срок, равно как и при выделении зон санитарной охраны, границами которых будут нейтральные линии тока, необхо-

димо определить характер фильтрационного поля водозабора, т. е. построить гидродинамическую сетку фильтрационного течения. Характер фильтрационного поля определяется гидрогеологическими условиями в районе водозабора, а также видом и производительностью самого водозабора (число, взаиморасположение и дебит водозаборных скважин). Под гидрогеологическими условиями в этом случае понимаются так называемые «граничные условия» эксплуатируемого горизонта (условия питания, распространения и дренирования, а также условия связи с другими водоносными горизонтами и поверхностными водами), его водопроницаемость, мощность и активная пористость, изменения этих параметров в плане и по разрезу.

«Граничные условия» водоносных пластов являются определяющими при формировании фильтрационного поля водозабора и траекторий линий тока в нем.

Основные типы граничных условий достаточно полно описаны в работах Ф. М. Бочевера и Н. Н. Веригина (1961) и Н. Н. Биндемана (1963).

В настоящей главе приводятся лишь необходимые сведения о граничных условиях водоносных горизонтов в соответствии с типизацией названных авторов.

Различаются границы в вертикальном разрезе водоносного пласта (верхние и нижние границы пласта) и в плане (контуры пласта).

Условия на верхней и нижней границах напорного водоносного пласта могут быть трех типов: 1) подошва и кровля сложены выдержанными водоупорными породами, 2) в подошве и в кровле залегают слабопроницаемые породы, разделяющие рассматриваемый водоносный пласт от вышележащих и нижележащих водоносных горизонтов, и 3) на одной границе водоупорная толща, а на другой — слабопроницаемые породы. В последних двух случаях происходит перетекание из одного пласта в другой под влиянием разности напоров, существующей в природной обстановке или возникающей при эксплуатации водозабора.

Наибольшее влияние на характер фильтрационного поля оказывают граничные условия водоносного пласта в плане (т. е. характер его боковых границ), так как они в основном определяют очертания депрессионной воронки, образующейся при эксплуатации водозабора.

Боковыми границами водоносного пласта по типизации, предложенной Ф. М. Бочевеком, могут быть:

- 1) границы с поверхностными водными источниками (реки, болота, озера, водохранилища, моря),
- 2) поверхности контакта со значительно более проницаемыми породами,
- 3) поверхности контакта с менее проницаемыми породами (как частный случай — поверхность контакта с водоупорными породами),

4) поверхности выхода (выклинивания) водоносных пластов на поверхность земли (области питания).

На характер фильтрационного поля могут влиять одна, несколько или все боковые границы водоносного пласта. Они могут и совсем не влиять, если водозабор будет находиться вдали от них. По признаку влияния границ и выделены приводимые ниже основные типовые схемы граничных условий.

1. Водозабор располагается вдали от границ водоносного пласта, и последний не оказывает влияния на характер фильтрационного поля (условия так называемого «неограниченного пласта») — рис. 1, а.

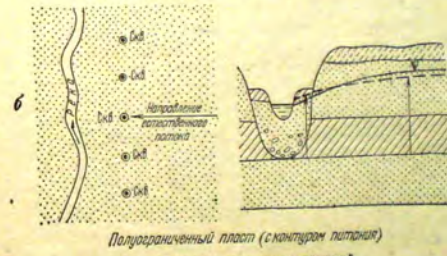
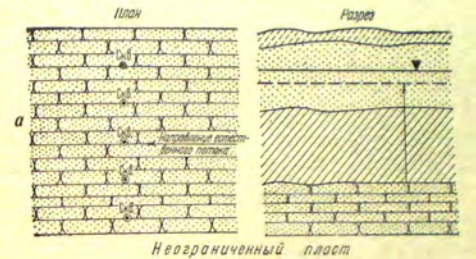


Рис. 1. Схемы граничных условий

2. На характер фильтрационного поля водозабора оказывает влияние только одна граница. Остальные границы пласта находятся за пределами возможного влияния откачки (условия так называемого «полуограниченного пласта») — рис. 1, б и 2, а.

3. Характер фильтрационного поля водозабора определяется влиянием двух более или менее параллельных границ (условия так называемого «пласта-полосы») — рис. 2, б.

4. Формирование фильтрационного поля связано с влиянием двух более или менее перпендикулярных границ (условия так называемого «пласта-квадранта») — рис. 2, в.

5. На фильтрационное поле оказывают влияние все границы водоносного пласта (условия «ограниченного пласта»).

Подавляющее большинство встречающихся в природной обстановке граничных условий относится к первым трем типам, т. е. к условиям неограниченного пласта, полуограниченного пласта и

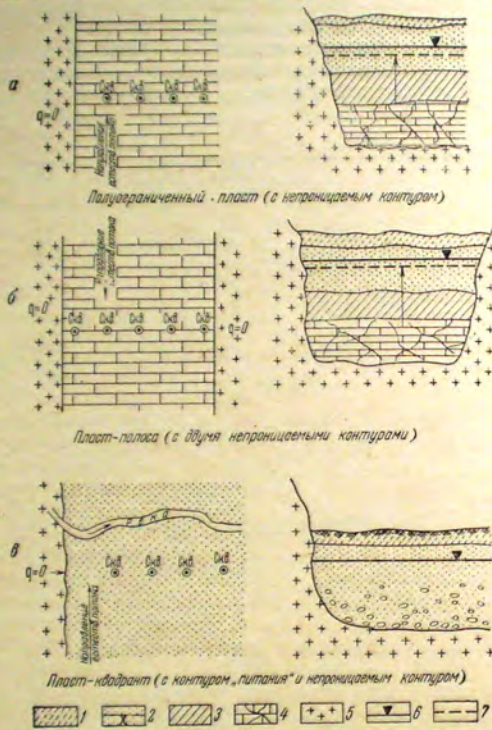


Рис. 2. Схемы граничных условий

1—суглинок; 2—песок, песчаник; 3—глина; 4—известняк; 5—гранит; 6—уровень грунтовых вод; 7—уровень напорного водоносного горизонта

Разнообразие граничных условий и наблюдаемая в реальной природной обстановке невыдержанность гидрогеологических параметров по площади весьма усложняют задачу построения гидродинамической сетки фильтрационного течения. Большие затруднения возникают также в связи с неразработанностью методов построения гидродинамической сетки движения для сложных граничных условий.

Поэтому для нахождения границ искомой зоны санитарной охраны в большинстве случаев приходится прибегать к известной схематизации природной обстановки.

Наибольшее приближение к реальной природной обстановке дает метод моделирования, позволяющий получить близкие к реально возможному линии тока в фильтрационном поле данного водозабора, если, конечно, гидрогеологические условия в районе водозабора хорошо известны и могут быть достаточно верно замоделированы. Это проверяется соответствием карты изогипс (или изопьез) естественного подземного потока гидродинамической сетке на модели до ввода в действие водозаборов, а также соответствием понижений, созданных в процессе опытных откачек, понижением, полученным при наложении соответствующего стока на модели.

Несколько большее искажение дает графоаналитический метод, заключающийся в наложении естественного потока, заданного картой изогипс (или изопьез), и фильтрационного поля, созданного действием водозабора. Понижения уровня, вызванные водозаборами, определяются аналитически. При этом обычно принимается допущение, что водопроницаемость и мощность водоносного горизонта не изменяются по площади.

Границы второго пояса санитарной охраны по полученной указанными методами гидродинамической сетке устанавливаются или непосредственно по нейтральной линии тока (в случае если поступление загрязнений в район водозабора должно быть полностью исключено) или в зависимости от заданного допустимого времени продвижения загрязненных растворов к водозабору, одинакового по всем линиям тока. В последнем случае на каждой линии тока суммированием времени продвижения частиц жидкости вдоль отрезков линии тока между соседними гидроизогипсами, ведущими от водозабора, приблизительно находится точка, время движения от которой до водозабора по данной линии тока будет равно заданному. Линия, соединяющая все полученные таким образом точки на различных линиях тока, и будет искомой границей зоны.

Методы моделирования на аналоговых машинах и графоаналитический являются зачастую весьма трудоемкими и сложными, особенно если зона санитарной охраны рассчитывается на определенный срок. Поэтому они должны применяться или для сложных гидрогеологических условий (метод моделирования), приведенные которых к простейшим схемам может давать большие ошибки, или при водозаборе, состоящем из разноразмерных и хаотично рас-

положенных скважин (графоаналитический метод). Для сравнительно простых гидрогеологических условий и некоторых видов водозаборов представилось целесообразным разработать более простые и удобные гидродинамические методы расчета зон санитарной охраны, позволяющие быстро и с достаточной обоснованностью установить положение искомой границы зоны.

При этом сделаны следующие допущения:

а) естественный поток подземных вод является плоским и не деформируется в результате поступления к подземным водам загрязненных растворов;

б) движение подземных вод в районе водозабора является установившимся или квазистационарным (движение считается квазистационарным, когда скорость снижения уровня подземных вод, происходящего под влиянием водозабора, примерно одинакова на всей охватываемой расчетом территории);

в) при движении загрязненных растворов происходит поршневое вытеснение чистых вод по всему активному сечению пор;

г) основные параметры водоносного горизонта (коэффициент фильтрации, мощность и активная пористость) в пределах рассматриваемой области не изменяются или изменяются незначительно.

Последнее допущение требует следующих пояснений.

Все аналитические решения, положенные в основу предлагаемых методов расчета и выделения зон санитарной охраны, выведены для условий напорных водоносных горизонтов, мощность которых принимается постоянной, так как для этих условий получаются более простые зависимости по сравнению с условиями безнапорных водоносных горизонтов, мощность которых в процессе эксплуатации уменьшается.

Однако, как показано многими исследователями и, в частности, подробно изложено в работе Н. Н. Биндемана (1963), все полученные для напорных условий решения справедливы и для безнапорных водоносных горизонтов, если в полученных зависимостях постоянная мощность m напорного пласта будет заменена средней мощностью безнапорного горизонта h_{cp} по формуле

$$m = h_{cp} = H - \frac{S_0}{2}, \quad (II.1)$$

где S_0 — понижение уровня в районе водозабора, отсчитываемого от начального уровня H .

Так как при проектировании зон санитарной охраны уже приблизительно известно максимальное понижение уровня, которое будет в районе водозабора к концу расчетного срока, то определение средней мощности горизонта не представляет сложности.

Следует отметить, что при этом средняя мощность в условиях квазистационавшегося движения будет несколько занижена, так как понижение будет браться максимальным на конечный срок. Это даст определенный «запас надежности» в расчетах зон санитарной охраны, что очень важно, так как задача проектирования и выделения этих зон возникает главным образом в районах эксплуатации, не имеющих водоупорного перекрытия безнапорных водоносных горизонтов.

Артезианские горизонты, имеющие в ряде случаев выдержанную водоупорную кровлю, находятся в более благоприятных условиях. Здесь часто вообще нет надобности в установлении второго пояса санитарной охраны.

Принцип, положенный в основу методики расчета и выделения зон санитарной охраны для приведенных выше схематизированных типов граничных условий, основан на нахождении связи между координатами точек в фильтрационном поле, водозаборов и временем прихода частиц воды из этих точек к водозабору по линиям тока. Чтобы найти эту связь, представилось необходимым получить прежде всего уравнения линий тока.

Для этого были использованы известные уравнения Коши—Римана, связывающие потенциал скорости фильтрации (φ), определяемый через функцию напора (H), с функциями тока (ψ). Эти уравнения, являющиеся условиями ортогональности линий тока и линий равного напора, известные также как условия Даламбера—Эйлера, имеют вид

$$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \psi}{\partial y}; \quad \frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\frac{\partial \psi}{\partial x}. \quad (II.2)$$

При допущении, что как в напорных, так и в безнапорных условиях водопроницаемость (km или kh_{cp}) горизонта остается постоянной в пределах территории, охваченной расчетом, выражение для потенциала скорости фильтрации может быть записано следующим образом

$$\varphi = \pm kmH. \quad (II.3)$$

Знак плюс в выражении (II.3) соответствует случаю, когда положительное направление оси x принимается обратным направлению естественного потока, знак минус — когда положительное направление оси x и направление естественного потока совпадают.

Для всех рассмотренных в главах III и IV случаев (за исключением случая, когда поток подземных вод в естественных условиях направлен от поверхностного водосточника, с которым он тесно связан), положительное направление оси x выбиралось вверх по потоку от водозабора, т. е. против движения естественного потока.

Так как потенциал скорости фильтрации отличается от функции напора лишь постоянным множителем (km), определение уравнений линий тока сводится, в соответствии с условиями (II.2), к дифференцированию функции напора по одной из координат (в нашем случае — по x) и интегрированию полученной производной по другой координате (в данном случае по y). Каждой линии тока данного фильтрационного поля соответствует определенное постоянное

значение функции тока, определяемое в подобной в полученном уравнении координат любой точки на этой линии тока.

Известно, что расход фильтрационного потока между двумя линиями тока определяется как разность функций тока для любой из точек на соответствующих линиях тока. Поэтому, если принять за начало отчета линию тока, совпадающую с осью x , направленной вверх по потоку от водозабора, то функция тока для любой точки будет характеризовать расход, притекающий к водозабору между линией тока, проходящей через эту точку, и положительным направлением оси x .

Описанным выше путем были получены уравнения линий тока в фильтрационном поле одиночного, двух взаимодействующих и линейного водозаборов в условиях неограниченного и полуограниченного фильтрационных потоков. Основой для этого послужили известные функции напора для фильтрационного поля одиночного и двух взаимодействующих водозаборов и полученные в процессе исследований функции напора для линейного ряда конечного числа скважин.

Учитывая, что величины v_x и v_y — составляющие скорости фильтрации по осям координат — известны, если известны функции напора

$$v_x = \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial x} \quad (II.4)$$

$$v_y = \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial y}, \quad (II.5)$$

можно составить выражения

$$\Delta t = \frac{\Delta x}{v_x} \quad (II.6)$$

или

$$\Delta t = \frac{\Delta y}{v_y}, \quad (II.7)$$

показывающие время, за которое частица воды пройдет вдоль линии тока от точки с координатой x (или y) до точки с координатой $x - \Delta x$ (или $y - \Delta y$).

Переходя в выражениях (II. 6) и (II. 7) к пределам и интегрируя их от x до 0 (в условиях полуограниченного потока от x до 0) или от y до 0, получаем искомую связь между местоположением точки и временем движения от нее к водозабору.

Следует отметить, что лишь для условий одиночного водозабора в неограниченном пласте, некоторых фиксированных направлений в условиях одиночного водозабора и полуограниченном пласте, двух водозаборов и линейного водозабора в неограниченном пласте представилось возможным разделить переменные в уравнениях линий тока и провести необходимое интегрирование. Во всех

остальных случаях связь эта устанавливалась только для условий бассейна. Поэтому границы зон санитарной охраны выделяются ориентировочно, хотя и с определенным «запасом надежности». Расстояния от водозаборов до границ зон санитарной охраны в этих случаях определяются алгебраическим суммированием расстояний, подсчитанных для условий бассейна для данного расчетного срока, с расстояниями, проходимыми естественным потоком за расчетный срок.

По результатам интегрирования построены необходимые графики и номограммы, позволяющие находить координаты характерных точек искомым границ зон санитарной охраны, рассчитываемых на определенный срок. Что касается зон санитарной охраны, границами которых должна являться нейтральная линия тока, то задача их выделения является более простой.

Построение нейтральной линии тока производится по известному уравнению, полученному для всех рассмотренных видов водозаборов и типов граничных условий, и сводится к нахождению координат отдельных характерных ее точек. В ряде случаев (береговой линейный водозабор и два взаимодействующих береговых водозабора) число таких точек, координаты которых можно найти сравнительно простыми методами, составляет для каждой ветви не более 3—4. Поэтому для данных условий нейтральная линия тока проводится несколько ориентировочно.

Дифференцируя выражение (III. 1) по x , получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i + \frac{Q}{2\pi km} \cdot \frac{x}{x^2 + y^2} \quad (\text{III.2})$$

Интегрирование выражения (III. 2) по y и последующее умножение на km даст известное в гидродинамике выражение для функций тока в фильтрационном поле одиночного водозабора

$$\psi = kmiy + \frac{Q}{2\pi} \arctg \frac{y}{x} \quad (\text{III.3})$$

Глава 3

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ НЕОГРАНИЧЕННОГО ВОДОНОСНОГО ПЛАСТА

Как отмечалось выше, условия неограниченного водоносного пласта характеризуют водоносный горизонт, пользующийся широким распространением и выдержанностью в разрезе, при расположении водозаборных скважин в большом удалении от его боковых границ. Примерами такого пласта могут служить широкий между речный массив при расположении водозабора где-либо в его середине, или выдержанный артезианский водоносный горизонт, эксплуатируемый вдали от районов его питания и дренирования.

В настоящей главе рассматривается методика расчета и выделения зон санитарной охраны для трех видов водозаборов: одиночного (одна или несколько компактно расположенных эксплуатационных скважин), двух взаимодействующих и линейного (линейный ряд конечного числа равнодебитных и равноотстоящих одна от другой эксплуатационных скважин).

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ОДИНОЧНОГО ВОДОЗАБОРА

Если провести оси координат так, как это показано на рис. 3, т. е. ось x провести параллельно направлению естественного потока, а ось y перпендикулярно ему и принять положительным направление осей x вверх по потоку от водозабора A , то известная функция напора в фильтрационном поле одиночного водозабора в условиях установившегося или квазиустановившегося движения имеет вид:

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \quad (\text{III.4})$$

где величина R (так называемый «радиус влияния водозабора» в соответствии с характером движения может быть зависимой (при квазиустановившемся движении) или независимой (при установившемся движении) от времени работы водозабора (t).

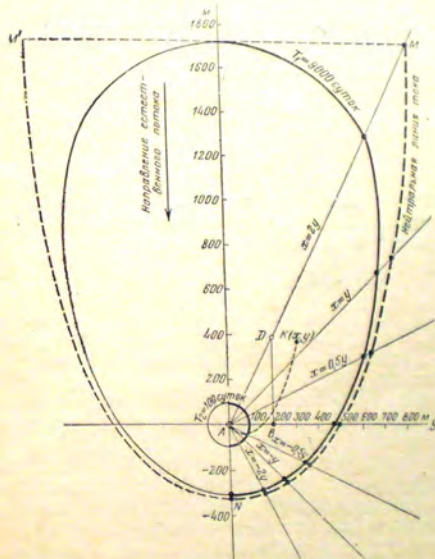


Рис. 3. Зоны санитарной охраны одиночного водозабора в неограниченном пласте

Учитывая, что в любой точке данной линии тока значение функции тока остается постоянным и $km\psi = q$, можно записать уравнение для функций тока в следующем виде

$$C = \psi = qy + \frac{Q}{2\pi} \arctg \frac{y}{x}, \quad (\text{III.4})$$

или

$$C = qy + \frac{Q}{2\pi} \theta, \quad (\text{III.5})$$

где $\Theta = \arctg \frac{y}{x}$ — центральный угол, отсчитываемый от положительного направления оси x по часовой стрелке и изменяющийся от 0 до 2π ;

C — значение функции тока для каждой данной линии тока, численно равное расходу фильтрационного потока, проходящего к водозабору — между положительным направлением оси x и данной линией тока.

Из выражений (III.4) и (III.5) легко находим уравнение нейтральной линии тока, для которой значение функции тока, как это вытекает из условия симметрии потока относительно оси x , равно $\frac{Q}{2}$.

Уравнение нейтральной линии тока (линия MNM' из рис. 3) имеет вид

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Q}{2\pi} \arctg \frac{y}{x}, \quad (III.6)$$

или

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Q}{2\pi} \theta. \quad (III.7)$$

Чтобы построить нейтральную линию тока, следует преобразовать выражение (III.6). Разделив в нем переменные и произведя простейшее преобразование, получим уравнение

$$x = -\frac{y}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi q}{Q} y\right)}, \quad (III.8)$$

по которому легко проводится построение нейтральной линии тока.

Для этого удобно пользоваться графиком на рис. 4, построенным по уравнению (III.8).

Можно также провести построение непосредственно по уравнению (III.8), задаваясь различными значениями y и определяя из него соответствующие значения x .

Следует иметь в виду, что в обоих случаях достаточно построить только одну правую относительно оси x ветвь нейтральной линии тока. Левая ветвь будет зеркальным отображением правой.

В подавляющем большинстве случаев для построения нейтральной линии тока можно ограничиться нахождением точек ее пересечения с осями координат (т. е. с прямыми $x = 0$ и $y = 0$) и с биссектрисами координатных углов (т. е. с прямыми $x = y$ и $x = -y$).

Из уравнения (III.7) можно видеть, что при

$$x = 0 \quad (\text{т. е. при } \theta = \frac{\pi}{2}) \quad y = \frac{Q}{4q} = 0,25 \frac{Q}{q}; \quad (III.9)$$

$$\text{при } x = y \quad (\text{т. е. при } \theta = \frac{\pi}{4}) \quad y = \frac{3}{8} \frac{Q}{q} = 0,375 \frac{Q}{q}; \quad (III.10)$$

$$\text{при } x = -y \quad (\text{т. е. при } \theta = \frac{3}{4}\pi) \quad y = \frac{Q}{8q} = 0,125 \frac{Q}{q}. \quad (III.11)$$

Точка пересечения нейтральной линии тока с осью x (точка N) определяется из выражения (III.2). Учитывая, что в этой точке

$$\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad \text{и} \quad y = 0,$$

тогда

$$x = -\frac{Q}{2\pi q} = -0,159 \frac{Q}{q}. \quad (III.12)$$

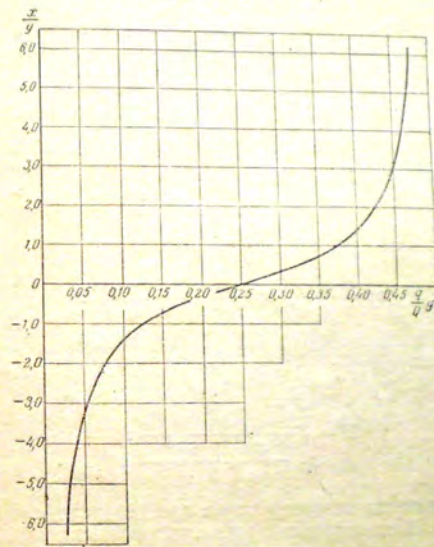


Рис. 4. График для построения нейтральной линии тока в фильтрационном поле одиночного водозабора (неограниченный пласт)

Из уравнения (III.7) можно также видеть, что при $x = \infty$ (т. е. при $\Theta \approx 0$)

$$y = \frac{Q}{2q} = 0,5 \frac{Q}{q}. \quad (III.13)$$

Следует отметить, что высказанное в начале главы 2 утверждение о необходимости выделения в зону санитарной охраны при определенных обстоятельствах всей территории, ограниченной нейтральной линией тока, является, вообще говоря, нереальным.

Совершенно очевидно, что как далеко от водозабора выше его по потоку не появился бы очаг загрязнения, рано или поздно за-

грязневые воды, если не будет происходить их самоочищения при движении, придут в район водозабора и вызовут его загрязнение.

Поэтому выше по потоку нельзя провести границу зоны, удовлетворяющей условию, чтобы загрязнение никогда не пришло в район водозабора. Следовательно, представляется целесообразным рассчитывать ее на какой-либо весьма отдаленный срок.

Для производства такого расчета и выделения зоны санитарной охраны на определенный срок прежде всего требуется найти связь между местоположением частицы воды в фильтрационном поле и временем ее прихода к водозабору.

Чтобы определить время (T) продвижения частицы жидкости от точки K с координатами x и y до водозабора, воспользуемся выражением (II.7), в котором значение v_y можно получить дифференцированием выражения (III.1) по y и умножением полученной производной в соответствии с выражением (II.5) на отношение $\frac{k}{\mu}$.

Из выражения (III.1) следует

$$\frac{\partial H}{\partial y} = \frac{Q}{2\pi km} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2}, \quad (III.14)$$

откуда

$$v_y = \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{Q}{2\pi\mu m} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2}. \quad (III.15)$$

Подставив значение v_y из (III.15) в уравнение (II.7) и интегрируя, получаем

$$T = \int_0^y \frac{dy}{\frac{Q}{2\pi\mu m} \cdot \frac{y}{x^2 + y^2}}. \quad (III.16)$$

Чтобы произвести интегрирование правой части, следует выразить x через y . Воспользуемся для этого уравнением (III.4).

После разделения переменных в уравнении (III.4) получим

$$x = \frac{y}{\operatorname{tg} \left[\frac{2\pi}{Q} (c - yq) \right]}. \quad (III.17)$$

Подстановка значения x из выражения (III.17) в (III.16) и последующее интегрирование приводят к выражению

$$T = \frac{\mu m}{q} \left\{ y \operatorname{ctg} \left[\frac{2\pi}{Q} (C - yq) \right] - \frac{Q}{2\pi q} \ln \frac{\sin \left(\frac{2\pi}{Q} c \right)}{\sin \left[\frac{2\pi}{Q} (c - yq) \right]} \right\} \quad (III.18)$$

Учитывая, что $y \operatorname{ctg} \left[\frac{2\pi}{Q} (C - yq) \right] = x$

и что $C = yq + \frac{Q}{2\pi} \theta$, выражение (III.18) можно записать иначе

$$T = \frac{\mu m}{q} \left[x - \frac{Q}{2\pi q} \ln \frac{\sin \left(\frac{2\pi q}{Q} y + \theta \right)}{\sin \theta} \right]. \quad (III.19)^*$$

После простейших преобразований, учитывая, что

$$\sin \left(\frac{2\pi q}{Q} y + \theta \right) = \sin \left(\frac{2\pi q}{Q} y \right) \cos \theta + \sin \theta \cos \left(\frac{2\pi q}{Q} y \right)$$

и что $\operatorname{ctg} \theta = \frac{x}{y}$,

окончательно получим

$$T = \frac{\mu m}{q} \left\{ x - \frac{Q}{2\pi q} \ln \left[\frac{x}{y} \sin \left(\frac{2\pi q}{Q} y \right) + \cos \left(\frac{2\pi q}{Q} y \right) \right] \right\}. \quad (III.20)$$

Время прихода к водозабору частицы жидкости, располагающейся в любой точке выше или ниже водозабора по потоку, т. е. на оси x , определяется по известной формуле Тейса (Шестаков В. М., 1961).

$$T = \frac{\mu m}{q} \left[x - \frac{Q}{2\pi q} \ln \left(1 + \frac{2\pi q}{Q} x \right) \right], \quad (III.21)$$

получаемой также из более общего выражения (III.20) при подстановке $y = 0$ после раскрытия неопределенности по правилу Лопиталя.

Время прихода к водозабору частицы жидкости, располагающейся в любой точке на оси y , определяется по формуле

$$T = - \frac{Q\mu m}{2\pi q^2} \ln \left[\cos \left(\frac{2\pi q}{Q} y \right) \right], \quad (III.22)$$

получаемой из выражения (III.20) при подстановке $x = 0$.

По выражению (III.20) составлены графики (рис. 5 и 6**, позволяющие находить точки пересечения границы зон санитарной охраны, рассчитываемых на определенный заданный срок, с прямыми, проходящими через водозабор и характеризующимися определенными угловыми коэффициентами $p = \frac{x}{y}$.

Чтобы найти точки пересечения границы зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, с осью x , на рис. 7 приведены графики, составленные по формуле (III.21).

* Формула (III. 19), независимо от нас, была получена также В. М. Гольдбергом

** Рис. 6 является фрагментом верхней правой части рис. 5, выполненным в увеличенном масштабе.

По этим графикам находится также верхняя по потоку граница зоны санитарной охраны, боковые и нижняя границы которой проходят по нейтральной линии тока. Эта граница проводится перпендикулярно направлению потока до пересечения с боковыми ветвями нейтральной линии тока. Точка на оси x , через которую она проводится, определяется по верхнему графику на рис. 7

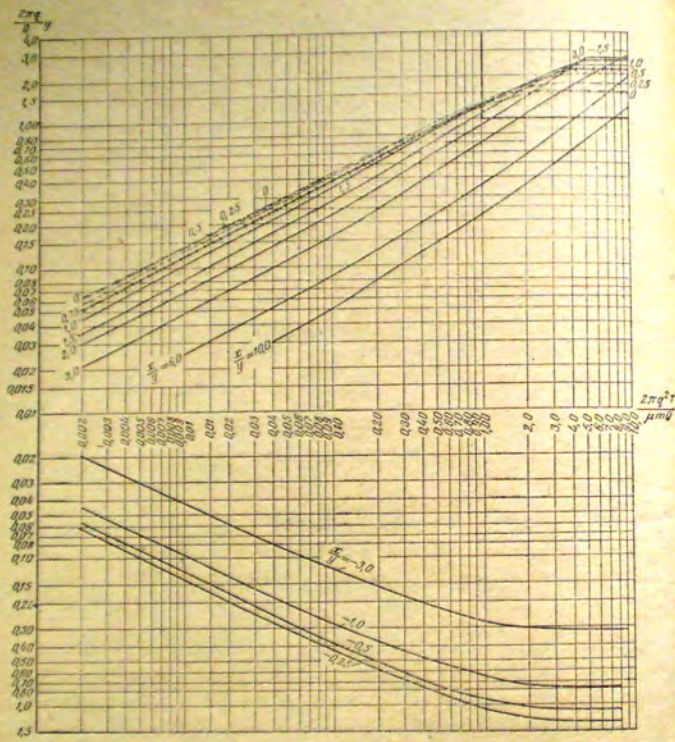


Рис. 5. Графики для определения границ зоны санитарной охраны одиночного водозабора в неограниченном пласте

условия, что время, которым задаются при этом, будет достаточно большим.

Чтобы оконтурить границу зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, следует по известным значениям Q , μ , m и q , а также по заданному времени T подсчитать «приве-

денное» время \bar{T} ($\bar{T} = \frac{2\pi q^2 T}{\mu m Q}$) и по графикам на рис. 5, 6 и 7 найти соответствующие этому времени значения приведенной координаты \bar{y} или \bar{x} ($\bar{y} = \frac{2\pi q}{Q} y$, $\bar{x} = \frac{2\pi q}{Q} x$) на графике, соответствующем прямой, точку пересечения с которой границы зоны требуется получить.

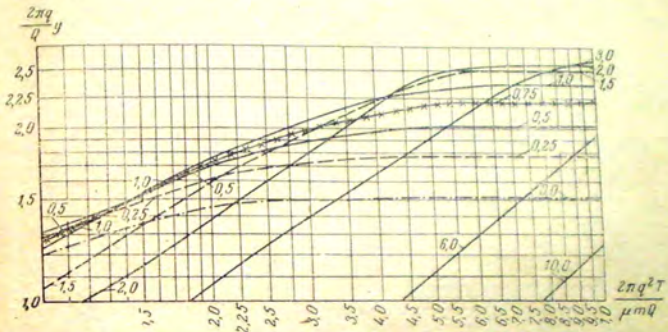


Рис. 6. Графики для определения границ зоны санитарной охраны одиночного водозабора в неограниченном пласте (фрагмент верхней правой части рис. 5, выполненный в увеличенном масштабе).

Почти всегда в практике выделения зон санитарной охраны достаточно ограничиться нахождением точек пересечения искомой границы зоны с осями координат и с прямыми $x = 2y$, $x = y$, $x = 0,5y$, $x = -0,5y$, $x = -y$ и $x = -3y$. Этим прямым на рис. 5 или 6 соответствуют графики с угловыми коэффициентами $p = \frac{x}{y} = 2, 0, 1, 0, 0, 5$ (в верхней половине рис. 5 и на рис. 6) и $p = \frac{x}{y} = -0,5, -1, 0$ и $-3, 0$ (в нижней половине рис. 5).

Сняв с соответствующего графика значение приведенной координаты \bar{y} , легко находим координаты y и x точки пересечения искомой границы с прямой, соответствующей этому графику

$$\left(y = \frac{Q}{2\pi q} \bar{y}, \text{ а } x = p y \right).$$

По графикам, соответствующим названным выше прямым на рис. 6, и по нижнему графику на рис. 7 можно видеть, что начиная примерно со значений $\bar{T} = 3,5$ прекращается заметное увеличение значений приведенных координат y и x при дальнейшем возрастании \bar{T} (за исключением графика, соответствующего прямой $\frac{x}{y} = 2$).

Это значит, что точки пересечения границы зон санитарной охраны с прямыми, соответствующими этим графикам, лежат в непосредственной близости от нейтральной линии тока. Поэтому если

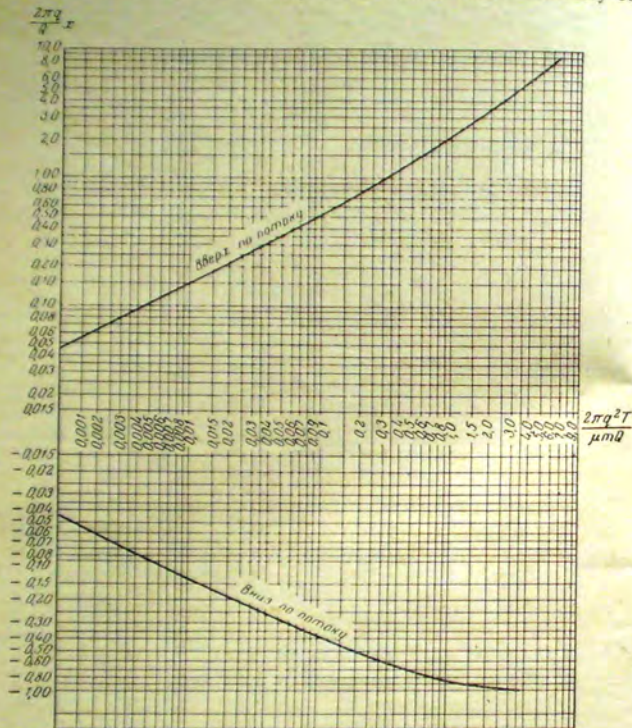


Рис. 7. График для определения границ зон санитарной охраны одиночного водозабора (неограниченный поток)

приведенное время, на которое рассчитывается зона санитарной охраны, равно или больше 3,5 ($\bar{T} > 3,5$), границу зоны целесообразно проводить по нейтральной линии тока, замыкая ее выше по потоку от водозабора линией, параллельной оси y и проходящей через точку на оси x , определяемую по верхнему графику на рис. 7 для заданного приведенного времени.

При малых скоростях естественного потока ($< 0,01$ м/сутки), т. е. когда имеют место условия так называемого «бассейна», гра-

ница зоны, рассчитываемой на определенный срок T , имеет вид окружности, центром которой является водозабор, а радиус (r_0) определяется по формуле, вытекающей из баланса воды

$$r_0 = \sqrt{\frac{QT}{\mu m}} \quad (III.23)$$

Сравнение верхнего и нижнего графиков на рис. 7 и графика $\rho = \frac{x}{y} = 0$ на рис. 5 показывает, что при значениях приведенного времени \bar{T} меньше, чем 0,04 ($\bar{T} < 0,04$), значения приведенных координат x и y остаются примерно равными. Это значит, что зона санитарной охраны, рассчитываемая на приведенное время $\bar{T} \ll 0,04$, также будет иметь очертания окружности, радиус которой с достаточной для практики точностью может быть определен по формуле (III.23).

Пример. Для водоснабжения поселка проектируется бурение эксплуатационной на воду скважины производительностью 1000 м³/сутки. Поверхностные водоемы и водотоки, связанные с подземными водами, в районе отсутствуют. Намечаемый в эксплуатации безнапорный водоносный горизонт представлен песками с гравием и галькой и характеризуется широким распространением и выдержанностью в разрезе. Коэффициент фильтрации, определенный по данным откачек, составляет в среднем 50 м/сутки, а средняя мощность водоносной толщи 20 м. Активная пористость, определенная опытным путем, составила 0,20. Уклон естественного потока в районе проектируемой скважины изменяется от 0,0004 до 0,0006 и в среднем равен 0,0005.

Требуется выделить около проектируемой скважины зону санитарной охраны, рассчитанную на срок работы, равный 25 годам, т. е. 9000 суткам, а также зону, в пределах которой недопустимо попадание к подземным водам бактериального загрязнения. Время самоочищения бактериально загрязненных вод принимается равным 100 суткам.

По условиям примера дано:

$$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{сутки}, K = 50 \text{ м/сутки}, t = 20 \text{ м}, i = 0,0005$$

$$\mu = 0,20, T_1 = 9000 \text{ суток}, T_2 = 100 \text{ суток}$$

$$q = km i = 50 \cdot 20 \cdot 0,0005 = 0,5 \text{ м}^3/\text{сутки}.$$

Чтобы выделить требуемые зоны санитарной охраны, определим соответствующие приведенное время \bar{T}

$$\bar{T}_1 = \frac{2\pi q^2 T_1}{\mu m Q} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 9000}{0,20 \cdot 20 \cdot 1000} = 3,53;$$

$$\bar{T}_2 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25 \cdot 100}{0,20 \cdot 20 \cdot 1000} = 0,039.$$

Произведем построение зон санитарной охраны отдельно для соответствующих значений приведенного времени.

Таблица 1

Уравнение прямой, точки пересечения которой с границей зоны санитарной охраны требуется найти	Координаты точек пересечения с нейтральной линией тока		Значения h_0 , стоящие на рис. 6	$\frac{Q}{2\pi q}$	$\mu = \frac{Q}{2\pi q}$	h (определяется по уравнениям прямой при подстановке значений μ из графа 6)	Значения x , стоящие с графика на рис. 7	$x = \frac{Q}{2\pi q}$
	y (определяется по графикам на рис. 4) (III, 10) (III, 11) и (III, 12)	x (определяется по уравнениям прямой графа 4) (III, 11) и (III, 12)						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x = 2y$	852	1704	2,02	313	477	954	—	—
$x = y$	750	750	2,15	313	685	685	—	—
$x = 0,5y$	646,6	323,3	1,94	313	618	309	—	—
$x = 0$	500	0	1,49	313	475	0	—	—
$x = -0,5y$	354	-176,8	1,1	313	350	-175	—	—
$x = -y$	250	-250	0,77	313	245	-245	—	—
$x = -2y$	148	-296	0,46	—	146	-292	—	—
			(по интерполяции)					
$y = 0$	0	-318	—	—	—	—	5,4 (вверх по потоку) —0,99 (вниз по потоку)	1720 —315

Для построения прямых $x = -0,5y$, $x = -y$ и $x = -2y$ отрезки откладываются не вверх, а вниз по потоку.

Все построения удобнее проводить на миллиметровой бумаге. На рис. 3 показаны построенные по полученным координатам нейтральная линия тока и граница зоны санитарной охраны, рассчитанная на 9000 суток. Можно видеть, что в рассматриваемом примере вполне допустимо полагать границу зоны, идущей по нейтральной линии тока и только сверху по потоку ограниченной расстоянием, рассчитываемым на заданный срок. При этом увеличение площади зоны будет небольшим.

2. Выше отмечалось, что при значениях приведенного времени T меньших 0,04, граница зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, по форме будет приближаться к окружности, равно отстоящей от водозабора, являющегося ее центром.

Так как в рассматриваемом примере $T_2 = 0,039 < 0,04$, искомой границей зоны может служить окружность с радиусом, определяемым по формуле (III.23).

$$r_0 = \sqrt{\frac{QT_2}{\mu t}} = \sqrt{\frac{1000 \cdot 100}{3,14 \cdot 0,2 \cdot 20}} = 90 \text{ м.}$$

1. Выше отмечалось, что при значениях приведенного времени $T \geq 3,5$ граница зоны, рассчитываемой на данный срок, пройдет на большей части территории по нейтральной линии тока. И только выше водозабора по потоку ее границей будет линия, параллельная оси y и отстоящая от водозабора на расстоянии x , определенном для данного приведенного времени по верхнему графику на рис. 7.

Так как в рассматриваемом примере $T_1 = 3,53 > 3,5$, искомой границей зоны санитарной охраны может служить нейтральная линия тока.

Чтобы ее построить, воспользуемся выражениями (III.9) — (III.12) и графиком на рис. 4, позволяющими найти координаты точек пересечения нейтральной линии тока с характерными прямыми, проходящими через начало координат, т. е. через водозабор.

Предварительно определим отношение $\frac{Q}{q}$

$$\frac{Q}{q} = \frac{1000}{0,5} = 2000.$$

Значения координат y и x , определенные для соответствующих прямых по выражениям (III.9) — (III.12) и по графику на рис. 4, сведены в табл. 1.

Для сравнения в табл. 1 приведены также снятые для каждой прямой с графиков на рис. 6 значения приведенных координат y , соответствующие заданному приведенному времени

$$T_1 = 0,53 \text{ (графа 4 табл. 1).}$$

По значениям y определяем значения координат y точек пересечения соответствующих прямых с границей зоны, рассчитанной на 9000 суток (графа 6 табл. 1). Полученные значения координат y позволили определить и значения координат x непосредственно из уравнений соответствующих прямых (по графе 1 табл. 1).

Чтобы определить расстояние до искомой границы зоны вверх по потоку от водозабора, воспользуемся верхним графиком на рис. 7.

Приведенному времени $T_1 = 3,53$ на графике соответствует значение $\bar{x} = 5,4$, откуда $x = \frac{Q}{2\pi q} \bar{x} = \frac{1000 \cdot 5,4}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,5} = 1720 \text{ м.}$

Точки искомой границы зоны можно нанести двумя способами. Во-первых, по двум координатам x и y , приведенным в табл. 1, во-вторых, провести соответствующую прямую и на ней находить требуемые точки по одной из координат, например по y .

Второй способ несколько удобнее.

Чтобы провести данную прямую, например прямую $x = 2y$, следует на оси абсцисс рис. 3 отложить от начала координат произвольный отрезок AB (y) и восстановить из точки B перпендикуляр к оси абсцисс, на котором вверх по потоку откладывается отрезок BD (x), равный двум отрезкам AB , т. е. $BD = 2AB$ или $x = 2y$. Требуемая прямая пройдет через точки A и D .

Таблица 2

Уравнение прямой, току пересечения которой с границей зоны санитарной охраны требуется найти	Значения \bar{y} , снимаемые с графика на рис. 5	$\bar{y} = \frac{Q}{2\pi q} \bar{y}$	Значения \bar{x} , снимаемые с графиков на рис. 7	$\bar{x} = \frac{Q}{2\pi q} \bar{x}$	Значения r , определяемые по формуле (III.23)
1	2	3	4	5	6
$x = 0$ $y = 0$	0,275	87,5	0,315 (вверх по потоку) -0,26 (вниз по потоку)	100	90
$y = 0$	—	—	—	-82,5	—

В табл. 2, наряду с найденным радиусом окружности, приведенные значения координат точек пересечения осей координат с границей зоны санитарной охраны, рассчитанной на заданный срок (100 суток) и построенной по более строгим графикам на рис. 5 и 7. Можно видеть, что расстояния этих точек от водозабора весьма близки определенному по формуле (III.23) радиусу окружности.

На рис. 3 показана также зона санитарной охраны, рассчитанная на 100 суток и построенная в виде окружности радиусом 90 м.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ДВУХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ РАВНОДЕБИТНЫХ ВОДОЗАБОРОВ

Два взаимодействующие водозабора могут располагаться один относительно другого и оба относительно направления естественного потока по-разному.

Если соединить водозаборы A и B прямой AB и из середины отрезка AB как из начала координат провести ось x вверх по потоку, а ось y перпендикулярно направлению потока, то водозабор A может располагаться в любой точке второй и третьей четверти, а водозабор B будет располагаться в симметричной относительно начала координат точке четвертой и первой четвертей. Частными случаями будут случаи расположения водозаборов на оси x или на оси y .

Рассмотрим общий случай расположения двух водозаборов, показанный на рис. 8 (водозабор A — в третьей четверти, а водозабор B — в первой).

В принятой системе координат известная функция напора в любой точке M фильтрационного поля двух взаимодействующих водозаборов имеет вид

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \left[\ln \frac{R}{\sqrt{(y+a)^2 + (x+b)^2}} + \right.$$

$$\left. + \ln \frac{R}{\sqrt{(y-a)^2 + (x-b)^2}} \right], \quad (\text{III.24})$$

где a и b — абсолютные значения координат водозаборов соответственно по осям y и x .

Дифференцируя выражение (III.24) по x , получим:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i + \frac{Q}{2\pi km} \left[\frac{x+b}{(y+a)^2 + (x+b)^2} + \frac{x-b}{(y-a)^2 + (x-b)^2} \right]. \quad (\text{III.25})$$

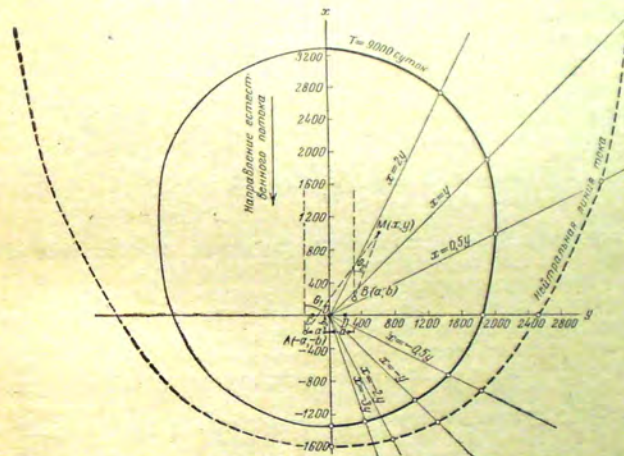


Рис. 8. Два водозабора в неограниченном пласте и зоны санитарной охраны

Интегрируя выражение (III.25) по y и умножая его на km , получим выражение для функции тока в фильтрационном поле двух взаимодействующих водозаборов

$$\psi = qy + \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{y+a}{x+b} + \arctg \frac{y-a}{x-b} \right). \quad (\text{III.26})$$

Из рис. 8 можно видеть, что

$$\arctg \frac{y+a}{x+b} = \theta_1 \quad \text{и} \quad (\text{III.27})$$

$$\arctg \frac{y-a}{x-b} = \theta_2, \quad (\text{III.28})$$

Уравнение прямой, точку пересечения которой с границей зоны санитарной охраны требуется найти	Значения \bar{y} , снимаемые с графика на рис. 3	$y = \frac{Q}{2\pi k} \bar{y}$	Значения \bar{x} , снимаемые с графиков на рис. 7	$x = \frac{Q}{2\pi k} \bar{x}$	Значения r_0 , определенные по формуле (III.23)
1	2	3	4	5	6
$x = 0$ $y = 0$	0,275	87,5	0,315 (вверх по потоку) -0,26 (вниз по потоку)	100	90
$y = 0$	—	—	—	-82,5	—

В табл. 2, наряду с найденным радиусом окружности, приведены значения координат точек пересечения осей координат с границей зоны санитарной охраны, рассчитанной на заданный срок (100 суток) и построенной по более строгим графикам на рис. 5 и 7. Можно видеть, что расстояния этих точек от водозабора весьма близки определенному по формуле (III.23) радиусу окружности.

На рис. 3 показана также зона санитарной охраны, рассчитанная на 100 суток и построенная в виде окружности радиусом 90 м.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ДВУХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ РАВНОДЕБИТНЫХ ВОДОЗАБОРОВ

Два взаимодействующие водозабора могут располагаться один относительно другого и оба относительно направления естественно-го потока по-разному.

Если соединить водозаборы A и B прямой AB и из середины отрезка AB как из начала координат провести ось x вверх по потоку, а ось y перпендикулярно направлению потока, то водозабор A может располагаться в любой точке второй и третьей четверти, а водозабор B будет располагаться в симметричной относительно начала координат точке четвертой и первой четвертей. Частными случаями будут случаи расположения водозаборов на оси x или на оси y .

Рассмотрим общий случай расположения двух водозаборов, показанный на рис. 8 (водозабор A — в третьей четверти, а водозабор B — в первой).

В принятой системе координат известная функция напора в любой точке M фильтрационного поля двух взаимодействующих водозаборов имеет вид

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \left[\ln \frac{R}{\sqrt{(y+a)^2 + (x+b)^2}} + \right.$$

$$\left. + \ln \frac{R}{\sqrt{(y-a)^2 + (x-b)^2}} \right], \quad (\text{III.24})$$

где a и b — абсолютные значения координат водозаборов соответственно по осям y и x .

Дифференцируя выражение (III.24) по x , получим:

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i + \frac{Q}{2\pi km} \left[\frac{x+b}{(y+a)^2 + (x+b)^2} + \frac{x-b}{(y-a)^2 + (x-b)^2} \right]. \quad (\text{III.25})$$

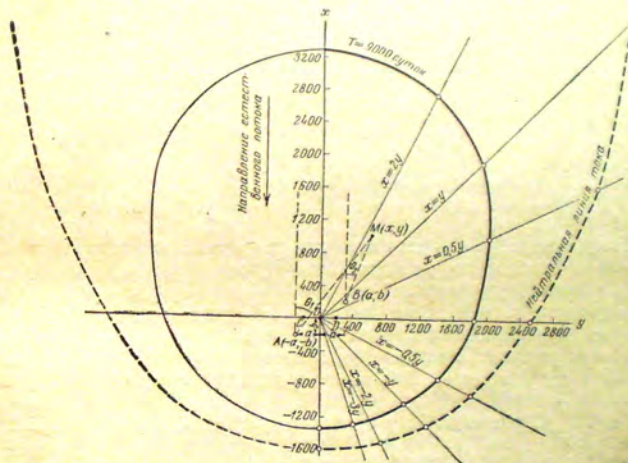


Рис. 8. Два водозабора в неограниченном пласте и зоны санитарной охраны

Интегрируя выражение (III.25) по y и умножая его на km , получим выражение для функции тока в фильтрационном поле двух взаимодействующих водозаборов

$$\phi = qy + \frac{1}{2\pi} \frac{Q}{k} \left(\operatorname{arctg} \frac{y+a}{x+b} + \operatorname{arctg} \frac{y-a}{x-b} \right). \quad (\text{III.26})$$

Из рис. 8 можно видеть, что

$$\operatorname{arctg} \frac{y+a}{x+b} = \theta_1 \quad \text{и} \quad (\text{III.27})$$

$$\operatorname{arctg} \frac{y-a}{x-b} = \theta_2, \quad (\text{III.28})$$

где θ_1 и θ_2 — углы, отсчитываемые около водозабора по часовой стрелке от положительного направления оси x к направлению на данную точку.

Следовательно, выражение (III.26) может быть записано несколько иначе

$$\psi = qy + \frac{Q}{2\pi} (\theta_1 + \theta_2).$$

Сумма углов $\theta_1 + \theta_2$ может изменяться от 0 до 4 π .

Учитывая, что в любой точке на данной линии тока значение функции тока остается постоянным, можно записать уравнение линии тока в следующем виде:

$$c = qy + \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{y+a}{x+b} + \arctg \frac{y-a}{x-b} \right), \quad (III.30)$$

или

$$C = qy + \frac{Q}{2\pi} (\theta_1 + \theta_2). \quad (III.31)$$

Если водозаборы располагаются на линии, перпендикулярной направлению естественного потока подземных вод (т. е. на оси y) или на линии, совпадающей с этим направлением (т. е. на оси x), фильтрационное поле двух взаимодействующих водозаборов является симметричным относительно оси x .

В этих условиях значение функции тока для правой относительно оси x ветви нейтральной линии тока, если выдерживается усло-

вие $a < \frac{Q}{2\pi q}$, равно дебиту одного водозабора, и уравнение ней-

тральной линии тока будет иметь вид:

а) если водозаборы лежат на оси y ($b=0$)

$$Q = qy + \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{y+a}{x} + \arctg \frac{y-a}{x} \right); \quad (III.32)$$

б) если водозаборы лежат на оси x ($a=0$)

$$Q = qy + \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{y}{x+b} + \arctg \frac{y}{x-b} \right). \quad (III.33)$$

Чтобы построить нейтральную линию тока в фильтрационном поле двух водозаборов, располагающихся попарно на одной из координатных осей, достаточно найти точки пересечения ее с координатными осями, биссектрисами координатных углов и с прямыми $x = 0,5y$, $x = -0,5y$ и $x = -2y$.

Координата y точек пересечения нейтральной линии тока с названными выше прямыми определяется по следующим формулам

а) при расположении водозаборов на оси y

с прямой $x = y$ (биссектриса верхнего координатного угла)

$$y = \frac{Q}{q} - \frac{Q}{2\pi q} \arctg \frac{2y^2}{a^2}$$

$$\dots \dots \dots x = 0 \text{ (ось } y) \dots \dots \dots y = 0,5 \frac{Q}{q} \quad (III.34)$$

\dots \dots \dots $x = -y$ (биссектриса нижнего координатного угла)

$$y = \frac{Q}{2\pi q} \arctg \frac{2y^2}{a^2}$$

б) при расположении водозаборов на оси x

с прямой $x = y$

$$y = \frac{Q}{2q} + \frac{Q}{2\pi q} \arctg \frac{2y^2}{b^2}$$

$$\dots \dots \dots x = 0 \dots \dots \dots y = 0,5 \frac{Q}{q} \quad (III.35)$$

\dots \dots \dots $x = -y$

$$y = \frac{Q}{2q} - \frac{Q}{2\pi q} \arctg \frac{2y^2}{b^2}$$

Формулы (III.35) и (III.34) получены из выражений (III.32) и (III.33) при соответствующих подстановках после построения вспомогательных графиков.

Чтобы найти точку пересечения нейтральной линии тока с осью x , следует в выражении (III.25) положить $\frac{dH}{dx} = 0$ и $y = 0$.

При расположении водозаборов на оси y (т. е. при $b=0$) координата искомой точки пересечения определяется по формуле

$$\frac{x}{a} = -\frac{Q}{2\pi a q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 - 1}. \quad (III.36)$$

При расположении водозаборов на оси x (т. е. при $a=0$) координата искомой точки пересечения определяется по формуле

$$\frac{x}{b} = -\frac{Q}{2\pi b q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q}\right)^2 + 1}. \quad (III.37)$$

Анализ формул (III.34) — (III.37) показывает, что координаты точек пересечения нейтральной линии тока с одинаковыми прямыми при двух крайних положениях водозаборов — попарно расположены на оси x или на оси y — являются, при прочих равных условиях, очень близкими. Они практически совпадают при $a < \frac{Q}{4\pi d}$

и $b < \frac{Q}{4\pi d}$, когда координаты точек пересечения нейтральной линии тока с биссектрисами координатных углов в обоих случаях приблизительно равны для $x=y=0,75 \frac{Q}{q}$ и для $x=-y=0,25 \frac{Q}{q}$. При любом промежуточном взаиморасположении водозаборов нейтральная линия тока в их фильтрационном поле будет иметь примерно те же очертания, что и при расположении водозаборов на осях x или y .

При этом если прямая, соединяющая водозаборы, ближе к оси x , чем биссектриса координатного угла, очертания нейтральной линии тока будут ближе к очертаниям нейтральной линии тока при расположении водозаборов на оси x .

Если прямая, соединяющая водозаборы, ближе к оси y , нейтральная линия тока будет почти такой же, какой она была бы при расположении этих водозаборов на оси y .

Как и в случае одиночного водозабора, можно видеть, что если границей зоны санитарной охраны должна являться нейтральная линия тока, вверх по потоку от водозабора граница должна рассчитываться на какой-либо достаточно отдаленный срок.

Чтобы установить связь между местоположением частицы жидкости на оси x и временем ее прихода в район водозабора, воспользуемся выражениями (II.4) и (II.6).

Для случая двух взаимодействующих водозаборов скорость движения частицы по оси x в соответствии с выражением (III.25) будет равна:

а) при расположении водозаборов на оси y , т. е. при $b=0$

$$v_x = \pm \left[\frac{k}{\mu} i + \frac{Qx}{\pi\mu m(x^2 + a^2)} \right]; \quad (\text{III.38})$$

б) при расположении водозаборов на оси x , т. е. при $a=0$

$$v_x = \pm \left[\frac{k}{\mu} i + \frac{Qx}{\pi\mu m(x^2 - b^2)} \right]. \quad (\text{III.39})$$

(При знаке плюс перед правой частью выражений (III.38) и (III.39) точка, в которой определяется скорость, находится выше по потоку от водозаборов, при знаке минус — ниже по потоку от водозаборов.)

Следует отметить, что при расположении водозаборов на оси y вследствие симметрии фильтрационного поля относительно оси x частица, находящаяся на этой оси выше водозаборов по потоку, никогда не придет в район какого-либо из водозаборов.

Определим связь между местоположением частицы, находящейся на оси x , и временем ее прихода к ближайшему водозабору при расположении водозаборов на оси x .

Использование этой связи для определения границ зоны санитарной охраны даст определенный «запас надежности» в расчетах, так как при любом другом расположении водозаборов скорость перемещения частицы по оси x будет меньшей, а значит, и расстоя-

ние от границы зоны до водозаборов, которое частица может пройти за определенное время, будет меньшим.

Действительно, сравнивая выражения для скорости (III.38) и (III.39) в двух крайних случаях, убеждаемся, что при расположении водозаборов на оси x скорость будет при прочих равных условиях наибольшей.

В соответствии с выражениями (II.6) и (III.39) для частицы жидкости, находящейся выше водозаборов по потоку

$$\Delta t = \frac{k}{\mu} i + \frac{\Delta x}{\pi\mu m(x^2 - b^2)} = \frac{\mu m}{q} \left[\frac{(x^2 - b^2) \Delta x}{x^2 + \frac{Q}{\pi q} x - b^2} \right]. \quad (\text{III.40})$$

Переходя к пределам и интегрируя в интервале от x до b , получим:

$$T = \frac{\mu m b}{q} \left\{ \frac{x}{b} - 1 - \frac{Q}{2\pi b q} \ln \left(\frac{x^2 + \frac{Q}{\pi b q} \cdot \frac{x}{b} - 1}{\frac{Q}{\pi b q}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} \left[\ln \frac{\frac{x}{b} + \frac{Q}{2\pi b q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}}{1 + \frac{Q}{2\pi b q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \ln \frac{\frac{x}{b} + \frac{Q}{2\pi b q} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}}{1 + \frac{Q}{2\pi b q} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} \right] \right\}. \quad (\text{III.41})$$

Время движения к водозаборам частицы жидкости, находящейся ниже водозаборов по потоку, определится, если выражение (III.40) проинтегрируем в пределах от x до $-b$. Выражение для определения искомого времени имеет вид

$$T = \frac{\mu m b}{q} \left\{ \frac{x}{b} + 1 - \frac{Q}{2\pi b q} \ln \left(\frac{1 - \frac{Q}{\pi b q} \cdot \frac{x}{b} - \frac{x^2}{b^2}}{\frac{Q}{\pi b q}} \right) + \right. \\ \left. + \frac{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2}{\sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} \left[\ln \frac{\frac{x}{b} + \frac{Q}{2\pi b q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}}{\frac{Q}{2\pi b q} - 1 - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} - \right. \right. \\ \left. \left. - \ln \frac{\frac{x}{b} + \frac{Q}{2\pi b q} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}}{\frac{Q}{2\pi b q} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi b q} \right)^2 + 1}} \right] \right\}.$$

$$-\ln \frac{\frac{x}{b} + \frac{Q}{2\pi bq} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi bq}\right)^2 + 1}}{\frac{Q}{2\pi bq} - 1 + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi bq}\right)^2 + 1}} \quad (III.42)$$

Для облегчения расчетов по формулам (III.41) и (III.42) построены графики (рис. 9), позволяющие по заданному времени T и

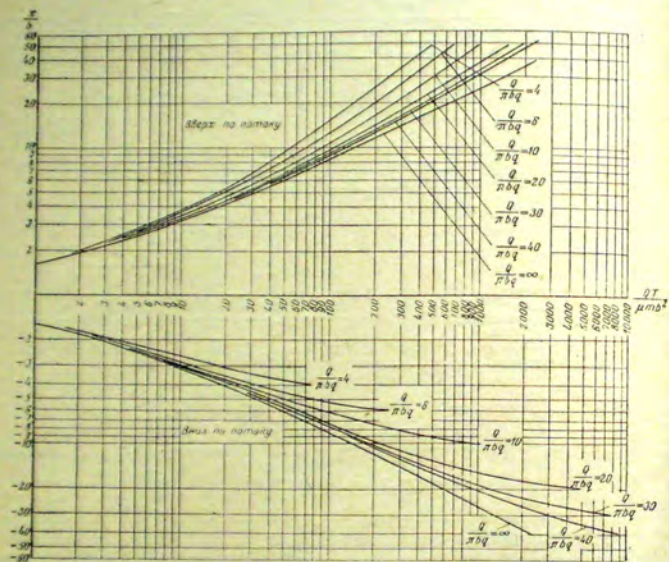


Рис. 9. Графики для выделения зон санитарной охраны двух водозаборов в неограниченном пласте (водозаборы располагаются по направлению потока, т. е. на оси x)

известным значениям Q , q , t , μ и b определять расстояние до границы зоны санитарной охраны вверх и вниз по потоку от водозаборов.

Аналогично определяется время прихода к началу координат частицы жидкости, находящейся на оси x выше водозаборов по потоку, для случая, когда эти водозаборы располагаются на оси y :

$$T = \frac{\mu t a}{q} \left\{ \frac{x}{a} - \frac{Q}{2\pi a q} \ln \left(\frac{x^2}{a^2} + \frac{Q}{\pi a q} \cdot \frac{x}{a} + 1 \right) \right\} +$$

$$+ \frac{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2}{\sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 + 1}} \left[\ln \frac{\frac{x}{a} + \frac{Q}{2\pi a q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 - 1}}{\frac{x}{a} + \frac{Q}{2\pi a q} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 - 1}} - \ln \frac{\frac{Q}{2\pi a q} - \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 - 1}}{\frac{Q}{2\pi a q} + \sqrt{\left(\frac{Q}{2\pi a q}\right)^2 - 1}} \right] \quad (III.43)$$

Построение зон санитарной охраны, рассчитываемых на определенный срок, сначала рассмотрим для условий «бассейна».

Методика расчета разработана румынским инженером Д. Чоком (D. Cioc, 1956).

Время прихода частицы жидкости, находящейся на продолженной линии, соединяющей водозаборы (пусть это будет ось x), к ближайшему водозабору определяется по формуле

$$T = \frac{\pi \mu t b^2}{2Q} \left(\frac{x^2}{b^2} - 1 - 2 \ln \frac{x}{b} \right), \quad (III.44)$$

легко получаемой при совмещенном решении выражений (III.39) и (II.6), если положить $i = 0$.

Чтобы определить расстояние до границы зоны в направлении, перпендикулярном линии, соединяющей водозаборы (пусть это будет ось y), Д. Чок предлагает воспользоваться балансовым уравнением

$$\pi \mu t f_1 f_2 = 2QT, \quad (III.45)$$

составленным при допущении, что $f_1 = x$ и $f_2 = y$ — полуоси эллипса, которому уподобляется в плане зона санитарной охраны.

Величина полуоси $f_1 = x$ в выражении III.45 определяется из графика на рис. 9 (соответствующего отношению $\frac{Q}{\pi b q} = \infty$), построенного по формуле (III.44).

В условиях потока построение зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, значительно сложнее, так как установление связи между положением частицы жидкости, если она не располагается на оси x , и временем ее прихода к ближайшему водозабору требует весьма громоздких расчетов.

В связи с этим возникла необходимость в упрощении последних. Если сравнить результаты расчетов по выражениям (III.21) и (III.41), то можно заметить, что при подстановке в выражение (III.21) суммарного дебита обоих водозаборов время прихода частицы жидкости оказывается весьма близким ко времени, полученному по выражению (III.41), если значение $\frac{x}{b}$ будет достаточно большим ($\frac{x}{b} > 5$).

Если сравнить также выражения (III.34) и (III.35) с выражениями (III.9), (III-10) и (III.11), то можно увидеть, что они почти аналогичны и переходят один в другой при замене Q на $2Q$.

Следовательно, с достаточной для практических целей точностью можно рассчитывать зону санитарной охраны двух взаимно действующих водозаборов как зону санитарной охраны одиночного водозабора, расположенного посредине между данными водозаборами, т. е. в начале координат, и работающего с дебитом, равным суммарному дебиту обоих водозаборов. Методика выделения такой зоны подробно рассмотрена в первом разделе настоящей главы. Лишь при расположении водозаборов на оси x точки пересечения границы зоны с осью x находятся по графикам на рис. 9.

Анализ очертаний и размеров большого числа зон санитарной охраны, рассчитанных таким образом для различных значений Q , a , b , k , m и μ при значениях T , превышающих 5—6 тысяч суток, показал, что и в условиях потока вполне применим описанный выше для условий бассейна балансовый метод расчета зон санитарной охраны.

Действительно, эти зоны имеют форму эллипса, длинная полуось которого (f_1) примерно равна полусумме рассчитанных по графикам на рис. 9 расстояний (x_1) и (x_2) до границ зоны от начала координат соответственно вверх и вниз по потоку.

Центр эллипса находится выше по потоку от начала координат на расстоянии, равном полуразности расстояний (x_1) и (x_2).

Короткая полуось эллипса (f_2) определяется, как и для условий бассейна, по формуле (III.45), разрешенной относительно f_2 .

Следует отметить, что и очертания зон санитарной охраны, построенных вокруг одиночного водозабора, весьма близки к очертаниям эллипса, длинная полуось которого также определяется, как полусумма расстояний (x_1) и (x_2) до границ зоны от начала координат соответственно вверх и вниз по потоку, но снятых с графиков на рис. 7.

Аналогично определяется и положение центра эллипса.

Что касается короткой полуоси эллипса, то она также определяется по формуле (III.45), в правой части которой вместо $2Q$ стоит Q — дебит одиночного водозабора.

Пример. Водоснабжение строящегося анилино-красочного завода проектируется осуществить двумя равнодебитными скважинами с суммарным дебитом $2500 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Скважины расположены на расстоянии 400 м одна от другой перпендикулярно направлению естественного потока (точки C и D на рис. 8).

Намечаемый к эксплуатации водоносный горизонт является безнапорным и пользуется широким распространением. Представлен он трещиноватыми известняками средней мощностью 50 м , средним коэффициентом фильтрации $10 \text{ м}/\text{сутки}$ и активной пористостью, изменяющейся от $0,01$ до $0,05$ и равной в среднем $0,03$.

Естественный уклон грунтового потока,двигающегося с севера на юг, изменяется от $0,0003$ до $0,0007$ и равен в среднем $0,0005$.

Требуется рассчитать границы второго пояса санитарной охраны проектируемого водозабора. Срок, на который должна рассчитываться зона санитарной охраны, 25 лет, или 9000 суток.

Таким образом, дано:

$$Q = \frac{2500}{2} = 1250 \text{ м}^3/\text{сутки}; 2a = 400 \text{ м};$$

$$k = 10 \text{ м}/\text{сутки}; m = 50 \text{ м}; i = 0,0005;$$

$$\mu = 0,03; q = 10 \cdot 50 \cdot 0,0005 = 0,25 \text{ м}^2/\text{сутки};$$

$$T = 9000 \text{ суток}.$$

Из условий примера явствует, что данный водоносный горизонт может рассматриваться как «неограниченный» пласт.

Зону санитарной охраны двух проектируемых скважин рассчитываем, как зону одиночного водозабора, работающего с дебитом, равным суммарному дебиту обеих скважин и расположенного посредине между этими скважинами, т. е. в начале координат.

Для этого определяем приведенное время \bar{T}

$$\bar{T} = \frac{2\pi q^2 T}{\mu m (2Q)} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25^2 \cdot 9000}{0,03 \cdot 50 \cdot 2500} = 0,942.$$

По графикам на рис. 5 определяем значения приведенных координат \bar{y} , соответствующие подсчитанному приведенному времени $\bar{T} = 0,942$, для точек пересечения искомой границы зоны с прямыми $x = 2y$; $x = y$; $x = 0,5y$; $x = 0$; $x = -0,5y$; $x = -y$; $x = -3y$. Эти значения составили соответственно:

$$\text{для прямой } x = 2y, \quad \bar{y} = 0,86, \quad y = \frac{2Q}{2\pi q} \bar{y} = \frac{2 \cdot 12,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,25} \cdot 0,86 = 1370 \text{ м}$$

$$x = y, \quad \bar{y} = 1,20, \quad y = \frac{2Q}{2\pi q} \bar{y} = 1600 \cdot 1,20 = 1920 \text{ м}$$

$$x = 0,5y, \quad \bar{y} = 1,25, \quad y = 1600 \cdot 1,25 = 2000 \text{ м}$$

$$x = 0, \quad \bar{y} = 1,15, \quad y = 1600 \cdot 1,15 = 1840 \text{ м}$$

$$x = -0,5y, \quad \bar{y} = 0,9, \quad y = 1600 \cdot 0,9 = 1440 \text{ м}$$

$$x = -y, \quad \bar{y} = 0,64, \quad y = 1600 \cdot 0,63 = 1020 \text{ м}$$

$$x = -3y, \quad \bar{y} = 0,27, \quad y = 1600 \cdot 0,27 = 430 \text{ м}$$

По графикам на рис. 7 определяем значения приведенных координат \bar{x} для точек пересечения искомой зоны с осью x выше и ниже водозаборов по потоку. Они составили соответственно: $\bar{x}_1 = 2,05$ и $\bar{x}_2 = -0,83$.

Следовательно, граница искомой зоны пересечет ось x выше по потоку на расстоянии $x_1 = \frac{2Q}{2\pi q} \bar{x}_1 = 1600 \cdot 2,05 = 3280 \text{ м}$ от начала координат, а ниже по потоку $x_2 = 1600 \cdot (-0,83) = -1330 \text{ м}$, т. е. — на расстоянии 1300 м от начала координат.

На рис. 8 показаны границы рассчитанной зоны санитарной охраны и положение нейтральной линии тока, рассчитанной по выражениям (III.34) и формуле (III.36).

нии потока, выраженные в функции напора, полученное способом, аналогичным вышеописанному, имеет вид

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{4\pi kml} \left\{ \ln \frac{\sqrt{y^2 + (x-l)^2}^{x-l}}{\sqrt{y^2 + (x+l)^2}^{x+l}} - y \left(\operatorname{arctg} \frac{x+l}{y} - \operatorname{arctg} \frac{x-l}{y} \right) \right\} - \frac{Q}{2\pi km} (1 + \ln R). \quad (\text{III.47})$$

Дифференцируя выражения (III.46) и (III.47) по x , соответственно получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i + \frac{Q}{4\pi kml} \left(\operatorname{arctg} \frac{y+l}{x} - \operatorname{arctg} \frac{y-l}{x} \right) \quad (\text{III.48})$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i + \frac{Q}{4\pi kml} \ln \frac{\sqrt{y^2 + (x+l)^2}}{\sqrt{y^2 + (x-l)^2}}. \quad (\text{III.49})$$

Интегрирование выражений (III.48) и (III.49) по y приводит к выражениям для функций тока в фильтрационном поле линзовидного водозабора при различных его положениях по отношению к направлению естественного потока.

а) При расположении водозабора перпендикулярно направлению потока

$$\psi = qy + \frac{Qx}{4\pi l} \left[\frac{y+l}{x} \operatorname{arctg} \frac{y+l}{x} - \frac{y-l}{x} \operatorname{arctg} \frac{y-l}{x} - \ln \frac{\sqrt{(y+l)^2 + x^2}}{\sqrt{(y-l)^2 + x^2}} \right]; \quad (\text{III.50})$$

б) при расположении водозабора по направлению потока

$$\psi = qy + \frac{Qy}{4\pi l} \left[\frac{x+l}{y} \operatorname{arctg} \frac{y}{x+l} - \frac{x-l}{y} \operatorname{arctg} \frac{y}{x-l} + \ln \frac{\sqrt{y^2 + (x+l)^2}}{\sqrt{y^2 + (x-l)^2}} \right]. \quad (\text{III.51})$$

Вследствие полной симметрии фильтрационного поля относительно оси x ниже рассматривается лишь одна (правая от оси) его половина. Все приводимые ниже решения будут справедливы и для левой относительно оси x половины поля, в которой допустимые направления оси y и направление отсчета углов будут обратными по сравнению с правой половиной фильтрационного поля.

Учитывая вышесказанное, уравнения (III.50) и (III.51) могут быть записаны несколько иначе:

$$\psi = C + qy + \frac{Qx}{4\pi l} \left(\theta_2 \operatorname{tg} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{tg} \theta_1 - \ln \frac{r_2}{r_1} \right) \quad (\text{III.52})$$

$$\psi = C + qy + \frac{Qy}{4\pi l} \left(\theta_2 \operatorname{ctg} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_1 + \ln \frac{r_2}{r_1} \right), \quad (\text{III.53})$$

где θ_1 и θ_2 — углы, образованные в любой точке фильтрационного поля направлением естественного потока и направлением соответственно на ближний (или верхний по потоку) и дальний (или нижний по потоку) концы ряда; данные углы отсчитываются по часовой стрелке от направления естественного потока и выражаются в радианах; r_1 и r_2 — расстояния от той же точки соответственно до ближнего (или верхнего по потоку) и до дальнего (или нижнего по потоку) концов ряда.

Поскольку фильтрационное поле является симметричным относительно оси x , с каждой стороны от оси к водозабору приходит одинаковый расход, равный половине суммарного дебита водозабора. Следовательно, значение функции тока для правой относительно оси x ветви нейтральной линии тока, ограничивающей зону захвата водозабора, будет равно $\frac{Q}{2}$, а само уравнение нейтральной линии

тока будет иметь вид:

а) при расположении водозабора перпендикулярно направлению естественного потока

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Qx}{4\pi l} \left[\frac{y+l}{x} \operatorname{arctg} \frac{y+l}{x} - \frac{y-l}{x} \operatorname{arctg} \frac{y-l}{x} - \ln \frac{\sqrt{(y+l)^2 + x^2}}{\sqrt{(y-l)^2 + x^2}} \right] \quad (\text{III.54})$$

или

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Qx}{4\pi l} \left(\theta_2 \operatorname{tg} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{tg} \theta_1 - \ln \frac{r_2}{r_1} \right); \quad (\text{III.54})$$

б) при расположении водозабора по направлению естественного потока

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Qy}{4\pi l} \left[\frac{x+l}{y} \operatorname{arctg} \frac{y}{x+l} - \frac{x-l}{y} \operatorname{arctg} \frac{y}{x-l} + \ln \frac{\sqrt{y^2 + (x+l)^2}}{\sqrt{y^2 + (x-l)^2}} \right] \quad (\text{III.55})$$

или

$$\frac{Q}{2} = qy + \frac{Qy}{4\pi l} \left(\theta_2 \operatorname{ctg} \theta_2 - \theta_1 \operatorname{ctg} \theta_1 + \ln \frac{r_2}{r_1} \right).$$

Построение нейтральной линии тока по уравнениям (III.53) и (III.55) является весьма трудоемкой операцией, связанной сложным подбором, так как переменные x и y в этих уравнениях не разделяются.

Поэтому точное построение нейтральной линии тока может быть проведено в каждом частном случае с помощью вычислительной машины.

В подавляющем большинстве случаев нет необходимости в точном построении нейтральной линии тока.

Для практических целей вполне достаточно ограничиться нахождением нескольких легко определяемых точек на пересечении нейтральной линии тока с осями координат (т. е. с прямыми $x = 0$ и $y = 0$) и с прямыми $x = l$ и $y = l$.

Независимо от положения водозабора относительно направления естественного потока нейтральная линия тока пересекает ось x в точке с координатами $x = 0$ и

$$y = \frac{Q}{4q}. \quad (III.54)$$

Координаты точки пересечения нейтральной линии с осью x определяются из выражений (III.48) и (III.49) при условии, что в этой точке $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ и $y = 0$.

Значение координаты x при этом составило:

а) при расположении водозабора перпендикулярно направлению потока

$$x = -l \operatorname{ctg} \frac{2\pi ql}{Q}; \quad (III.55)$$

б) при расположении водозабора по направлению потока

$$\frac{x}{l} = -\frac{1 + e^{-\frac{4\pi ql}{Q}}}{1 - e^{-\frac{4\pi ql}{Q}}} \quad \text{или} \quad x = -l \operatorname{cth} \frac{2\pi ql}{Q}. \quad (III.56)$$

Для нахождения точек пересечения нейтральной линии тока с прямыми $x = l$ и $y = l$ при расположении водозабора перпендикулярно направлению естественного потока на рис. 11 приведены графики, построенные по уравнению (III.54) при подстановке в него соответствующих значений $x = l$ или $y = l$.

Невозможность разделения переменных в уравнениях линии тока делает весьма сложной задачу установления связи между положением частицы жидкости в фильтрационном поле линейного водозабора и временем ее прихода к скважинам водозабора.

Поэтому, как и в случаях двух взаимодействующих водозаборов, ограничимся установлением требуемой связи для случаев, когда частица жидкости располагается на осях координат. Рассмотрим линейный водозабор, расположенный перпендикулярно направлению естественного потока. Если частица жидкости распо-

лагается на оси x , т. е. на оси симметрии фильтрационного поля, она движется к водозабору прямолинейно по оси x .

Скорость этого движения определяется из выражений (III.48) и (III.4) при $y = 0$.

$$v_x = \pm \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial x} = \pm \frac{k}{\mu} \left(i + \frac{Q}{2\pi kml} \operatorname{arctg} \frac{l}{x} \right). \quad (III.59)$$

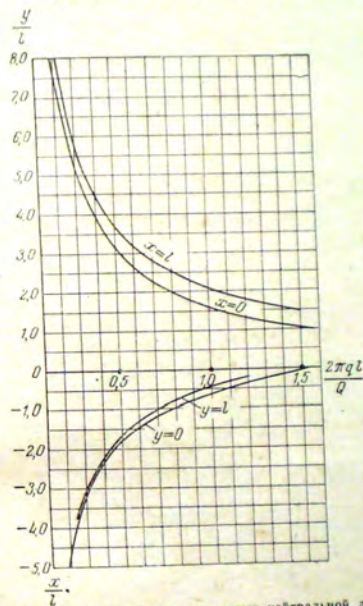


Рис. 11. Графики для построения нейтральной линии тока в фильтрационном поле линейного ряда скважин

Знак перед правой частью выражения (III.59) означает, где (выше или ниже по потоку от линии ряда) находится рассматриваемая частица жидкости.

Подставляя значение v_x в уравнение (II.6) и интегрируя, после некоторых преобразований получим

$$T = \frac{2\pi \mu l^2}{Q} \int_{\frac{x}{l}}^z \frac{dz}{\left(z + \frac{2\pi ql}{Q} \right) \sin^2 z} \quad (III.60)$$

$$\left(z = \operatorname{arctg} \frac{l}{x} \right).$$

Эти гр
пределен
аходяща
анитарн
Опред
агающей
ельно б
отока д
асстоя
си y , а
а котор

олучен
ат точ
айшей
орди

Вы
одста
По
II.6

звс
пр
одо
С
ини
огд
ра

дл

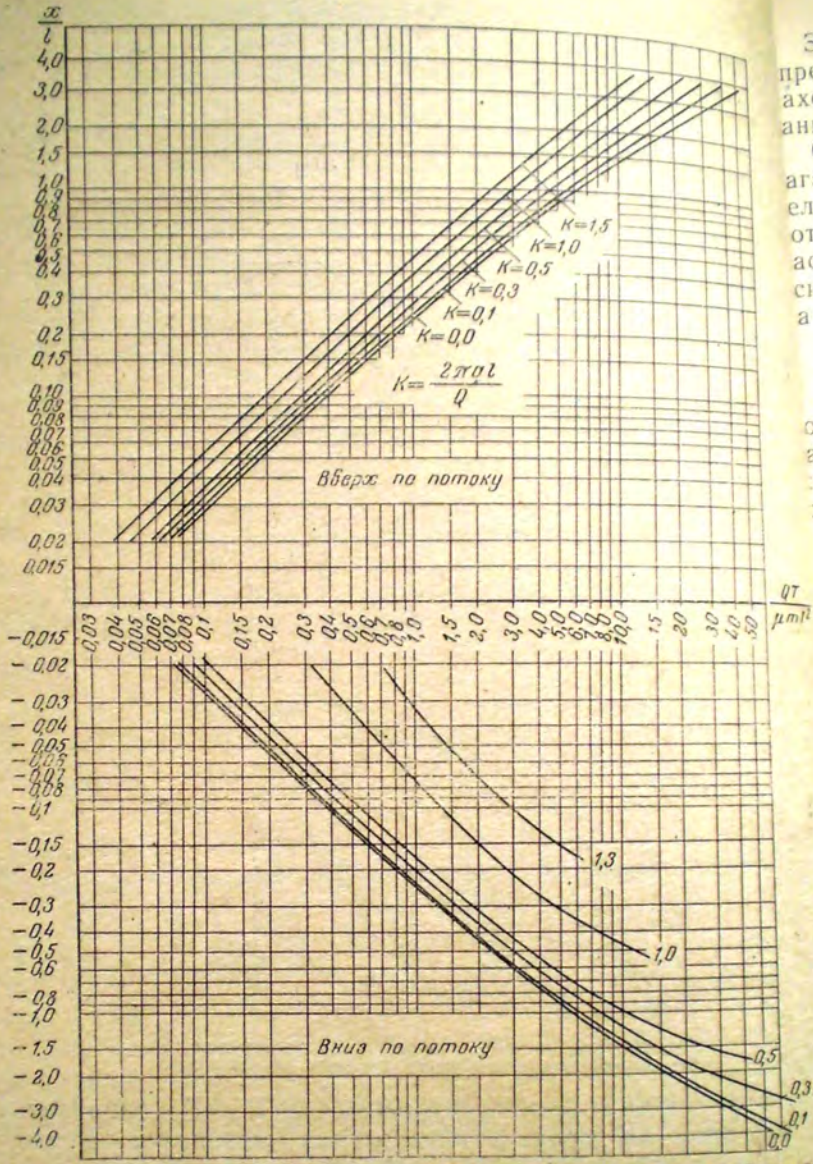


Рис. 12. Графики для определения границ зоны санитарной охраны линейного ряда скважин (неограниченный поток)

Результаты численного интегрирования выражения (III.60) приведены на рис. 12 в виде графиков, характеризующихся различными значениями отношения $\frac{\Sigma pq l}{Q}$

На рис. 12 приведен также график для значения $\frac{\Sigma pq l}{Q} = 0$, т.е. для условий «бассейна».

Эти графики позволяют определить то расстояние, которое за определенное время пройдет до водозабора частица жидкости, находящаяся на оси x , т. е. позволяют построить границы зоны санитарной охраны вверх и вниз от водозабора по потоку.

Определение времени прихода к ряду частицы жидкости, расположенной на продолжении ряда, т. е. на оси y , является значительно более сложной задачей. Связано это с тем, что в условиях потока движение частицы жидкости, находящейся в точке A на расстоянии y_0 от начала координат (см. рис. 10), происходит не по оси y , а по соответствующей линии тока, значение функции тока на которой определится из выражения

$$C_A = y_0 q + \frac{Q}{4}, \quad (III.61)$$

полученного из уравнения (III.50) при подстановке в него координат точки A . И придет эта частица к водозабору не в районе ближайшей крайней скважины ряда, а в точке B , отстоящей от начала координат на расстоянии y_1 , определяемом из выражения

$$y_1 = \frac{\frac{Q}{2} - C_A}{\frac{Q}{4l} - q}. \quad (III.62)$$

Выражение (III.62) также получено из уравнения (III.50) при подстановке в него координат точки B .

Подставив в выражение (III.62) значение C_A из выражения (III.61), получим формулу

$$y_1 = \left(\frac{Q - 4qy_0}{Q - 4ql} \right) \cdot l, \quad (III.63)$$

позволяющую по известному местоположению частицы жидкости на продолжении ряда определить точку прихода ее к линейному водозабору.

Следует отметить, что, как вытекает из выражения (III.61), линия тока пересекает ось y в двух точках только в том случае, когда значение функции тока для этой линии тока удовлетворяет неравенству

$$\frac{Q}{2} > C_A > ql + \frac{Q}{4}. \quad (III.64)$$

Если это неравенство не выполняется и

$$C_A < ql + \frac{Q}{4}, \quad (III.65)$$

соответствующая линия тока пересекает ось y только в одной точке, находящейся в пределах линейного ряда на расстоянии y' от начала координат.

= 0, т. е.

Величина y' определяется из выражения

$$y' = \frac{C_A}{\frac{Q}{4l} + q}, \quad (III.45)$$

также полученного из уравнения (III.50) после соответствующей подстановки значений предельных углов в точке пересечения линии тока с линейным рядом.

Рассмотрим движение частицы жидкости на линии тока.

Составляющая скорости этого движения, параллельная оси y , определяется из выражения

$$v_y = \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{Q}{4\pi\mu ml} \ln \frac{\sqrt{(y+l)^2 + x^2}}{\sqrt{(y-l)^2 + x^2}}, \quad (III.46)$$

полученного из выражения (III.46).

Можно видеть, что скорость v_y является функцией двух переменных, и выразить ее в виде функции одной переменной не представляется возможным. А значит интегрирование, необходимое для определения времени прихода частицы жидкости в район водозабора, без помощи вычислительных машин также является невозможным.

Чтобы облегчить задачу, рассмотрим условия бассейна, когда $q \approx 0$.

В этих условиях частица жидкости, находящаяся на продолжении ряда, движется к нему по оси y со скоростью

$$v_y = \frac{Q}{4\pi\mu ml} \ln \frac{y+l}{y-l}. \quad (III.47)$$

Подставив значение v_y в уравнение (II.7) и интегрируя, получим

$$T = \int_l^y \frac{dy}{\ln \frac{y+l}{y-l}}. \quad (III.48)$$

Результаты численного интегрирования выражения (III.48) представлены на рис. 13 (график, характеризующийся соотношением $\frac{4ql}{Q} = 0$).

Нетрудно видеть, что в условиях бассейна частица жидкости, находящаяся на оси y , придет к ряду значительно раньше, чем в условиях потока, так как при прочих равных условиях скорость из выражения (III.68) всегда больше скорости из выражения (III.67) при $x \neq 0$. Не говоря уже о том, что в условиях бассейна сам путь частицы вдоль оси y будет короче.

В условиях бассейна, например, для частицы в точке А путь равен разности $y_0 - l$, а в условиях потока он равен разности $y_0 - y_1$. И чем дальше будет находиться частица жидкости от кра-

яда, тем большей будет разность в длине пути, так как одновременно с увеличением y_0 будет уменьшаться y_1 .

Чтобы несколько приблизить значения времени, определенные для условий бассейна, к условиям потока, рассмотрим движение частицы жидкости, находящейся на оси y (например, в точке А), под влиянием линейного ряда с суммарным дебитом, равным деби-

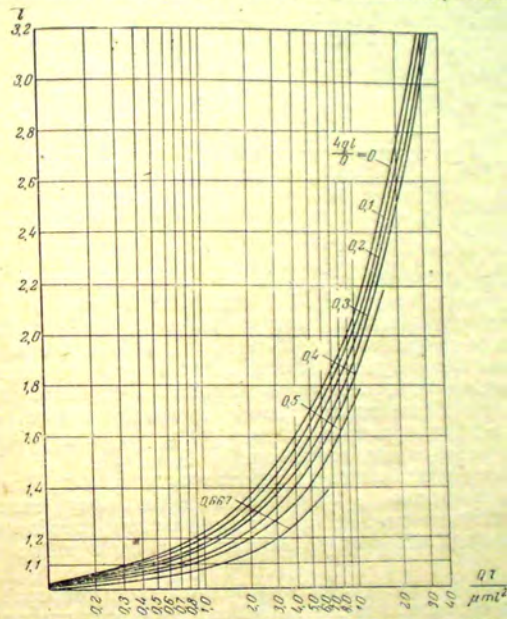


Рис. 13. Графики для определения границ зоны санитарной охраны на продолжении линейного ряда скважин (неограниченный поток)

ту действительного ряда, но с длиной, сокращенной с $2l$ до $2y_1$; таким образом, расстояние конца данного ряда от рассматриваемой частицы жидкости в точке А будет равным разности $y_0 - y_1$.

В этих условиях скорость v_y движения частицы по оси y определится из выражения

$$v_y = \frac{Q}{4\pi\mu y_1} \ln \frac{y+y_1}{y-y_1}. \quad (III.70)$$

Сравнивая по величине скорости из выражения (III.67) и (III.70), можно видеть, что большие значения всегда имеет скорость, определенная по формуле (III.70). Поэтому время прихода

частицы жидкости из точки A к ряду в условиях потока будут оставаться всегда несколько большим времени прихода этой частицы к ряду в условиях бассейна, если допустить, что длина ряда сократится до $2y_1$, а суммарный дебит сохранится.

Проведя необходимые преобразования, аналогичные вышеприведенным, можно определить примерное время прихода частицы жидкости из точки A , отстоящей на расстоянии y_0 от середины ряда, к водозабору в точке B , отстоящей от середины ряда на расстоянии y_1 .

$$T = \frac{4\pi\mu ml^2}{Q} \left(\frac{\frac{Q}{4ql}}{\frac{y_0}{y_1} + \frac{Q}{4ql} - 1} \right)^2 \int_1^{\frac{y_0}{y_1}} \frac{d\left(\frac{y}{y_1}\right)}{\ln \frac{\frac{y}{y_1} + 1}{\frac{y}{y_1} - 1}} \quad (III.71)$$

Результаты численного интегрирования выражения (III.71) приведены на графиках рис. 13. Эти графики позволяют определять примерное время прихода частицы жидкости, располагающейся в любой точке на продолжении линейного ряда, к скважинам ряда. Полученное время будет несколько меньшим, чем действительное.

Следовательно, по этим графикам можно по заданному времени с определенным запасом надежности определять то расстояние на оси y от середины ряда, на котором должна проходить граница зоны санитарной охраны водозабора.

Решения, представленные в виде графиков на рис. 12 и 13, позволяют с известным приближением выделить зону санитарной охраны линейного водозабора, удовлетворяющую требованиям во времени допустимого прихода загрязненных вод в район водозабора.

Как и для случая двух взаимодействующих водозаборов, выяснено, что очертания зоны санитарной охраны в этом случае также близки к очертаниям эллипса, центр которого находится на оси x на расстоянии от начала координат, равном полуразности расстояний (x_1) и (x_2) , определяемых по графикам на рис. 12 соответственно вверх и вниз по потоку.

Та полуось эллипса, которая совпадает с координатной осью x , определяется как полусумма тех же расстояний (x_1) и (x_2) , снимаемых с графиков на рис. 12, а вторая полуось, параллельная координатной оси y , определяется по формуле (III.45), в правой части которой вместо $2Q$ стоит Q — суммарный дебит линейного водозабора.

При этом если расстояние границы зоны по оси y от середины ряда, определенное по графикам на рис. 13, окажется большим, чем расстояние от середины ряда до точки пересечения эллипса с продолжением ряда, то эллиптическую форму зоны санитарной

охраны следует несколько нарушить, проведя ее границы через ось y на таком расстоянии от середины ряда, какое определено по графикам на рис. 13.

Пример. Водоснабжение строящегося промышленного предприятия и жилого поселка проектируется осуществить водозабором, выполненным в виде линейного ряда, состоящего из семи эксплуатационных скважин и располагающегося вкrest потока грунтовых вод, направленному с севера на юг (рис. 14). Проект-

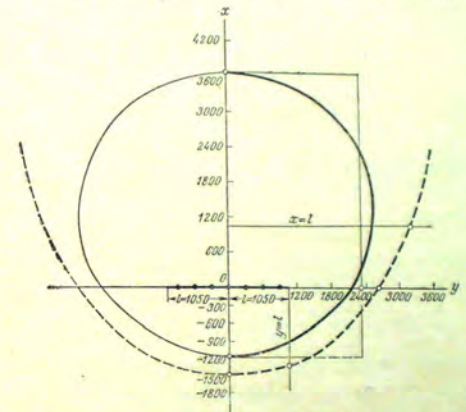


Рис. 14. Линейный водозабор в неограниченном пласте и зона санитарной охраны

ный суммарный дебит водозабора $10\,500 \text{ м}^3/\text{сутки}$. Скважины имеют одинаковый дебит (по $1500 \text{ м}^3/\text{сутки}$) и располагаются примерно в 300 м одна от другой.

Намечаемый к эксплуатации водоносный горизонт приурочен к отложениям предгорной аллювиальной равнины, характеризующейся широким площадным распространением* и не имеющей постоянного водотока.

Мощность водоносного горизонта составляет в среднем 25 м , средний коэффициент фильтрации 80 м/сутки , средний уклон подземного потока $0,0005$. Активная пористость, определенная опытным путем, составила $0,20$.

Требуется выделить около проектируемого линейного водозабора второй пояс санитарной охраны, рассчитанный на 25 лет, или 9000 суток.

По условиям примера дано:
 $Q = 10\,500 \text{ м}^3/\text{сутки}$; $K = 80 \text{ м/сутки}$; $m = 25 \text{ м}$; $i = 0,0005$;
 $\mu = 0,20$; $q = kni = 80 \cdot 25 \cdot 0,0005 + 1 \text{ м}^2/\text{сутки}$;
 $2\sigma = 300 \text{ м}$; $n = 7$; $l = \sigma \cdot n = 1050 \text{ м}$.

Водоносный горизонт может рассматриваться как «неограниченный» пласт.

Как уже отмечалось выше, очертания границ второго пояса санитарной охраны линейного водозабора в неограниченном пласте имеют примерно форму эллипса, положение центра и величина одной из полуосей которого определяется по графикам на рис. 12. Чтобы воспользоваться этим графиком, следует подсчитать значение приведенного времени \bar{T} и отношения $\beta = \frac{2\pi ql}{Q}$

$$\bar{T} = \frac{QT}{\mu ml^2} = \frac{10500 \cdot 9000}{0,2 \cdot 25 \cdot 1050^2} = 17,14;$$

$$\beta = \frac{2\pi ql}{Q} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 1,0 \cdot 1050}{10500} = 0,628,$$

Расстояние до границы зоны вверх по потоку от водозабора определяем по верхним графикам на рис. 12. Здесь нет графика, соответствующего $\beta = \frac{2\pi ql}{Q} = 0,628$. Поэтому искомое значение

«приведенной» координаты $\bar{x} = \frac{x}{l}$ находим путем интерполяции.

Для этого на ближайших к расчетному значению β графиках $\beta_1 = \frac{2\pi ql}{Q} = 0,5$ и $\beta_2 = \frac{2\pi ql}{Q} = 1,0$ снимаются соответствующие «приведенному» времени $\bar{T} = 17,14$ значения «приведенных» координат \bar{x} . Они составили соответственно $\bar{x}_1 = 3,25$ и $\bar{x}_2 = 4,0$.

Искомое значение \bar{x} определяется интерполяцией по зависимости

$$\bar{x} = \frac{x}{l} = \bar{x}_1 + \frac{\beta - \beta_1}{\beta_2 - \beta_1} \cdot (\bar{x}_2 - \bar{x}_1), \quad (III.72)$$

откуда $\bar{x} = 3,25 + \frac{0,628 - 0,5}{1,0 - 0,5} (4,0 - 3,25) = 3,44$

и $x = l \cdot \bar{x} = 1050 \cdot 3,44 = 3610$ м.

Аналогично находим расстояние до границы зоны вниз по потоку от водозабора. Для этого используем графики в нижней половине рис. 12. Здесь на графиках $\beta_1 = 0,5$ и $\beta_2 = 1,0$ приведенному времени $\bar{T} = 17,14$ соответствуют $\bar{x}'_1 = -1,3$ и $\bar{x}'_2 = -0,6$, а искомое значение \bar{x}' определяется интерполяцией по формуле (III.72).

$$\bar{x}' = \frac{x'}{l} = 1,3 + \frac{0,628 - 0,5}{1,0 - 0,5} (-0,6 + 1,3) = -1,12,$$

откуда $x' = l \cdot \bar{x}' = 1050 \cdot (-1,12) = -1180$ м.

Центр эллипса будет находиться на оси x выше ряда по потоку на расстоянии, равном полуразности найденных по графикам на рис. 12 расстояний от середины ряда до границ зоны вверх и

вниз по потоку, т. е. на расстоянии $\frac{1}{2} (3610 - 1180) = 1215$ м.

Полуось эллипса (f_1), совпадающая с осью x , будет равна полусумме этих расстояний, т. е. $f_1 = \frac{1}{2} \times (3610 + 1180) = 2395$ м.

Вторая полуось эллипса (f_2), параллельная оси y , определяется по формуле (III.45), разрешенной относительно f_2 .

$$f_2 = \frac{QT}{\pi \mu m f_1} = \frac{10500 \cdot 9000}{3,14 \cdot 0,2 \cdot 25 \cdot 2395} = 2515$$
 м.

На рис. 14 показана построенная по найденным параметрам эллиптическая граница искомой зоны санитарной охраны. Можно видеть, что она пересекает ось y на расстоянии 2150 м от середины ряда.

Проверим правильность построения зоны по графикам на рис. 13, позволяющим с определенным «запасом надежности» определить расстояние от середины ряда до границы зоны на продолжении ряда. Определим для этого отношение $\beta' = \frac{4ql}{Q}$

$$\beta' = \frac{4ql}{Q} = \frac{4 \cdot 1 \cdot 0,1050}{10500} = 0,4.$$

По графику, соответствующему рассчитанному значению $\beta' = \frac{4ql}{Q} = 0,4$, находится для «приведенного» времени $\bar{T} = 17,14$

значение «приведенной» координаты $\bar{y} = \frac{y}{l}$. Оно равно 2,20. Этому значению соответствует координата

$$y = l \cdot \bar{y} = 1050 \cdot 2,20 = 2310$$
 м.

Расстояние $y = 2310$ м, определенное с «запасом», весьма близко к расстоянию 2150 м, на котором пересекает эллиптическая граница зоны ось y .

Следовательно, построенная граница вполне удовлетворяет условиям примера.

На рис. 14 показана также нейтральная линия тока, построенная с помощью графиков на рис. 11.

Расчитанному значению $\beta = \frac{2\pi ql}{Q} = 0,628$ соответствуют:

по прямой $x = l$ приведенная координата	$\bar{y} = \frac{y}{l} = 3,05$
•	•
•	$\bar{y} = \frac{y}{l} = 2,5$
•	•
• $x = 0$ •	• $\bar{x} = \frac{x}{l} = -1,25$ •
•	•
• $y = l$ •	• $\bar{y} = \frac{y}{l} = -1,4$ •
•	•
• $y = 0$ •	•

Следовательно, координаты точек пересечения нейтральной линии тока с прямыми $x = l$ и $y = l$ и с осями координат следующие:
 на прямой $x = l$ $y = 3,05 \cdot 1050 = 3202$ м
 » » $y = l$ $x = -1,25 \cdot 1050 = -1312$ м
 на оси y (прямая $x = 0$) $= 2,5 \cdot 1050 = 2625$ м
 » » x (прямая $y = 0$) $= -1,4 \cdot 1050 = -1470$ м.

Номера формул и графиков для расчета зон санитарной охраны водозаборов в условиях неограниченного пласта сведены в таблицу 3.

Таблица 3

Номера формул и графиков, предлагаемых для расчета и выделения зон санитарной охраны водозаборов, работающих в условиях неограниченного пласта

Характер водозабора	Характер операции	Номера формул		Номера формул и графиков
		условия потока	условия бассейна	
Одиночный	Построение нейтральной линии тока Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	(III, 8) — (III, 12)	—	4
Два взаимодействующих	Построение нейтральной линии тока Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	(III, 20) — (III, 22) (III, 34) — (III, 37)	(III, 23)	5, 6, 7
	Построение нейтральной линии тока Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	(III, 41) — (III, 43) (III, 57), (III, 58)	(III, 44), (III, 45) —	9 11
Линейный	Построение нейтральной линии тока Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок		—	12, 13

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ ПОЛУОГРАНИЧЕННОГО ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

Если долина равнинной реки имеет большую ширину, измеряемую километрами, можно считать, что водозабор, расположенный вблизи реки и эксплуатирующий подземные воды, гидравлически тесно связанные с речными водами, работает в условиях полуограниченного пласта с рекой в качестве контура постоянного напора (или контура «питания», как обычно ее называют). Эксплуатируемый водоносный горизонт может и не быть приуроченным к аллювиальным отложениям. Пласт относится к полуограниченному с контуром постоянного напора во всех случаях, когда на характер фильтрационного поля водозабора оказывает влияние только одна граница — береговая линия поверхностных водотоков или водоемов. Это наиболее часто встречаемые случаи полуограниченного пласта. Значительно реже водозаборы работают в условиях полуограниченного пласта с непроницаемым контуром. Такие условия создаются, например, при расположении водозабора вблизи контакта эксплуатируемого водоносного горизонта с водоупорными породами, причем другие границы горизонта находятся в значительном отдалении от водозабора и не оказывают заметного влияния на структуру фильтрационного поля. Такое нерациональное размещение водозаборов зачастую связано с разного рода технико-экономическими соображениями.

В настоящей главе рассматривается методика выделения зон санитарной охраны одиночного, двух взаимодействующих и линейного водозаборов, работающих в условиях полуограниченного пласта с контуром постоянного напора.

Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев поверхностные водосточники, вблизи которых закладываются водозаборы подземных вод, дренируют в естественных условиях водоносный горизонт. Поэтому, как правило, направление естест-

венного потока может быть принято перпендикулярным береговой линии.

Этот случай и является основным при дальнейшем рассмотрении.

Однако в южных районах страны некоторые реки и каналы питают в естественных условиях подземные воды, в связи с чем направление движения последних может быть принято перпендикулярным берегу реки или канала и идущим от них. Ниже рассматриваются и такие условия.

Наконец, в широких равнинных речных долинах с большой мощностью водоносных пород иногда уклоны естественного потока, а значит, и его скорость, настолько малы, что поверхность подземных вод может быть принята горизонтальной (условия бассейна подземных вод).

В приводимых ниже графиках и номограммах отражены также и эти условия, решения для которых получены В. М. Гольдбергом (1963).

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ОДИНОЧНОГО ВОДОЗАБОРА

Если ось y провести по течению реки, а ось x — перпендикулярно реке через водозабор, как это показано на рис. 15, то функция напора в любой точке M с координатами x и y при естественном потоке, направленном к реке, напишется так:

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + y^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + y^2}}, \quad (IV.1)$$

где H_0 — напор на урезе реки;

a — расстояние водозабора от реки.

Дифференцируя (IV.1) по x , получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i - \frac{Q}{2\pi km} \cdot \left[\frac{a+x}{(a+x)^2 + y^2} + \frac{a-x}{(a-x)^2 + y^2} \right]. \quad (IV.2)$$

Интегрирование (IV.2) по y дает известное выражение для функции тока

$$\psi' = qy - \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{y}{a-x} + \arctg \frac{y}{a+x} \right). \quad (IV.3)$$

Вследствие полной симметрии фильтрационного поля относительно оси x нами рассматривается лишь правая от оси x область. Все приводимые ниже решения будут справедливы и для левой области, где положительным направлением оси y принимается направление вверх по течению реки.

На рис. 15 можно видеть, что

$$\arctg \frac{y}{a+x} = \angle AA'M \text{ и } \arctg \frac{y}{a-x} = \angle A'MA.$$

Как следует из треугольника $AA'M$,

$$\angle AA'M + \angle A'MA = \pi - \angle A'MA = \pi - \theta, \quad (IV.4)$$

где θ — угол, образованный в данной точке M фильтрационного поля направлением на водозабор и на его отображение.

В зависимости от положения точки в фильтрационном поле значения угла θ могут изменяться от 0 до π .

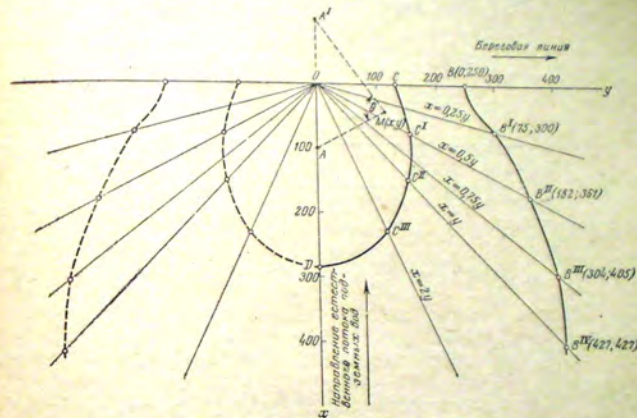


Рис. 15. Одиночный береговой водозабор и зоны санитарной охраны

Подставив (IV.4) в (IV.3) и произведя простейшие преобразования, получим

$$\psi = qy + \frac{Q}{2\pi} \theta \quad \left(\psi = \psi' + \frac{Q}{2} \right), \quad (IV.5)$$

или, что то же самое,

$$\psi = C = qy + \frac{Q}{2\pi} \left(\arctg \frac{a+x}{y} + \arctg \frac{a-x}{y} \right), \quad (IV.6)$$

так как

$$\theta = \angle A'MO + \angle AMO = \arctg \frac{a+x}{y} + \arctg \frac{a-x}{y}, \quad (IV.7)$$

Чтобы определить значение функции тока для нейтральной линии тока (C_N), воспользуемся известным решением Форхгеймера (1932), по которому нейтральная линия тока пересекает урез реки (точка B на рис. 15) на расстоянии y_0 от створа водозабора

$$y_0 = a \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}. \quad (IV.8)$$

Это решение получено из выражения (IV.2), разрешенного относительно y , при выполнении условий $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ и $x = 0$.

Подставив значение y_0 (из IV.8) в уравнение (IV.6) и учитывая, что в точке B $x = 0$, получим

$$C_N = aq \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1} + \frac{Q}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} \quad (\text{IV.9})$$

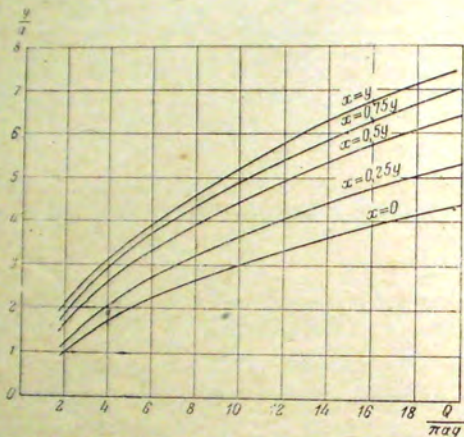


Рис. 16. Графики для построения нейтральной линии тока для одиночного берегового водозабора

Чтобы построить нейтральную линию тока, можно воспользоваться формулой

$$x = \sqrt{a^2 - y^2 + \frac{2ay}{\operatorname{tg} \left[\frac{2\pi}{Q} (C_N - qy) \right]}}, \quad (\text{IV.10})$$

полученной из выражения (IV.6) при $\psi = C_N$ и в результате суммирования арктангенсов и разрешения полученного уравнения относительно x .

По формуле (IV.10) можно, задаваясь произвольными значениями y , определить соответствующие им значения x .

Для ориентировочного построения нейтральной линии тока можно воспользоваться графиками на рис. 16, позволяющими найти точки пересечения нейтральной линии тока с прямыми $x = 0,25y$, $x = 0,5y$, $x = 0,75y$ и $x = y$. На рис. 16 приведен также график для

нахождения точки нейтральной линии тока с береговой линией, т. е. с осью y или прямой $x = 0$, построенный по формуле (IV.8).

Если естественный поток подземных вод направлен от реки (рис. 17), знак перед « i » в выражениях

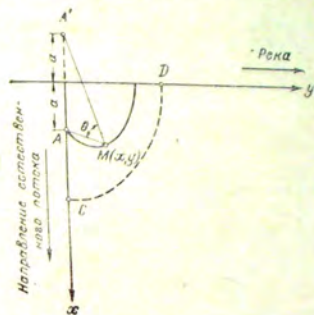


Рис. 17. Одиночный береговой водозабор в условиях движения естественного потока от реки

(IV.1) и (IV.2) изменится на обратный, т. е. на минус, и выражение для функции тока будет иметь вид

$$\psi' = qy - \frac{Q}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{y}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y}{a-x} \right). \quad (\text{IV.11})$$

С учетом равенства (IV.4) и (IV.7) выражение (IV.11) может быть преобразовано

$$\psi = \frac{Q}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{a+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{a-x}{y} \right) - qy, \quad (\text{IV.12})$$

или, что то же самое,

$$\psi = C = \frac{Q}{2\pi} \theta - qy \quad \left(\psi = \psi' + \frac{Q}{2} \right). \quad (\text{IV.13})$$

Значение функции тока для нейтральной линии тока равно нулю, так как правая часть выражения (IV.13) обращается в нуль в любой точке на оси x ниже водозабора по потоку.

Следовательно, уравнение нейтральной линии тока имеет вид

$$y = \frac{Q}{2\pi q} \theta \quad \text{или} \quad y = \frac{Q}{2\pi q} \left(\operatorname{arctg} \frac{a+x}{y} + \operatorname{arctg} \frac{a-x}{y} \right). \quad (\text{IV.14})$$

Из уравнения (IV.14), суммируя арктангенсы и разрешая его относительно x , получаем формулу для нахождения координаты

x точек нейтральной линии тока из заданных координатам y этих точек:

$$x = \sqrt{a^2 - y^2} + \frac{2ay}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi q}{Q} y\right)}. \quad (\text{IV.15})$$

Для построения нейтральной линии тока при естественном потоке подземных вод, направленном от реки, можно пользоваться графиками из рис. 18, позволяющими найти точки пересечения

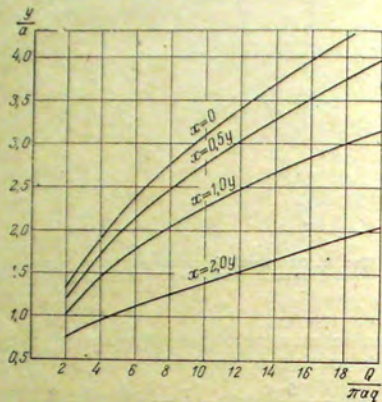


Рис. 18. Графики для построения нейтральной линии тока в фильтрационном поле одиночного водозабора (естественный поток направлен от реки)

нейтральной линии тока с осью y , т. е. с урезом реки, и с прямой $x = 0,5y$, $x = y$, и $x = 2y$.

Точка пересечения нейтральной линии с осью x определяется по формуле

$$x = a \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1}, \quad (\text{IV.16})$$

полученной из выражения (IV.2) при замене знака перед « i » на обратный и при условии, что $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ и $y = 0$.

Задача установления связи между положением частицы жидкости в фильтрационном поле берегового водозабора и временем ее прихода к этому водозабору, а значит и способ расчета и выделения зон санитарной охраны, рассчитываемых на опреде-

ленный срок, проще всего решается для частицы жидкости, предполагающихся на оси x выше или ниже водозабора по потоку.

Если естественный поток подземных вод направлен к реке, время T прихода к водозабору частицы жидкости, находящейся на оси x , определится по формуле

$$T = \frac{\mu m a}{q} \left[\frac{x}{a} - 1 - \frac{\frac{Q}{\pi a q}}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} \left(\operatorname{arctg} \frac{\frac{x}{a}}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} - \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} \right) \right]. \quad (\text{IV.17})$$

Формула (IV.17) получена в соответствии с выражением (II.4) и (II.6), в которых значение $\frac{\partial H}{\partial x}$ берется из выражения (IV.2) при $y = 0$.

Из формулы (IV.17), полагая $x = 0$, получается формула для определения времени прихода к водозабору первых порций воды из реки:

$$T_0 = \frac{\mu m a}{q} \left(\frac{\frac{Q}{\pi a q}}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} \operatorname{arctg} \frac{1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 1}} - 1 \right). \quad (\text{IV.18})$$

Если естественный поток подземных вод направлен от реки, соответствующие формулы (IV.17) и (IV.18), полученные аналогичным способом, имеют вид

$$T = \frac{\mu m a}{q} \left[1 - \frac{x}{a} + \frac{\frac{Q}{\pi a q}}{2 \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1}} \left(\ln \frac{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} + \frac{x}{a}}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} - \frac{x}{a}} - \ln \frac{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} + 1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} - 1} \right) \right]; \quad (\text{IV.19})$$

$$T_0 = \frac{\mu m a}{q} \left(1 - \frac{\frac{Q}{\pi a q}}{2 \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1}} \ln \frac{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} + 1}{\sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + 1} - 1} \right). \quad (\text{IV.20})$$

По формулам (IV.17) и (IV.19) составлены графики (рис. 19, 20 и 21), существенно облегчающие расчеты. Эти графики позволяют находить точки пересечения границ зоны санитарной охраны с осью x вверх и вниз от водозабора по потоку.

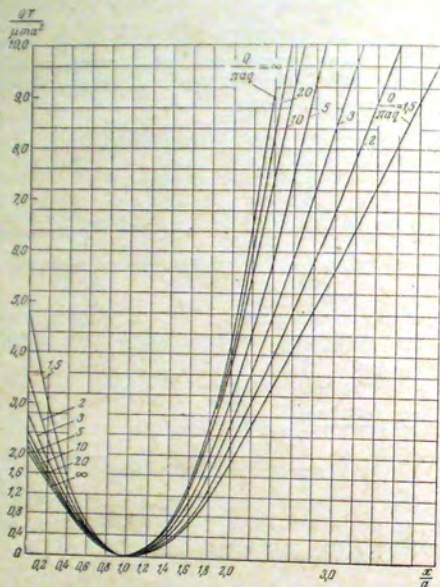


Рис. 19. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, дренирующей водоносный горизонт (точки границы зоны лежат вверх и вниз по потоку от водозабора, т. е. на оси x)

Для более удобного пользования формулой (IV.17) графики по ней (рис. 19 и 20) составлены в разных масштабах. Время прихода в район водозабора частицы жидкости из любой точки фильтрационного поля при естественном потоке, направленном к реке, определяется из выражения

$$T = \frac{2\pi\mu a}{Q} \int_0^y \frac{y dy}{\sqrt{a^2 - y^2 + \frac{2ay}{\operatorname{tg}\left[\frac{2\pi}{Q}(\Psi - yq)\right]}}}, \quad (\text{IV.21})$$

составленного в соответствии с выражениями (II.5 и II.7), в которые подставлены значения v_y , полученные дифференцированием функции напора (IV.1) по y и умножением производной на отношение $\frac{k}{\mu}$

$$v_y = \frac{k}{\mu} \frac{\partial H}{\partial y} = \frac{Qy}{2\pi\mu m} \left[\frac{1}{(a-x)^2 + y^2} - \frac{1}{(a+x)^2 + y^2} \right]. \quad (\text{IV.22})$$

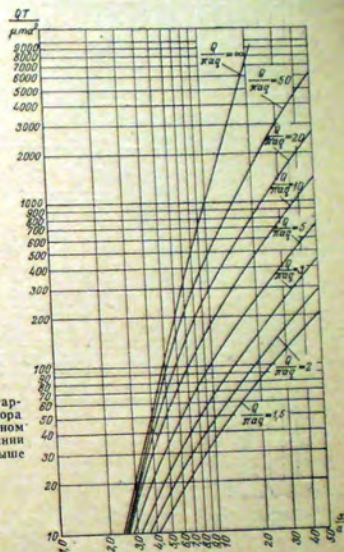


Рис. 20. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного берегового водозабора при потоке подземных вод, направленном в естественных условиях к береговой линии (точки границы зоны, лежащие на оси x , выше водозабора по потоку)

Из уравнения (IV.6) после суммирования арктангенсов и решения его относительно x имеем

$$x = \sqrt{a^2 - y^2 + \frac{2ay}{\operatorname{tg}\left[\frac{2\pi}{Q}(\Psi - yq)\right]}}. \quad (\text{IV.23})$$

Значение x из (IV.23) подставляется в выражение (IV.22), что позволяет выразить составляющую скорости частиц по оси y (v_y) через координату y и через функцию тока для той линии тока, по которой движется частица жидкости. Подставив затем выражение для v_y в уравнение (II.7) и интегрируя, окончательно получаем выражение (IV.21).

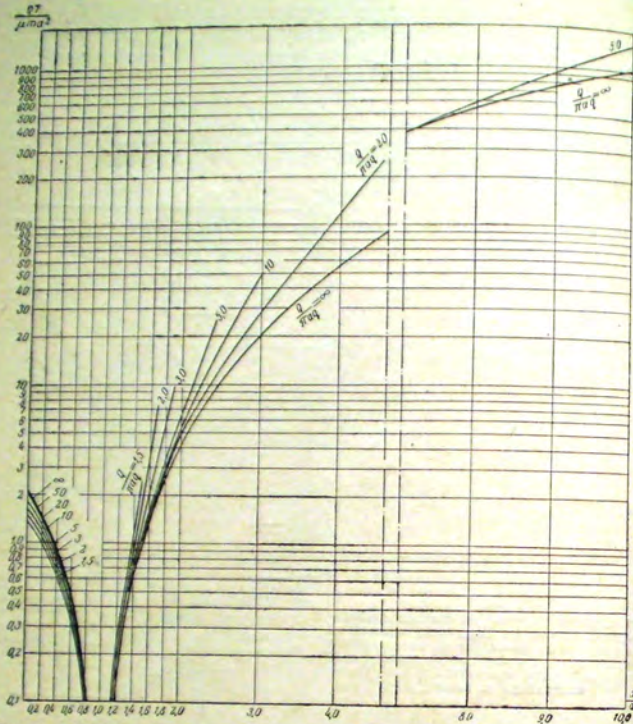


Рис. 21. Графики для определения границ зоны санитарной охраны одиночного берегового водозабора вверх и вниз по потоку от него (естественный поток направлен от реки)

Результаты численного интегрирования выражения (IV.21), проведенного раздельно для точек на прямых $x=0$, $x=0,5y$, $x=y$ и $x=2y$, приведены на графиках рис. 22, 23, 24 и 25.

При движении естественного потока подземных вод в направлении от реки соответствующее выражение имеет вид

$$T = \frac{2\pi\mu a}{Q} \int_0^y \frac{y dy}{\sqrt{a^2 - y^2 + \frac{2ay}{\operatorname{tg}\left[\frac{2\pi}{Q}(\psi + yq)\right]}}} \sin^2 \left[\frac{2\pi}{Q}(\psi + yq) \right] \quad (\text{IV.24})$$

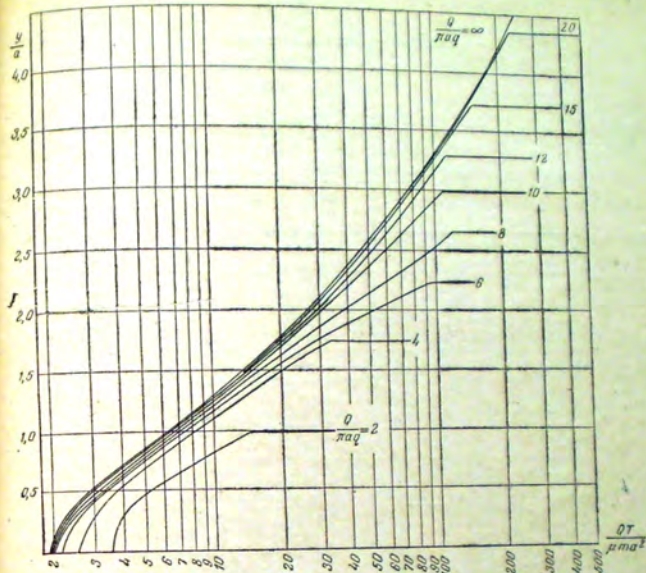


Рис. 22. Графики для выделения зоны санитарной охраны одиночного водозабора около реки, дренирующей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=0$)

Результаты численного интегрирования выражения (IV.24), проведенного раздельно по тем же прямым, представлены на графиках рис. 26, 27, 28 и 29.

На рис. 19—29 приведены также графики, составленные для условий бассейна (графики $\frac{Q}{\pi a q} = \infty$). Для их построения использована формула, полученная В. М. Гольдбергом (1963) для условий бассейна

$$T = \frac{2\pi\mu a}{Q} \left\{ 1 + \left(\frac{a^2 - y^2 - x^2}{2ay} \right)^2 \right\} \left\{ a - x - \frac{a^2 - y^2 - x^2}{2ay} \times \right. \\ \left. \times \left[\operatorname{arc} \sin \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{a^2 - y^2 - x^2}{2ay} \right)^2}} \right] \right\}$$

$$-\arcsin \frac{\frac{x}{a}}{\sqrt{1 + \left(\frac{a^2 - y^2 - x^2}{2ay}\right)^2}}$$

которая для точки, находящейся на оси x , существенно упрощается:

$$T = \frac{\pi m a^2}{3Q} \left(\frac{x^3}{a^3} - 3 \frac{x}{a} + 2 \right).$$

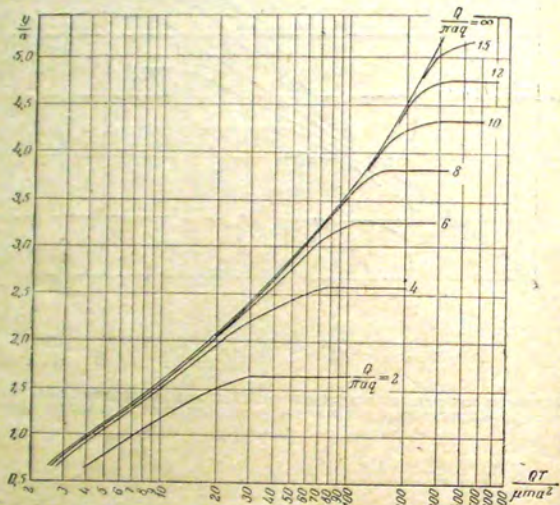


Рис. 23. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, дренирующей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=0,5 y$)

Графики на рис. 19—29 позволяют с достаточной для практических целей обоснованностью выделить зону санитарной охраны одиночного берегового водозабора, рассчитываемую на определенный заданный срок.

Пример. Для водоснабжения жилого поселка проектируется пробурить скважину в аллювиальных отложениях на расстоянии 100 м от реки (см. рис. 15).

Проектируемый дебит скважины 2000 м³/сутки. По данным гидрогеологического обследования намечаемый к использованию водоносный горизонт тесно гидравлически связан с рекой, которая его дренирует. При этом средний уклон естественного потока

(IV.2) 0,001. Средний коэффициент фильтрации аллювиальных отложений, представленных разнородными песками с гравием и галькой, 30 м/сутки. Активная пористость $\mu = 0,25$. Мощность водоносного горизонта в среднем равна 30 м.

Требуется создать вокруг скважины второй пояс санитарной охраны так, чтобы загрязнение, попавшее к подземным водам за границами этого пояса, или а) никогда вообще не могло попасть в район водозабора, или б) могло прийти не ранее, чем через год после образования за границей зоны очага загрязнения.

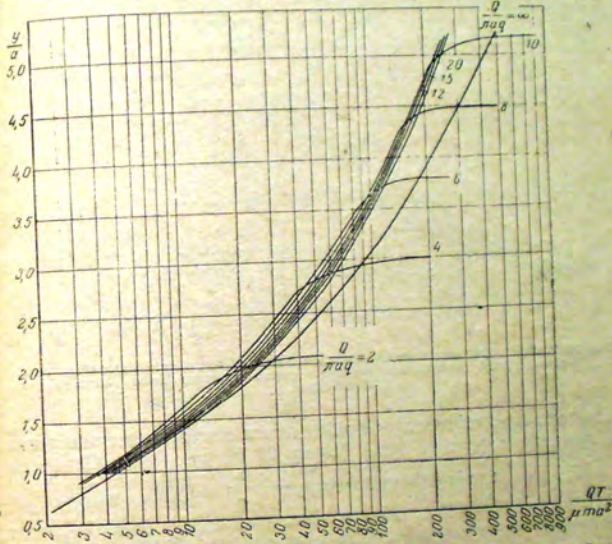


Рис. 24. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, дренирующей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=y$)

Чтобы выполнялось первое условие (а), границей второго пояса санитарной охраны должна быть так называемая нейтральная линия тока. Воспользуемся для ее построения графиками на рис. 16. Для этого определим отношение $\frac{paq'}{Q}$.

Нам дано: $Q = 2000$ м³/сутки; $a = 100$ м, $k = 30$ м/сутки; $m = 30$ м; $i = 0,001$; $q = km i = 30 \cdot 30 \cdot 0,001 = 0,9$ м/сутки.

$$\frac{Q}{paq} = \frac{2000}{3,14 \cdot 100 \cdot 0,9} = 7,1.$$

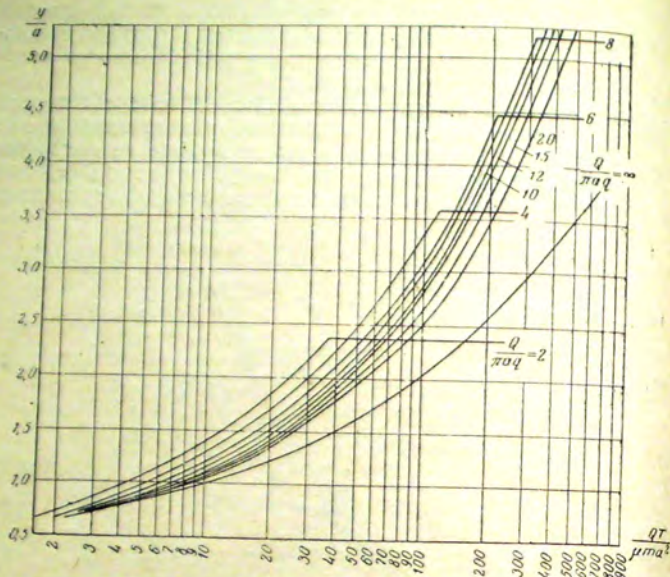


Рис. 25. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, дренирующей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=2y$)

Сначала по графику $x=0$ определяем место пересечения искомой границы с урезом реки (точку B на рис. 15). Отношение $\frac{Q}{\pi a q} = 7,1$ на графике соответствует $\frac{y}{a} = 2,50$, откуда $y = 2,5 \cdot a = 2,5 \cdot 100 = 250$ м. По графику $x=0,25y$ находим точку пересечения нейтральной линии с прямой $x=0,25y$ (точка B'). Здесь отношению $\frac{Q}{\pi a q} = 7,1$ соответствует $\frac{y}{a} = 3$, откуда $y = 300$ м и $x = 0,25 \cdot 300 = 75$ м. Аналогично находим точки пере-

сечения искомой линии с прямыми $x=0,5y$ (точка B''); $x=0,75y$ (точка B'''); $x=y$ (точка B^{IV}). Координаты этих точек соответственно будут: для точки B'' $y = 364$ м, $x = 182$ м; для точки B''' $y = 405$ м, $x = 304$ м и для точки B^{IV} $y = 427$ м, $x = 427$ м.

Построенная по найденным точкам линии $B B^{IV}$ и будет правой относительно оси x ветвью искомой границы зоны санитарной охраны.

Чтобы найти положение границы второго пояса санитарной охраны, удовлетворяющей второму условию, воспользуемся графиками

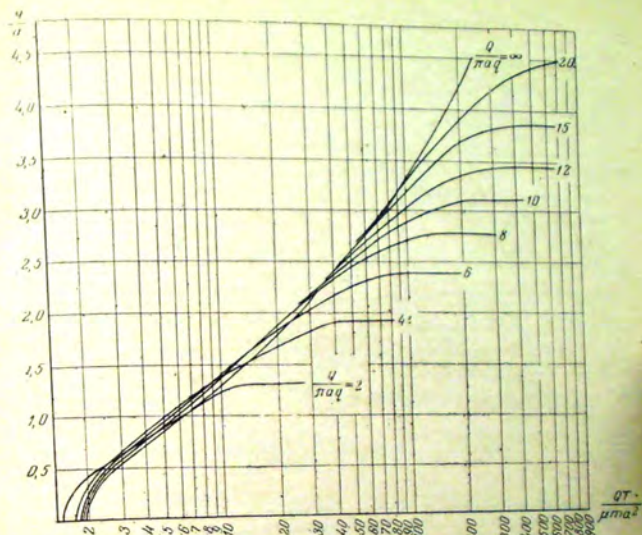


Рис. 26. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, питающей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=0$)

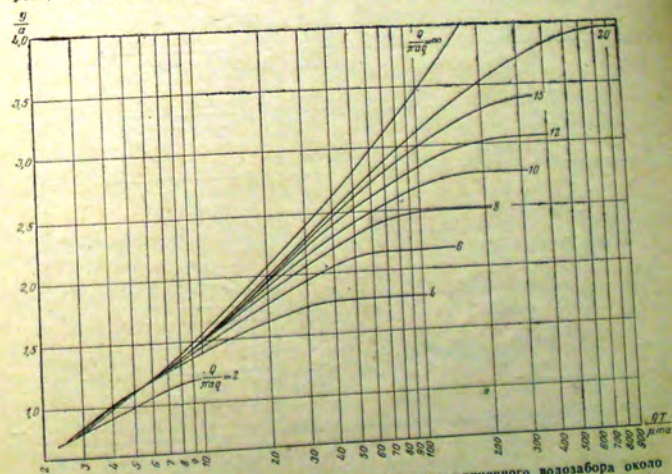


Рис. 27. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, питающей водоносный горизонт (точки границы, лежащие на прямой $x=0,5y$)

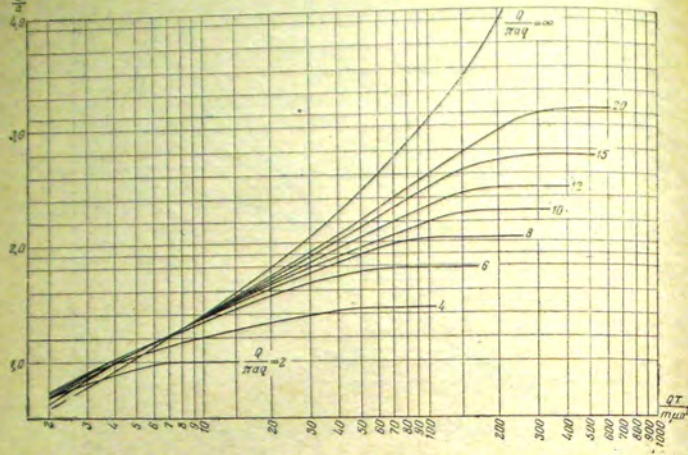


Рис. 28. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, питающей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=y$)

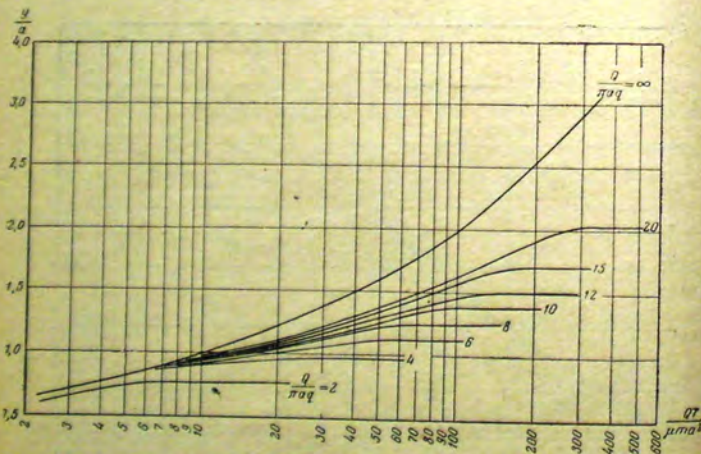


Рис. 29. Графики для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора около реки, питающей водоносный горизонт (точки границы зоны, лежащие на прямой $x=2y$)

ками на рис. 19 (или 20), 22, 23, 24 и 25. Для этого определим приведенное время $\bar{T} = \frac{QT}{\mu m a^2}$

По заданию время \bar{T} равно одному году или 365 суткам. Следовательно, $\bar{T} = \frac{2000 \cdot 365}{0,25 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 100} = 9,74$.

На рис. 19, 22—25 нет графика, соответствующего расчетному значению $\frac{Q}{\mu a q} = 7,1$.

Следовательно, при нахождении координат искомой границы второго пояса санитарной охраны понадобится интерполировать графики $\frac{Q}{\mu a q} = 6$ и $\frac{Q}{\mu a q} = 8$ на рис. 22—25 или графики $\frac{Q}{\mu a q} = 5$ и $\frac{Q}{\mu a q} = 10$ на рис. 19 (графики на рис. 20 составлены для более высоких значений приведенного времени).

Прежде всего, сравнивая заданное приведенное время $\bar{T} = 9,74$ с приведенным временем, отсекаемым графиками $\frac{Q}{\mu a q} = 5$

и $\frac{Q}{\mu a q} = 10$ на оси ординат рис. 19, равным соответственно 2,40 и 2,30, видим, что между водозабором и рекой искомой границы провести нельзя.

Выше по потоку от водозабора (см. рис. 19) приведенному времени $\bar{T} = 9,74$ для графика $\frac{Q}{\mu a q} = 5$ соответствует значение $\frac{x}{a} = 2,83$, а графику $\frac{Q}{\mu a q} = 10$ соответствует значение $\frac{x}{a} = 2,66$. Отношению $\frac{Q}{\mu a q} = 7,1$ будет, как показывает интерполяция, соответствовать $\frac{x}{a} = 2,74$, откуда точка D пересечения искомой границы с осью x будет находиться от уреза реки на расстоянии 274 м.

По графикам на рис. 22 определяем точку пересечения искомой границы с урезом реки (т. е. с осью y или, что то же самое, с прямой $x=0$). Здесь приведенному времени $\bar{T} = 9,74$ на графике $\frac{Q}{\mu a q} = 6$ соответствует $\frac{y}{a} = 1,14$, а на графике $\frac{Q}{\mu a q} = 8$ — $\frac{y}{a} = 1,18$. Следовательно, отношение $\frac{Q}{\mu a q} = 7,1$ будет соответствовать примерно $\frac{y}{a} = \frac{1,14 + 1,18}{2} = 1,16$, откуда $y = 116$ м.

Аналогично определяются по графикам на рис. 23, 24 и 25 точки пересечения искомой границы с прямыми $x=0,5y$ (точка C'), $x=y$ (точка C'') и $x=2y$ (точка C'''). Их координаты состав-

ляют: для точки $C' y = 155$ м, $x = 77,5$ м; для точки $C'' y = 150$ м, $x = 150$ м и для точки $C''' y = 115$ м, $x = 230$ м.

Линия $C'C''C'''D$, проведенная через найденные таким образом точки, и является правой относительно оси x ветвью границы зоны санитарной охраны, рассчитанной на срок, равный одному году.

Слева от оси x на рис. 15 пунктиром показаны зеркальные отображения правых ветвей искомой границы.

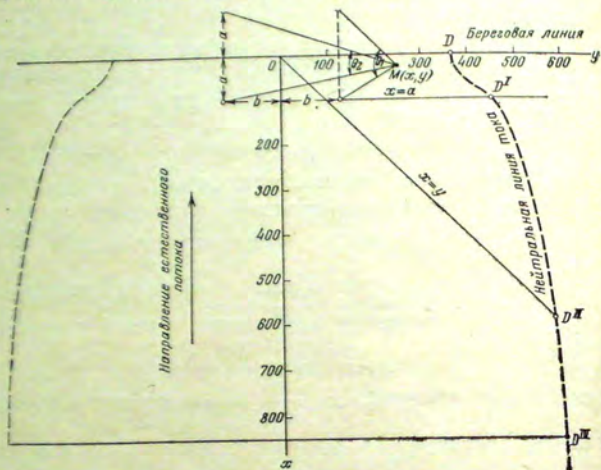


Рис. 30. Два водозабора в полуограниченном пласте и зона санитарной охраны.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ДЛЯ ДВУХ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ ВОДОЗАБОРОВ

Функция напора в фильтрационном поле двух взаимодействующих равнодебитных и равноотстоящих от контура постоянного напора водозаборов известна, и в системе координат, изображенной на рис. 30, имеет вид

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{2\pi km} \times \left[\ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y+b)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y+b)^2}} + \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y-b)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y-b)^2}} \right], \quad (IV.27)$$

где a и b — расстояния симметрично расположенных относительно оси x водозаборов соответственно от оси y и от оси x .

Дифференцируя (IV.27) по x , получим

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i - \frac{Q}{2\pi km} \left[\frac{a+x}{(a+x)^2 + (y+b)^2} + \frac{a-x}{(a-x)^2 + (y+b)^2} + \frac{a+x}{(a+x)^2 + (y-b)^2} + \frac{a-x}{(a-x)^2 + (y-b)^2} \right]. \quad (IV.28)$$

Интегрирование (IV.28) по y дает

$$\psi' = qy - \frac{Q}{2\pi} \left(\operatorname{arctg} \frac{y+b}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y+b}{a-x} + \operatorname{arctg} \frac{y-b}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y-b}{a-x} \right). \quad (IV.29)$$

Как и для всех приведенных выше случаев, вследствие полной симметрии фильтрационного поля относительно оси x рассмотрим только правую от оси область.

На рис. 30 можно видеть, что

$$\operatorname{arctg} \frac{y+b}{a+x} = \angle AA'M; \quad \operatorname{arctg} \frac{y-b}{a+x} = \angle BB'M;$$

$$\operatorname{arctg} \frac{y+b}{a-x} = \angle A'AM; \quad \operatorname{arctg} \frac{y-b}{a-x} = \angle B'BM.$$

Из условия, что сумма углов треугольника равна π , можно записать

$$\left. \begin{aligned} \angle AA'M + \angle A'AM &= \pi - \angle AMA' = \pi - \theta_1 \\ \angle BB'M + \angle B'BM &= \pi - \angle BMB' = \pi - \theta_2 \end{aligned} \right\}, \quad (IV.30)$$

где θ_1 — угол, отсчитываемый по часовой стрелке в данной точке фильтрационного поля от направления на ближайший водозабор к направлению на его отображение;

θ_2 — угол, отсчитываемый по часовой стрелке в данной точке фильтрационного поля от направления на дальний водозабор к направлению на его отображение.

Подставив значения арктангенсов из (IV.30) в выражение (IV.29), получим

$$\psi = C = qy + \frac{Q}{2\pi} (\theta_1 + \theta_2), \quad (IV.31)$$

где $\psi = \psi' + Q$.

Значение функции тока для нейтральной линии тока можно получить, определив координату y_0 точки D пересечения нейтральной линии тока с урезом реки и подставив найденное значение y_0 в уравнение (IV.31).

В точке D выполняется условие $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$, $x = 0$.

Решая выражение (IV.28) при этих условиях, получим формулу

$$y_0 = a \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} + \frac{b^2}{a^2} - 1} + \sqrt{\left(2 \frac{b^2}{a^2} + \frac{Q}{\pi a q}\right)^2 - \frac{4b^2}{a^2} \left(1 + \frac{b^2}{a^2}\right)}. \quad (\text{IV.32})$$

Учитывая, что в точке D

$$\theta_1 = 2 \arctg \frac{a}{y_0 - b} \quad \text{и} \quad \theta_2 = 2 \arctg \frac{a}{y_0 + b}, \quad (\text{IV.33})$$

функция тока для нейтральной линии тока (C_N) может быть определена из выражения

$$C_N = qy_0 + \frac{Q}{\pi} \left(\arctg \frac{a}{y_0 + b} + \arctg \frac{a}{y_0 - b} \right). \quad (\text{IV.34})$$

Так как расчеты по формулам (IV.32) и (IV.34) являются несколько громоздкими, на рис. 31 и 32 приведены графики, позволяющие по известным значениям $\frac{Q}{\pi a q}$ и $\frac{b}{a}$ определить соответ-

ственно величину отношений $\frac{y_0}{a}$ и $\frac{C_N}{aq}$.

Следует отметить, что при определенном соотношении дебита водозаборов и расстояний их от реки и один от другого возможен просок потока подземных вод к реке между водозаборами.

Поэтому рекомендуемая методика выделения зоны санитарной охраны, ограниченной нейтральной линией тока, применима при выполнении соотношения

$$\frac{Q}{\pi a q} > \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cdot \frac{b^2}{a^2}, \quad (\text{IV.35})$$

когда такой просок не будет происходить.

Если естественный поток подземных вод направлен от реки (рис. 33), знак перед «i» в выражениях (IV.27) и (IV.28) изменяется на обратный, т. е. на минус, и они приобретают вид

$$H = H_0 - ix - \frac{Q}{2\pi km} \left[\ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y+b)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y+b)^2}} + \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y-b)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y-b)^2}} \right] \quad (\text{IV.36})$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} = -i - \frac{Q}{2\pi km} \left[\frac{a+x}{(a+x)^2 + (y+b)^2} + \frac{a-x}{(a-x)^2 + (y+b)^2} + \frac{a+x}{(a+x)^2 + (y-b)^2} + \frac{a-x}{(a-x)^2 + (y-b)^2} \right]. \quad (\text{IV.37})$$

Выражение для функций тока в аналогичных выражению (IV.31) обозначениях имеет вид

$$\psi = C = \frac{Q}{2\pi} (\theta_1 + \theta_2) - qy. \quad (\text{IV.38})$$

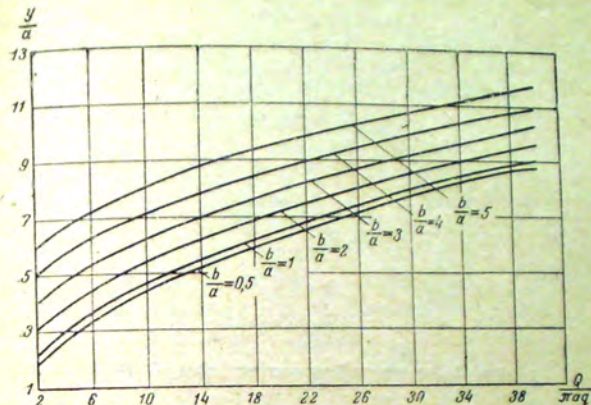


Рис. 31. Графики для определения зоны захвата из реки при потоке, направленном к реке (два водозабора около реки)

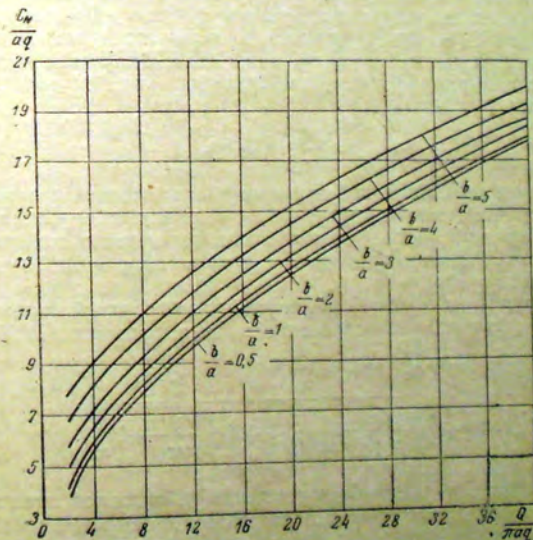


Рис. 32. Графики для определения функции тока для нейтральной линии тока в фильтрационном поле двух береговых водозаборов

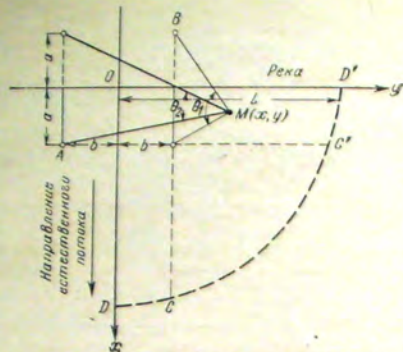


Рис. 33. Два взаимодействующих водозабора вблизи реки

Учитывая, что нейтральная линия тока в этих условиях пересекает ось x ниже водозабора по потоку и что в точке пересечения $y=0$ углы θ_1 и θ_2 обращаются в нуль, определяем значение функции тока для нейтральной линии тока. Она равна нулю.

Следовательно, уравнение нейтральной линии тока будет иметь вид

$$y = \frac{Q}{2\pi q} (\theta_1 + \theta_2). \quad (IV.39)$$

Построение нейтральной линии тока относительно просто лишь в случае естественного потока подземных вод, направленного от реки. Для этого определяются точки пересечения нейтральной линии тока с осями координат (т. е. с прямыми $y=0$ и $x=0$) и с прямыми $x=a$ и $y=b$.

Координата x точки D пересечения нейтральной линии тока с осью x (см. рис. 33) определяется из выражения (IV.37) при условии, что здесь $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ и $y=0$

$$x = a \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - \frac{b^2}{a^2} + 1} + \sqrt{\frac{Q}{\pi a q} - 4 \frac{b^2}{a^2}}. \quad (IV.40)$$

Координата y_0 точки D' пересечения нейтральной линии тока с урезом реки, т. е. с осью y , определяется из выражения (IV.39) при подстановке в него значений θ_1 и θ_2 из выражения (IV.33)

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi q}{Q} y_0 \right) = \frac{2ay_0}{y_0^2 - b^2 - a^2}. \quad (IV.41)$$

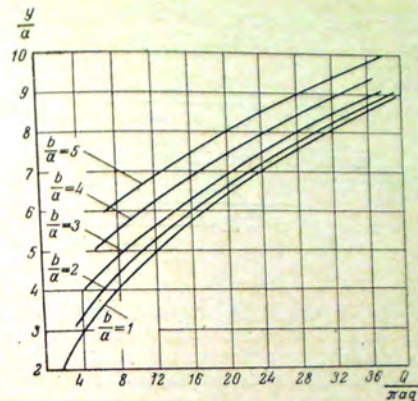


Рис. 34. Графики для определения зоны захвата из реки двумя взаимодействующими водозаборами (естественный поток направлен от реки)

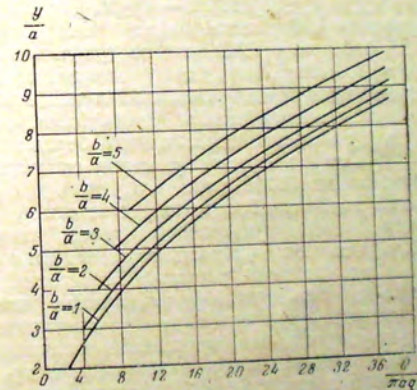


Рис. 35. Графики для определения точки пересечения нейтральной линии тока с продолжением линии, соединяющей два водозабора вблизи реки (поток направлен от реки)

Так как выражение (IV.41) решается только подбором, на рис. 34 приведены графики, позволяющие определить y_0 по известным значениям отношений $\frac{Q}{\pi a q}$ и $\frac{b}{a}$. Координата y точки C' пересечения нейтральной линии тока

с прямой $x = a$, т. е. с продолжением линии, соединяющей водозаборы (см. рис. 33), определяется по графикам на рис. 35, построенным по формуле

$$\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi q}{Q} y\right) = \frac{4ay}{y^2 - b^2 - 4a^2}. \quad (\text{IV.42})$$

Координата x точки C пересечения нейтральной линии тока с прямой $y = b$ определяется по формуле

$$x = \sqrt{a^2 - 4b^2 + \frac{4ab}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi bq}{Q}\right)}}. \quad (\text{IV.43})$$

Выражения (IV.42) и (IV.43) получены из уравнения (IV.39) при подстановке в него известных значений координат x или y .

Построение нейтральной линии тока для случая естественного потока, направленного к реке, аналитическим путем является весьма трудоемкой операцией.

Поэтому на рис. 36 и 37 приводятся графики, позволяющие найти точки пересечения нейтральной линии тока с продолжением линии, соединяющей водозаборы (см. рис. 36) и с биссектрисой координатного угла, т. е. с прямой $x = y$ (см. рис. 37).

Точка пересечения нейтральной линии тока с урезом реки определяется по формуле (IV.32) или по графикам на рис. 31.

Пример. Водоснабжение химического завода, амортизационный срок которого принимается равным 25 годам, проектируется осуществлять двумя равнодебитными скважинами, расположенными вблизи реки на линии, параллельной береговой линии и проходящей в 100 м от нее. Расстояние между скважинами 250 м. Дебит каждой скважины 1000 м³/сутки.

Аллювиальный водоносный горизонт, сложенный крупнозернистыми песками с гравием и галькой, тесно гидравлически связан с рекой. Средняя его мощность 50 м, коэффициент фильтрации 25 м/сутки и активная пористость 0,25. Естественный поток направлен к реке и имеет средний уклон зеркала равный 0,0005.

Требуется выделить около скважин зону санитарной охраны, удовлетворяющую условию, что загрязнение, попавшее за ее границы, никогда не придет в район скважин, т. е. требуется построить нейтральную линию тока в фильтрационном поле водозабора.

По условию примера дано:

$Q = 1000 \text{ м}^3/\text{сутки}$; $k = 25 \text{ м/сутки}$; $m = 50 \text{ м}$; $\mu = 0,25$; $a = 100 \text{ м}$; $2b = 250 \text{ м}$; $i = 0,0005$; $q = kmi = 50 \cdot 25 \cdot 0,0005 = 0,625 \text{ м}^2/\text{сутки}$.

Построение нейтральной линии производим по точкам ее пересечения с береговой линией (графики на рис. 31), с продолжением линии, соединяющей водозаборы (графики на рис. 36) и с биссектрисой координатного угла (графики на рис. 37).

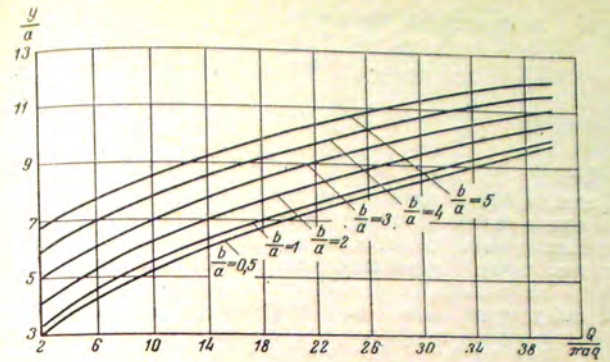


Рис. 36. Графики для определения точек пересечения нейтральной линии тока с продолжением линии, соединяющей водозаборы около реки (два водозабора, естественный поток направлен к реке)

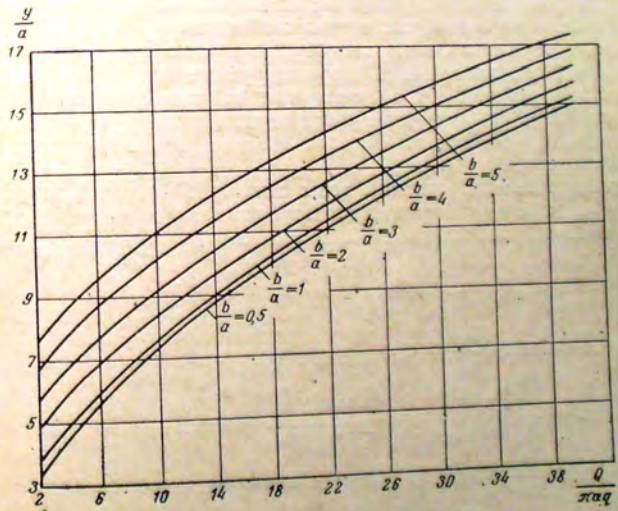


Рис. 37. Графики для определения точки пересечения нейтральной линии тока с биссектрисой координатного угла (два водозабора около реки, естественный поток направлен к реке)

Для этого определяем отношение

$$\frac{Q}{\text{паq}} = \frac{1000}{3,14 \cdot 100 \cdot 0,625} = 5,1; \quad \frac{b}{a} = \frac{125}{100} = 1,25.$$

Значениям $\frac{Q}{\text{паq}} = 5,1$ и $\frac{b}{a} = 1,25$ на рис. 31, 36 и 37 соот-
ветствуют значения $\frac{y_0}{a} = 3,65$, $\frac{y}{a} = 4,5$ и $\frac{y}{a} = 5,8$.

Следовательно, координата y_0 точки пересечения нейтральной линии тока с береговой линией (точка D на рис. 30) равна 365 м, координата y точки пересечения нейтральной линии тока с продолжением линии, соединяющей водозаборы, т. е. с прямой $x = a$ (точка D' на рис. 30), равна 450 м и координата y точки пересечения нейтральной линии тока с биссектрисой координатного угла, т. е. с прямой $x = y$ (точка D'' на рис. 30), равна 580 м.

По графику $\frac{b}{a} = 1,25$ на рис. 32 получаем, что отношению $\frac{Q}{\text{паq}} = 5,1$ соответствует значение $\frac{C_N}{aq} = 7,0$. Следовательно, на большом удалении от реки (при $x \rightarrow \infty$) предельное значение координаты y нейтральной линии тока (ширина зоны захвата вправо от оси x) равно 700 м.

Линия $DD'D''D'''$ на рис. 30 является правой ветвью искомой границы зоны санитарной охраны. Левая ветвь будет зеркальным относительно оси x отображением правой ветви.

Чтобы ограничить зону санитарной охраны вверх по потоку от водозабора, заменяем две проектируемые скважины одной скважиной, работающей с суммарным дебитом этих скважин и располагающейся посередине между ними, т. е. на оси x в расстоянии 100 м от береговой линии. Это дает большой «запас надежности» зоны.

Для определения границы зоны санитарной охраны вверх по потоку от такой скважины воспользуемся графиками на рис. 20.

Для этого определим приведенное время $\bar{T} = \frac{Q_{\text{сум}} \cdot T}{\mu \text{та}^2}$ и отношение $\frac{Q_{\text{сум}}}{\text{паq}}$

$$\frac{Q_{\text{сум}} T}{\mu \text{та}^2} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot 9000}{0,25 \cdot 50 \cdot 100 \cdot 100} = 144,$$

$$\frac{Q_{\text{сум}}}{\text{паq}} = \frac{2 \cdot 1000}{3,14 \cdot 100 \cdot 0,625} = 10,2.$$

Графику $\frac{Q}{\text{паq}} = 10,2$ и приведенному времени $\bar{T} = 144$ соот-
ветствует значение $\frac{x}{a} = 8,5$.

Следовательно, $x = 850$ м.

На рис. 30 показана построенная по полученным координатам зона санитарной охраны.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ДЛЯ ЛИНЕЙНОГО ВОДОЗАБОРА

Если систему координат принять такой, какой она показана на рис. 38, то функция напора в фильтрационном поле линейного ряда конечного числа взаимодействующих равнодебитных сква-

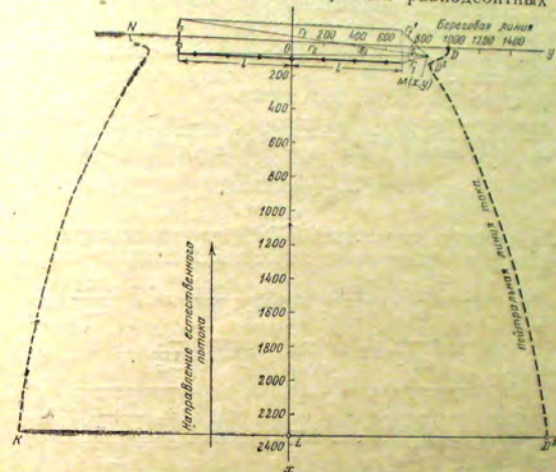


Рис. 38. Линейный береговой водозабор и зона санитарной охраны.

жин, расположенных параллельно контуру постоянного напора, будет иметь вид

$$H = H_0 + ix - \frac{Q}{4\pi kml} \left[(y+l) \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y+l)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y+l)^2}} - (y-l) \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y-l)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y-l)^2}} + (a+x) \times \right. \\ \left. \times \left(\arctg \frac{y+l}{a+x} - \arctg \frac{y-l}{a+x} \right) - (a-x) \times \right. \\ \left. \times \left(\arctg \frac{y+l}{a-x} - \arctg \frac{y-l}{a-x} \right) \right]. \quad (IV.44)$$

Выражение (IV.44) получено наложением течений точечных стоков, образующих линейный ряд, расход которого принимается равномерно распределенным по его длине.

Понижение уровня в точке M с координатами x и y , вызванное элементом длиной $d\xi$, принимаемым точечным стоком, выразится уравнением

$$\delta S = \frac{Qd\xi}{4\pi kml} \ln \frac{\sqrt{(a+x)^2 + (y-\xi)^2}}{\sqrt{(a-x)^2 + (y-\xi)^2}}. \quad (IV.45)$$

Интегрирование правой части этого уравнения в пределах от $-l$ до l приводит к выражению для определения понижения уровня в любой точке фильтрационного поля (третий член в правой части выражения IV.44). Это выражение получено В. М. Шестаковым (1956).

Дифференцируя (IV.44) по x , имеем

$$\frac{\partial H}{\partial x} = i - \frac{Q}{4\pi kml} \left(\operatorname{arctg} \frac{y+l}{a+x} - \operatorname{arctg} \frac{y-l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y+l}{a-x} - \operatorname{arctg} \frac{y-l}{a-x} \right). \quad (IV.46)$$

Интегрирование выражения (IV.46) по y дает выражение для функций тока в фильтрационном поле линейного водозабора

$$\begin{aligned} \psi' = qy - \frac{Q(a+x)}{4\pi l} \left[\frac{y+l}{a+x} \left(\operatorname{arctg} \frac{y+l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y+l}{a-x} \right) - \right. \\ \left. - \frac{y-l}{a+x} \left(\operatorname{arctg} \frac{y-l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y-l}{a-x} \right) - \right. \\ \left. - \ln \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{y+l}{a+x} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{y-l}{a+x} \right)^2}} - \frac{a-x}{a+x} \ln \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{y+l}{a-x} \right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{y-l}{a-x} \right)^2}} \right]. \quad (IV.47) \end{aligned}$$

Выражение (IV.47) может быть записано и несколько иначе. На рис. 38 видно, что

$$\operatorname{arctg} \frac{y+l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y+l}{a-x} = \pi - \theta_2 \quad \text{и} \quad (IV.48)$$

$$\operatorname{arctg} \frac{y-l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{y-l}{a-x} = \pi - \theta_1. \quad (IV.49)$$

(Углы $\theta_{1,2}$ в данной точке линии тока отсчитываются по часовой стрелке от направления на концы линейного ряда к направлению на соответствующие концы отображенного ряда.)

Подставив эти значения сумм арктангенсов в уравнение (IV.47) и произведя простейшие преобразования, получим

$$\begin{aligned} \psi = C = qy + \frac{Q(a+x)}{4\pi l} \left[\frac{a-x}{a+x} \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_2}{r_1} \right] - \\ - \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{y}{l} (\theta_1 - \theta_2) - (\theta_1 + \theta_2) \right], \quad (IV.50) \end{aligned}$$

где $\psi = \frac{Q}{2} + \psi'$, а все остальные обозначения показаны на рис. 38.

Чтобы получить значение функции тока для нейтральной линии тока (C_N), определим местоположение точки ее пересечения с береговой линией (точка D на рис. 38). В этой точке $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$ и $x = 0$.

Подставив эти условия в уравнение (IV.46) и разрешив его относительно y , получим:

$$y_0 = L = \sqrt{l^2 - a^2 + \frac{2al}{\operatorname{tg} \left(\frac{2\pi ql}{Q} \right)}}. \quad (IV.51)$$

В точке D $x = 0$, $\theta_1 = 2 \operatorname{arctg} \frac{a}{L-l}$ и $\theta_2 = 2 \operatorname{arctg} \frac{a}{L+l}$. Подставляя эти значения координат в уравнение (IV.50) и проведя некоторые преобразования, получим искомое значение функции тока

$$C_N = \frac{Qa}{2\pi l} \left[\ln \frac{\sqrt{(L+l)^2 + a^2}}{\sqrt{(L-l)^2 + a^2}} + \frac{l}{a} \operatorname{arctg} \frac{\frac{l}{a} \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi ql}{Q} \right)}{\frac{l}{a} - \operatorname{tg} \left(\frac{2\pi ql}{Q} \right)} \right]. \quad (IV.52)$$

По формуле (IV.52) составлены графики (рис. 39), позволяющие по известным отношениям $\frac{Q}{2\pi ql}$ и $\frac{l}{a}$ определить значение C_N .

Как и для других рассмотренных выше водозаборов, когда боковыми границами зоны санитарной охраны являются ветви нейтральной линии тока, граница зоны вверх по потоку рассчитывается на какой-либо определенный срок. Способ определения расстояния этой границы от водозабора будет показан несколько позже. Здесь лишь отметим, что построение ветвей нейтральной линии тока, когда подземные воды в естественных условиях движутся к береговой линии, производится по трем точкам.

Помимо точки пересечения нейтральной линии тока с береговой линией, координата которой y_0 определяется по формуле (IV.51), можно определить еще точку пересечения нейтральной линии тока с продолжением линейного ряда (точка D' на рис. 38) по графикам на рис. 40, построенным по уравнению (IV.47) при подстановке в него значений $\psi = C_N$ и $x = a$ после некоторого графического подбора.

Третья точка находится в пересечении нейтральной линии тока с границей зоны вверх по потоку, рассчитанной на определенный срок (точка D'' на рис. 38). Координата y этой точки может быть с определенным «запасом прочности» найдена по графикам на рис. 39. При этом допускается, что в точке D'' ширина захвата нейтральной линией естественного потока, движущейся

щегося со стороны водораздела, станет максимальной и равной отношению $\frac{C_N}{q}$, так как функция тока C_N для его нейтральной линии интерпретируется как расход, притекающий к водозабору со стороны водораздела между осью x и нейтральной линией тока.

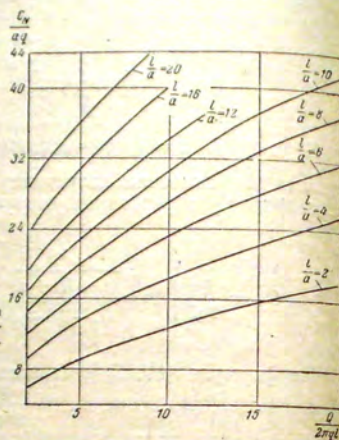


Рис. 39. Графики для определения функции тока C_N для нейтральной линии тока в фильтрационном поле берегового линейного водозабора

Если поток подземных вод в естественных условиях направлен от береговой линии (рис. 41), знак перед i в выражениях (IV.44) и (IV.46) будет обратным, т. е. минус, и выражение для функций тока примет вид

$$\psi = C = -qy + \frac{Q(a+x)}{4\pi l} \left[\frac{a-x}{a+x} \ln \frac{r_2}{r_1} + \ln \frac{r_1'}{r_1'} \right] - \frac{Q}{4\pi} \left[\frac{y}{l} (\theta_1 - \theta_2) - (\theta_1 + \theta_2) \right]. \quad (IV.53)$$

Чтобы определить значение функции тока для нейтральной линии тока, рассмотрим точку B в пересечении оси x с нейтральной линией тока. Здесь выполняются условия:

$$y = 0; \quad \theta_1 = \theta_2; \quad r_1 = r_2; \quad r_1' = r_2'. \quad (IV.54)$$

При подстановке этих значений в правую часть уравнения (IV.53) последнее обращается в нуль. Следовательно, если естественный поток подземных вод направлен от береговой линии, функция тока для нейтральной линии тока равна нулю.

Положение точки B на оси x определится из условия, что в ней $\frac{\partial H}{\partial x} = 0$, и $y = 0$.

Учитывая эти условия и знак минус перед i в выражении (IV.46), разрешаем последнее относительно x :

$$x = \sqrt{a^2 - l^2 + \frac{2al}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi ql}{Q}\right)}}. \quad (IV.55)$$

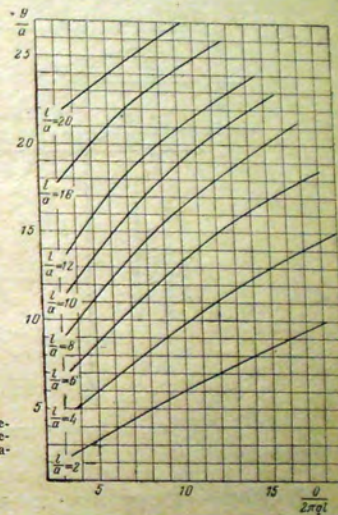


Рис. 40. Графики для определения точек пересечения нейтральной линии тока с продолжением линейного ряда около реки (поток направлен к реке)

Точка пересечения нейтральной линии тока с береговой линией (точка D на рис. 41) определится из условия, что в этой точке имеют место соотношения

$$x = 0; \quad \theta_1 = 2\operatorname{arctg} \frac{a}{y_0 - l}; \quad \theta_2 = 2\operatorname{arctg} \frac{a}{y_0 + l}; \quad r_1 = r_1' \quad \text{и} \quad r_2 = r_2'. \quad (IV.56)$$

Подставив эти соотношения в уравнение (IV.53) и суммируя арктангенсы с учетом того, что в данном случае $\psi = 0$, получим

$$\frac{2\pi ql}{Q} = \frac{a}{y_0} \left[\ln \frac{\sqrt{(y_0 + l)^2 + a^2}}{\sqrt{(y_0 - l)^2 + a^2}} - \frac{y_0}{a} \operatorname{arctg} \times \right]$$

$$\times \left[\left(\frac{2al}{y_0'^2 - l^2 + a^2} \right) + \frac{l}{a} \operatorname{arctg} \left(\frac{2ay_0'}{y_0'^2 - l^2 + a^2} \right) \right] \quad (IV.57)$$

По выражению (IV.57) составлены графики (рис. 42), позволяющие по известным значениям отношений $\frac{Q}{2\pi ql}$ и $\frac{l}{a}$ определить величину $\frac{y_0'}{a} = \frac{L'}{a}$, а значит, и ширину зоны захвата из реки при движении естественного потока от береговой линии.

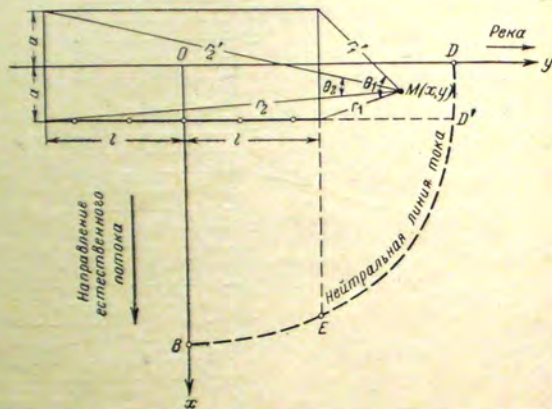


Рис. 41. Линейный ряд скважин вблизи реки

Построение нейтральной линии тока в этих условиях может быть произведено по четырем точкам.

Две точки лежат на пересечении нейтральной линии тока с осями координат и определяются, как уже показывалось выше, на оси x (точка B на рис. 41) по формуле (IV.55), а на оси y (точка D на рис. 41) по графикам на рис. 42.

Из двух других точек одна (D') лежит на пересечении нейтральной линии тока с продолжением линейного ряда, а вторая (E) — на пересечении нейтральной линии тока с прямой $y=l$, т. е. с линией, проходящей через конец ряда перпендикулярно береговой линии. Координата y точки D' определяется по графикам на рис. 43 (координата x известна: $x=a$). Координата x точки E определяется по графикам на рис. 44.

Графики на рис. 43 и 44 построены по уравнению (IV.53), в котором углы θ выражены через арктангенсы, разрешенному относительно соответствующих точек при $\psi = 0$.

Установление связи между местоположением частицы жидкости и временем ее прихода к водозабору, необходимое для выделения зон санитарной охраны, рассчитываемых на определенный срок, представляет в рассматриваемом случае линейного ряда скважин около реки большие трудности. Поэтому ниже рассматривается лишь способ определения времени прихода к водозабору частицы жидкости, располагающейся на оси x , т. е. выше и

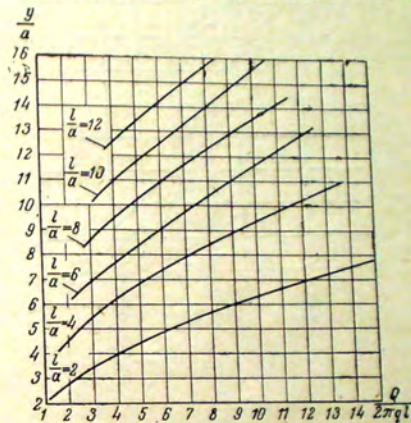


Рис. 42. Графики для определения зоны захвата из реки линейным рядом скважин (естественный поток направлен от реки)

ниже по потоку от линейного ряда. Скорость движения частицы в любой точке по оси x при направлении естественного потока к реке определится из выражения

$$v_x = \pm \left[\frac{Q}{2\pi ml} \left(\operatorname{arctg} \frac{l}{a+x} + \operatorname{arctg} \frac{l}{a-x} \right) - \frac{k}{\mu} i \right], \quad (IV.58)$$

полученного из уравнения (II.4) при подстановке в него значения $\frac{\partial H}{\partial x}$ из выражения (IV.46), в котором принято $y=0$.

Знак перед правой частью выражения (IV.58) определяется положением данной точки по отношению к линейному ряду. Если точка находится ближе к береговой линии, чем скважины ряда, ставится знак плюс, если дальше — знак минус.

В зависимости от этого выражение (IV.58) может быть записано и иначе:

а) при нахождении точки выше по потоку от линейного ряда, т. е. дальше от береговой линии

$$v_x = \frac{Q}{2\pi ml} \theta + \frac{k}{\mu} i; \quad (IV.59)$$

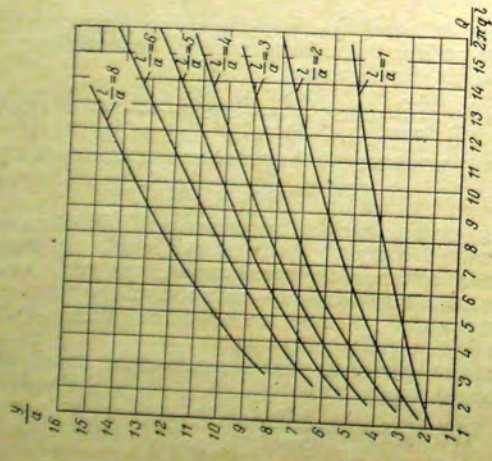


Рис. 43. Графики для определения точек пересечения нейтральной линии с продолжением линейного ряда естественный поток направлен от реки)

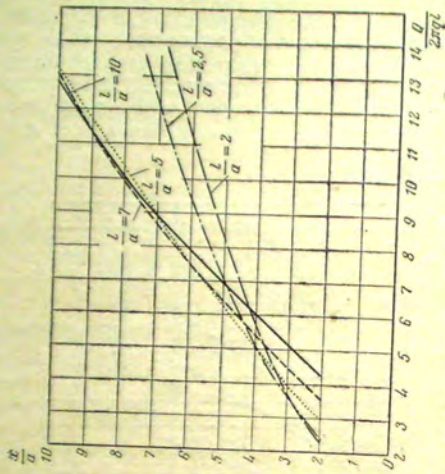


Рис. 44. Графики для определения точек пересечения нейтральной линии тока с прямой $y=1$ (естественный поток направлен от реки)

б) при нахождении точки ниже по потоку от линейного ряда, т. е. ближе к береговой линии

$$v_x = \frac{Q}{2\pi\mu ml} (\pi - \theta) - \frac{k}{\mu} i, \quad (\text{IV.60})$$

где θ — угол, образованный в данной точке оси x направлением на какой-либо из концов ряда и на его отображение (при $\frac{l}{a} > 1$ угол θ всегда меньше $\frac{\pi}{2}$, т. е. он всегда отсчитывается по кратчайшему направлению).

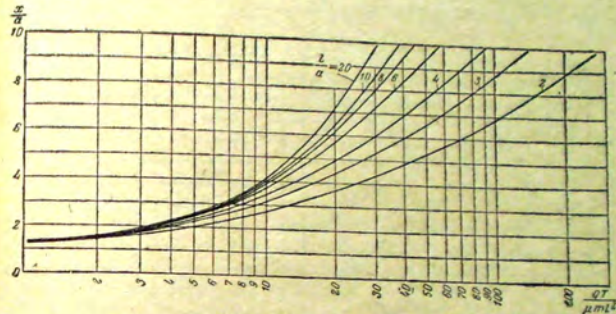


Рис. 45. Графики для определения границ зоны санитарной охраны линейного берегового водозабора (точки на оси x в сторону водораздела)

Если естественный поток подземных вод направлен от реки, все приведенные выше выражения для скорости остаются справедливыми, но знак перед последним членом правой части ($\frac{k}{\mu} i$) повсюду меняется на обратный.

Для сравнительно точного определения времени прихода частицы жидкости из данной точки к водозабору по оси x расстояние между этой точкой и линейным рядом разбивается на конечное число отрезков, и искомое время определяется методом «прослеживания».

Для выделения зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, требуется, как уже отмечалось, решить обратную задачу — по заданному времени определить расстояние, которое за это время пройдет частица жидкости в фильтрационном поле водозабора.

С достаточной для практических целей надежностью расстояния границ этой зоны вверх (d_1) и вниз (d_2) по потоку от водозабора можно определить из выражений:

а) для участка выше водозабора по потоку, т. е. дальше от береговой линии,

$$\frac{d_1}{a} = \frac{x_1}{a} - 1 + \frac{qT}{\mu m a}; \quad (IV.61)$$

б) для участка ниже водозабора по потоку, т. е. между водозабором и береговой линией (с определенным «запасом надежности»),

$$\frac{d_2}{a} = 1 - \frac{x_2}{a}. \quad (IV.62)$$

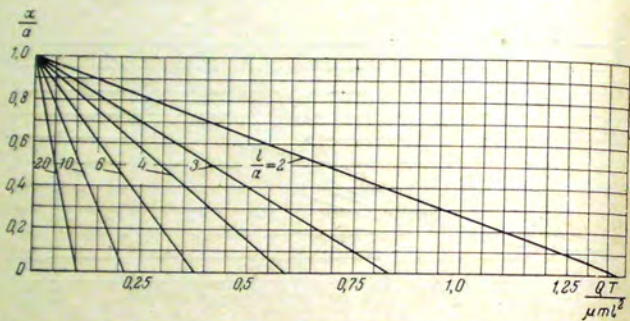


Рис. 46. Графики для определения границ зоны санитарной охраны линейного водозабора (точки на оси x между рекой и водозабором)

Значения величины $\frac{x_1}{a}$ в выражении (IV.61) снимаются с графиков на рис. 45, построенных в результате численного интегрирования интеграла

$$\frac{QT}{\mu m l^2} = 2\pi \frac{a}{l} \int_0^{\frac{x}{a}} \frac{d\left(\frac{x}{a}\right)}{\arctg\left(\frac{2\frac{l}{a}}{\frac{l^2}{a^2} + \frac{x^2}{a^2} - 1}\right)}. \quad (IV.63)$$

Значения величины $\frac{x_2}{a}$ в выражении (IV.62) снимаются с графиков на рис. 46, построенных в результате численного интегрирования интеграла

$$\frac{QT}{\mu m l^2} = 2\pi \frac{a}{l} \int_1^{\frac{x}{a}} \frac{d\left(\frac{x}{a}\right)}{\pi - \arctg\left(\frac{2\frac{l}{a}}{\frac{l^2}{a^2} + \frac{x^2}{a^2} - 1}\right)}. \quad (IV.64)$$

Оба интеграла получены в соответствии с уравнением (II.6), в которое представлены значения v_x из выражения (IV.58), взятые для условий бассейна (когда член $\frac{k}{\mu} i = 0$).

В качестве боковых границ зоны санитарной охраны целесообразно брать нейтральную линию тока. Если зона рассчитывается на заданный срок, это всегда даст определенный «запас надежности».

Пример. Хозяйственно-питьевое водоснабжение металлургического комбината и жилого поселка проектируется осуществлять водозабором, выполненным в виде линейного ряда скважин, расположенных вдоль реки на среднем расстоянии от нее 100 м. Водозабор состоит из семи скважин, отстоящих одна от другой на расстоянии 200 м. Дебит каждой скважины 2500 м³/сутки. Намеченный к эксплуатации аллювиальный водоносный горизонт представлен крупнозернистыми песками с гравием и галькой. Гидравлическая связь подземных вод с поверхностными хорошая. Коэффициент фильтрации аллювия 50 м/сутки, средняя мощность 40 м и средняя водоотдача 0,20.

Река дренирует подземные воды. Уклон естественного потока в направлении к реке 0,0005. Правобережная часть долины, в пределах которой проектируется водозабор, имеет ширину до 6 км и переходит далее в карбонатные коренные породы, характеризующиеся хорошей водопроницаемостью.

Требуется рассчитать границы второго пояса санитарной охраны, ближе которых в пределах долины недопустимо возникновение очагов загрязнения, чтобы обеспечить сохранение качества откачиваемой воды не менее чем на 30 лет, т. е. на 10 800 суток.

По условиям примера дано:
 $Q = 7 \cdot 2500 = 17\,500 \text{ м}^3/\text{сутки}$; $k = 50 \text{ м/сутки}$; $m = 40 \text{ м}$; $\mu = 0,20$;
 $n = 7 \text{ скв.}$; $2\sigma = 200$; $i = 0,0005$; $l = \sigma \cdot n = 100 \cdot 7 = 700 \text{ м}$; $a = 100 \text{ м}$; $q = km i = 50 \cdot 40 \cdot 0,0005 = 1,0 \text{ м}^2/\text{сутки}$; $T = 10\,800 \text{ суток}$.

По условиям залегания рассматриваемый горизонт является полуограниченным пластом с контуром постоянного напора.

Боковыми границами искомой зоны должны явиться симметричные относительно оси x ветви нейтральной линии тока.

Координату y_0 точки пересечения нейтральной линии тока с береговой линией (точка D) определяем по формуле (IV.51)

Номера формул и графиков, предлагаемых для расчета и выделения зон санитарной охраны водозаборов, работающих в условиях полуограниченного пласта

$$y_0 = \sqrt{l^2 - a^2 + \frac{2al}{\operatorname{tg}\left(\frac{2\pi ql}{Q}\right)}} =$$

$$= \sqrt{700^2 - 100^2 + \frac{2 \cdot 100 \cdot 700}{\operatorname{tg}\left(\frac{6,28 \cdot 1 \cdot 700}{17500}\right)}} =$$

$$= \sqrt{48 \cdot 10^4 + \frac{14 \cdot 10^4}{0,256}} = 1000 \text{ м.}$$

Координату y точки пересечения нейтральной линии тока с продолжением линейного ряда (точка D') определяем по графикам на рис. 40. Для этого определяем отношения $\frac{Q}{2\pi ql}$ и $\frac{l}{a}$

$$\frac{Q}{2\pi ql} = \frac{17500}{6,28 \cdot 1 \cdot 700} = 4,0; \quad \frac{l}{a} = \frac{700}{100} = 7,0,$$

На рис. 40 нет графика $\frac{l}{a} = 7,0$. Поэтому соответствующее значение $\frac{y}{a}$ определяем интерполяцией графиков $\frac{l}{a} = 6$ и $\frac{l}{a} = 8$. Значение $\frac{Q}{2\pi ql} = 4,0$ на графике $\frac{l}{a} = 6$ соответствует $\frac{y}{a} = 7,7$, а на графике $\frac{l}{a} = 8 - \frac{y}{a} = 10,0$.

Следовательно, искомое значение $\frac{y}{a} = \frac{7,7 + 10}{2} = 8,85$, откуда $y = 885 \text{ м.}$

Чтобы найти третью точку нейтральной линии тока, находим сначала координату $y = \frac{C_N}{q}$, определяемую по графикам на рис. 39 после интерполяции $\frac{l}{a} = 6$ и $\frac{l}{a} = 8$.

Графику $\frac{l}{a} = 6$ соответствует значение $\frac{y}{a} = \frac{C_N}{a} = 15$, а графику $\frac{l}{a} = 8 -$ значение 18. Искомое значение $\frac{y}{a} = \frac{15 + 18}{2} = 16,5$, откуда $y = 16,5 \cdot 100 = 1650 \text{ м.}$

Чтобы найти координату x третьей точки нейтральной линии тока, найдем границу зоны вверх по потоку от водозабора. Она определяется по формуле (IV.61), в которой значение $\frac{x_1}{a}$ снимается с графиков на рис. 45.

Для этого определяем предварительно приведенное время

$$\bar{T} = \frac{QT}{\mu l^2} = \frac{17500 \cdot 10800}{0,2 \cdot 40 \cdot 700 \cdot 700} = 48,2.$$

Характер водозабора	Характер операции	Номера формул			Номера рисунков с графиками	
		естественный поток направлен к береговой линии	естественный поток направлен от береговой линии	условия естественна	естественный поток направлен к береговой линии	естественный поток направлен от береговой линии
Одиночный	Построение нейтральной линии тока	(IV. 8), (IV. 10)	(IV. 15), (IV. 16)	—	16	18
	Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	(IV. 17), (IV. 18)	(IV. 19), (IV. 20)	(IV. 25), (IV. 26)	19, 20, 22, 23, 24, 25	21, 26, 27, 28, 29
Два взаимодействующих	Построение нейтральной линии тока	(IV. 32)	(IV. 40) — (IV. 43)	—	31, 32, 36, 37	34, 35
	Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	—	—	—	—	—
Линейный	Построение нейтральной линии тока	(IV. 51), (IV. 52)	(IV. 55), (IV. 57)	—	39, 40	42, 43, 44
	Выделение границ зоны, рассчитываемой на определенный срок	—	—	—	45, 46	—

По значению приведенного времени $T = 48,2$ и по отношению $\frac{l}{a} = 7$ интерполяцией $\frac{l}{a} = 6$ и $\frac{l}{a} = 8$ на рис. 45 определяем значение $\frac{x_1}{a} = 9,8$.

Подставив полученное значение $\frac{x_1}{a}$ в формулу (IV.61), определяем искомое расстояние d_1 от водозабора до границы зоны санитарной охраны

$$\frac{d_1}{a} = 9,8 - 1 + \frac{1,0 \cdot 10800}{0,2 \cdot 40 \cdot 100} = 8,8 + 13,5 = 22,3,$$

откуда $d_1 = 2230$ м.

Таким образом, третья точка нейтральной линии тока (точка D'') имеет координаты $x = 2230 + 100 = 2330$ м и $y = 1650$ м.

Границу зоны между водозабором и береговой линией провести нельзя, так как воды реки, как это видно из графиков на рис. 46, уже через 2—3 месяца подтянутся скважинами водозабора.

На рис. 38 показана построенная по рассчитанным точкам зона санитарной охраны (линия $DD'D''LKN$).

Номера формул и графиков для расчета зон санитарной охраны водозаборов в условиях полуограниченного пласта сведены в таблицу 4.

Глава 5

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ, ОТЛИЧНЫХ ОТ РАССМОТРЕННЫХ В ГЛАВАХ 3 И 4

В настоящей главе рассматривается методика выделения зон санитарной охраны для разного типа водозаборов, работающих в различных гидрогеологических условиях как простых, так и сложных. Эти водозаборы могут быть равнодебитными и разнодебитными, располагаться по одной линии или произвольно, вводиться в действие одновременно или в разные сроки.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ОДИНОЧНОГО ЛИНЕЙНОГО ВОДОЗАБОРА ПРИ НАЛИЧИИ НЕПРОНИЦАЕМОЙ ГРАНИЦЫ

Выше уже была описана методика выделения зон санитарной охраны одиночного и линейного водозаборов, работающих в условиях неограниченного и полуограниченного (с контуром постоянного напора) пластов.

В настоящем разделе приводятся рекомендации о том, как использовать описанные выше методы выделения зон санитарной охраны для других граничных условий, а именно: условий полуограниченного (с непроницаемым контуром) пласта (см. рис. 2, а) и для пласта-квадранта, на одной границе которого соблюдается условие постоянства напора, а другая является непроницаемой (см. рис. 2, в).

Если сравнить фильтрационное поле одиночного водозабора, работающего в условиях полуограниченного с непроницаемым контуром пласта на расстоянии a от него, с фильтрационным полем двух равных ему по дебиту водозаборов, работающих в условиях неограниченного пласта и расположенных на расстоянии $2a$ один от другого, то можно видеть, что первое фильтрационное поле совершенно подобно каждой симметричной относительно оси x половине второго фильтрационного поля.

Поэтому описанная выше методика выделения зон санитарной охраны для двух равнодебитных водозаборов, независимо от того, будет ли границей зоны нейтральная линия тока или эта граница рассчитывается на определенный срок, без всяких изменений применима и для выделения зон санитарной охраны одиночного водозабора, работающего вблизи непроницаемого контура с дебитом, равным дебиту каждого из водозаборов. В этом случае контур зоны санитарной охраны будет иметь очертания симметричной относительно оси x половины контура зоны санитарной охраны двух водозаборов, расстояние между которыми равно удвоенному расстоянию одиночного водозабора от непроницаемой границы, соединенной линией этой границы.

Совершенно аналогичными будут также фильтрационное поле линейного водозабора, расположенного около непроницаемого контура перпендикулярно ему, и симметричная относительно оси половина фильтрационного поля линейного водозабора с вдвое большей длиной и дебитом, работающего в условиях неограниченного пласта.

Поэтому зона санитарной охраны линейного водозабора около непроницаемой границы выделяется совершенно аналогично зоне санитарной охраны линейного водозабора в неограниченном пласте, имеющего вдвое большую длину и дебит и расположенного перпендикулярно направлению естественного потока.

Следует отметить, что условия полуограниченного с непроницаемым контуром пласта встречаются сравнительно редко, так как в реальной обстановке водозаборы стремятся располагать возможно дальше от непроницаемой границы, существенно влияющей на величину понижения уровня при эксплуатации.

Однако в ряде случаев по разного рода экономическим, санитарным или каким-либо другим соображениям приходится идти на такое размещение водозаборов. Чаще это делается при заложении одиночных водозаборов.

Сопоставление фильтрационного поля одиночного водозабора, работающего в условиях пласта-квадранта с непроницаемым контуром и контуром постоянного напора соответственно на расстояниях v и a от них, с фильтрационным полем двух береговых водозаборов, расположенных на расстоянии $2v$ один от другого по линии, параллельной береговой линии и проходящей на расстоянии a от нее, свидетельствует о полном подобии между первым фильтрационным полем и каждой симметричной относительно оси x половиной второго фильтрационного поля. Следовательно, для выделения зоны санитарной охраны одиночного водозабора, работающего в условиях пласта-квадранта, вполне применима методика выделения зон санитарной охраны двух береговых водозаборов.

Сама зона будет иметь очертания соответствующей симметричной относительно оси x половины зоны санитарной охраны двух береговых водозаборов.

Совершенно аналогичными будут также фильтрационное поле линейного водозабора, работающего в условиях рассматриваемого пласта-квадранта на расстоянии a от контура на фильтрационного поля берегового линейного водозабора, входящего на расстоянии a от береговой линии и имеющего вдвое большую протяженность и дебит.

Поэтому зона санитарной охраны и линейного водозабора, работающего в условиях пласта-квадранта с непроницаемым контуром и с контуром постоянного напора, выделяется совершенно аналогично зоне санитарной охраны линейного водозабора с вдвое большей длиной и дебитом, работающего в условиях полуограниченного пласта с контуром постоянного напора.

ВЫДЕЛЕНИЕ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ДЛЯ РАЗНОДЕБИТНЫХ ПРОИЗВОЛЬНО РАСПОЛОЖЕННЫХ ВОДОЗАБОРОВ И ДЛЯ СЛОЖНЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ

В реальных условиях обычно водозаборы состоят из разнодебитных и произвольно одна относительно другой расположенных скважин.

Если при этом они располагаются сравнительно компактно, то весь водозабор может рассматриваться как один «большой колодец», т. е. как одиночный водозабор с дебитом, равным суммарному дебиту всех составляющих его скважин.

Методика выделения зон санитарной охраны такого водозабора, если гидрогеологические условия являются относительно простыми, достаточно подробно описана в предыдущих главах.

Основной задачей при этом является нахождение местоположения начала координат, от которого и производится выделение зоны санитарной охраны. Погрешность будет наименьшей, если начало координат будет размещено в «центре тяжести» всей системы скважин. Чтобы найти координаты «центра тяжести», следует из точки расположения любой крайней скважины, принимаемой за начало координат, провести координатные оси и определить по обеим осям средневзвешенные по дебиту координаты по формулам

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (V.1)$$

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i Q_i}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad (V.2)$$

Если скважины водозабора разноразмерные, но располагаются так, что площадь водозабора имеет вытянутую форму с большой разницей в размерах по длине и ширине, и если при этом гидрогеологические условия являются сравнительно простыми, то весь водозабор может рассматриваться как линейный ряд, координаты середины которого также определяются по формулам (V.1) и (V.2). При этом для удобства вспомогательное начало координат размещается в крайней скважине водозабора, а координатные оси проводятся в направлении длинной и короткой сторон площади водозабора.

Конечно, как для одиночного, так и для линейного подобного рода водозабора, состоящих из разноразмерных скважин, выделение зон санитарной охраны главным образом должно сводиться к построению нейтральной линии тока. Что касается выделения зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок, то для таких водозабора имеет смысл рассчитывать границы зоны только на значительные сроки, например на 20 лет, так чтобы расстояния границ зоны от начала координат были значительно больше линейных размеров водозабора в этих направлениях.

Если группа разноразмерных скважин работает в сложных гидрогеологических условиях или если реальные гидрогеологические условия резко расходятся с принятыми в главе 2 допущениями, то основным методом выделения зон санитарной охраны является метод построения гидродинамической сетки фильтрационного течения, возникающего под влиянием эксплуатируемых водозабора на естественный поток подземных вод.

При сравнительно простых гидрогеологических условиях, в которых возможно применение аналитических методов оценки влияния водозабора, и при разном дебите скважин и их произвольном расположении целесообразно выделять зоны санитарной охраны графоаналитическим методом В. И. Владимирского. («Разведка и охрана недр», № 8, 1962).

Сущность этого метода состоит в следующем.

Для каждой скважины водозабора строится карточка разных понижений. Понижения рассчитываются с учетом реальных гидрогеологических условий и на определенный заданный срок.

Карточки равных понижений совмещаются и на их основе строится сводная карта равных понижений, создаваемых всеми скважинами водозабора.

Карта равных понижений может быть построена также и другим способом. Вся территория, в пределах которой требуется построить гидродинамическую сетку, разбивается на прямоугольную или ромбическую сетку, для узлов которой определяется понижение от каждой скважины водозабора. Эти понижения для каждого узла складываются и служат основой для построения карты равных понижений. Полученная карта совмещается с картой гидроизогипс (или гидроизопьез) естественного потока под-

земных вод, построенной по данным изысканий до ввода водозабора в действие.

В точках пересечения изолиний равных понижений с гидроизогипсами (или гидроизопьезами) величина понижений вычитаются из отметок гидроизогипс. По полученным таким образом новым значениям отметок уровня строится новая карта гидроизогипс, характеризующая фильтрационное поле водозабора для данных конкретных природных условий на заданный срок. На этой карте проводятся линии тока. Для этого одна из удаленных вверх по потоку от водозабора гидроизогипс разбивается на равные отрезки, через концы которых и проводятся линии тока. Они должны быть перпендикулярными гидроизогипсам в месте пересечения с ними. Нейтральная линия тока, ограничивающая область захвата водозабора, проходит между двумя соседними линиями тока, одна из которых приходит к водозабору, а другая проходит мимо него.

Выше по потоку от водозабора положение границы зоны санитарной охраны рассчитывается на какой-либо отдаленный срок. Расчет ведется по отрезкам, отсекаемым соседними гидроизогипсами (или гидроизопьезами) на линии тока, идущей сверху по потоку к водозабору.

Время, требуемое на прохождение каждого отрезка, определяется по известной формуле

$$\Delta t_i = \frac{\mu \Delta l_i^2}{k \Delta h}, \quad (V.3)$$

где Δh — сечение гидроизогипс;

Δl_i — отрезок линии тока между соседними гидроизогипсами.

Расчет ведется в направлении от водозабора. Время прохождения выделенных отрезков суммируется. Когда оно станет равным заданному, суммарная длина всех вошедших в расчет отрезков и дает расстояние от водозабора до границы зоны санитарной охраны вверх по потоку.

Такой расчет может быть произведен по нескольким линиям тока, когда требуется установить зону санитарной охраны на определенный срок. Концы последних вошедших в расчет отрезков на каждой выделенной линии тока соединяются, образуя границу искомой зоны санитарной охраны. Конечно, такой метод расчета справедлив лишь при условии, что движение подземных вод станет установившимся или квазистационарным значительно раньше срока, на который рассчитывается зона санитарной охраны. В противном случае расчет существенно усложнится и станет еще более трудоемким. Производится он следующим образом. Срок, на который рассчитывается зона санитарной охраны, разбивается на 4—5 интервалов, например, на интервалы от 0 до 5, от 5 до 10, от 10 до 15 и от 15 до 20 лет. Затем на сроки в 2,5, 7,5, 12,5 и 17,5 лет, т. е. на середины выделенных интервалов

времени строятся описанным выше способом гидродинамические сетки фильтрационного течения.

По сетке, построенной на срок в 17,5 лет описанным выше способом, начиная от водозабора, определяется то расстояние до водозабора, которое пройдет частица жидкости за 5 последних лет.

По следующей сетке, построенной на срок в 12,5 лет тем же способом, но начиная от той точки, до которой произведен расчет в предыдущем случае, определяется вверх по линии тока новое расстояние, которое пройдет частица жидкости еще за 5 лет.

Полученные расстояния складываются, и следующий аналогичный расчет по сетке, построенный на срок 7,5 лет, производится уже от конца ранее подсчитанного суммарного отрезка. Последовательно складывая полученные расстояния, двигаясь в расчете от поздних сеток движения к более ранним, получаем то расстояние от водозабора, на котором должна проходить по данной линии тока граница зоны санитарной охраны, рассчитанной на срок в 20 лет.

Следует иметь в виду, что рассмотренный в настоящей главе метод сложения течений применим лишь в том случае, когда каждое из слагаемых фильтрационных полей было примерно одинаково обосновано. При этом если естественный поток подземных вод, задаваемый картой гидроизогипс (или гидроизопьез), отражает и граничные условия, и фильтрационную неоднородность, то аналитические расчеты понижений, создаваемых водозаборами, должны учитывать и эти факторы.

Часто аналитическим путем не удается рассчитать понижения, создаваемые водозаборами. В этих случаях представляется необходимым прибегнуть к разного рода аналоговым машинам и моделировать природную обстановку. Очевидно, для проверки правильности моделирования необходимо предусмотреть определенный объем опытных откачек. Сопоставление понижений, созданных откачками, с соответствующими понижениями на модели позволяет уточнить модель и максимально приблизить ее к реальным гидрогеологическим условиям.

МАТЕРИАЛЫ И ИССЛЕДОВАНИЯ, НЕОБХОДИМЫЕ ДЛЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОГО ОБОСНОВАНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ

Геологические организации, проводящие разведку подземных вод и представляющие разведанные запасы на утверждение в ГКЗ, должны в соответствии с инструкцией ГКЗ (1962) представлять рекомендации по установлению зон санитарной охраны применительно к схеме расчетного водозабора с тем, чтобы органы санитарной службы, обследовав выделенную зону ограничений, могли обоснованно судить о том, удовлетворяет ли она предъявляемым к ней требованиям. При этом, как правило, специальных исследований проводить не требуется. Для выделения зон санитарной охраны в этих условиях достаточно использовать материалы проводившихся ранее в районе гидрогеологических съемок и материалы разведочных работ. При обнаружении в районе разведываемого водозабора очага загрязнения подземных вод или участка распространения минерализованных вод в большинстве случаев требуется проведение дополнительных специальных исследований по выявлению характера и масштабов очага загрязнения, условий его образования и распространения. Эти сведения необходимы для такого размещения проектируемого водозабора, чтобы около него можно было организовать зону санитарной охраны, удовлетворяющую предъявляемым к ней требованиям.

Таким образом, во всех случаях—при наличии очага загрязнения в подземных водах в районе проектируемого водозабора и при его отсутствии — требуется выделить тем или иным из описанных выше способов зону санитарной охраны.

Выделение зоны санитарной охраны будет обоснованным, а сама зона будет отвечать своему назначению только в том случае, если при проектировании ее будут достаточно хорошо известны гидрогеологические условия территории.

Прежде всего должны быть выяснены условия защищенности намечаемого к эксплуатации водоносного горизонта от загрязнения.

Чтобы судить о степени защищенности водоносного горизонта от загрязнения, нужно ясно представить характер возможного загрязнения, его источники и возможные пути проникновения к подземным водам.

ВИДЫ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Все виды загрязнения подземных вод по их проявлению, последствиям и мерам борьбы можно разделить на четыре неравноценные группы: бактериальное, химическое, механическое и радиоактивное.

Бактериальное загрязнение. Данный вид загрязнения может вызвать и многократно уже вызывал разного рода эпидемические заболевания. Проникновение и распространение бактериального загрязнения определяется очищающими свойствами почв и горных пород, через которые фильтруются загрязненные растворы. Масштабы загрязнения зависят от интенсивности его поступления и от выживаемости бактерий в зоне аэрации и в подземных водах. Известно, что все анаэробные бактерии, к которым относится и большинство патогенных бактерий, погибают в аэрируемой среде, если они будут находиться в ней определенное непродолжительное время.

Опыты показывают, что слой хорошо аэрируемого мелкозернистого песка мощностью 3—5 м полностью очищает загрязненные воды от бактерий — они погибают или сорбируются породой. В последнем случае их жизнедеятельность подавляется. Если патогенные бактерии тем или иным путем попадают к подземным водам живыми, то они могут находиться в них довольно долгое время, двигаясь с грунтовым потоком.

До настоящего времени нет достаточно убедительных данных о времени выживаемости бактерий в подземных водах.

Следует отметить, что получение таких данных весьма затруднительно, так как в различных породах, в подземных водах различного состава и температуры это время является различным. По одним опытам оно равно одному месяцу (около 30 суток), по другим — достигает двух и более лет.

Химическое загрязнение. Случаи загрязнения подземных вод химическими веществами весьма распространены. Данное загрязнение является в большинстве случаев самым серьезным и трудноустраняемым.

Токсичное химическое загрязнение может вызвать отравление населения, пользующегося подземными водами, разного рода ядовитыми органическими и неорганическими соединениями, содержащимися в сточных водах.

В результате данного загрязнения происходит такое ухудшение органолептических свойств или состава подземных вод, что дальнейшее их употребление для питьевого водоснабжения становится невозможным. Существенно ухудшаются и условия использования

подземных вод для хозяйственно-питьевых целей (увеличение жесткости, содержание железа и т. д.).

Химическое загрязнение, если оно не сорбируется водоносным пластом и не вступает с ним во взаимодействие, может оставаться в подземных водах неопределенно долгий срок.

Механическое загрязнение. Загрязнение данного вида встречается в подземных водах весьма редко.

Если водоносный пласт представлен песками, то механические примеси отфильтровываются уже на первых метрах движения загрязненных вод по водоносному пласту. В трещиноватых породах они распространяются несколько дальше, но и здесь быстро исчезают из раствора. И только в сильно закарстованных массивах механическое загрязнение может распространиться на большие расстояния. Следует учитывать, что наличие механического загрязнения является показателем возможного общего (химического и бактериального) загрязнения подземных вод.

Радиоактивное загрязнение. Загрязнение данного вида связано с работой атомных установок, а также с районами разработки урановых и других месторождений, где водоотлив, отвалы или хвостохранилища могут стать источниками такого загрязнения.

Значительная часть радиоактивных загрязнений вследствие высокой сорбируемости весьма медленно распространяется по потоку, но некоторые из них сорбируются слабо и могут перемещаться одновременно с растворами и в течение весьма продолжительного времени.

ИСТОЧНИКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И ПУТИ ЕГО ПРОНИКНОВЕНИЯ К ПОДЗЕМНЫМ ВОДАМ

Загрязняющие вещества попадают к подземным водам, как правило, в виде водных растворов.

Поэтому водоносные горизонты, перекрытые водоупорными породами, находятся, естественно, в более благоприятных условиях в отношении проникновения к ним загрязненных растворов.

В наименее благоприятных условиях в этом отношении находятся грунтовые воды. К ним и приурочено подавляющее большинство случаев серьезного загрязнения подземных вод.

Различные условия защищенности грунтовых и артезианских водоносных горизонтов от загрязнения определяют и то обстоятельство, что источники, вызывающие загрязнение этих горизонтов, также являются в значительной мере различными.

Источниками загрязнения, характерными только для грунтовых вод, являются:

а) участки скопления бытовых и промышленных сточных вод (пруды-отстойники, пруды-накопители, шламовые пруды, хвостохранилища, поля фильтрации, болота, озера и т. п.), из которых загрязненные растворы попадают к грунтовым водам, фильтруясь через стенки и дно хранилищ (рис. 47 а);

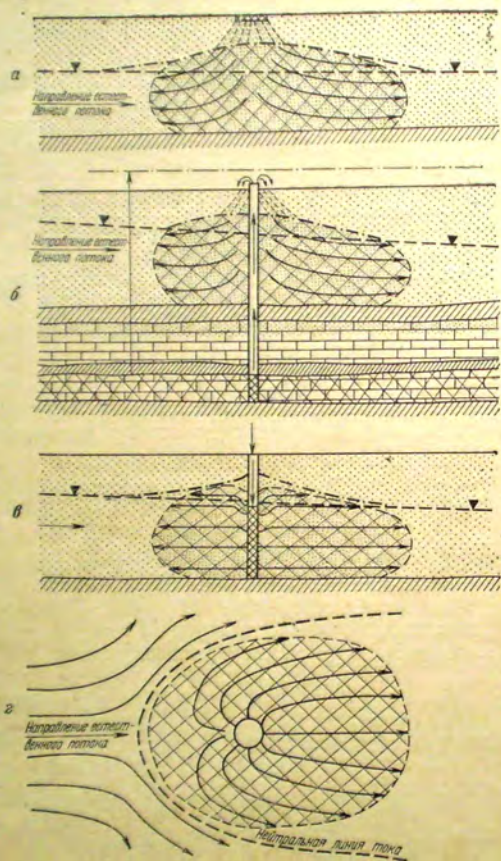


Рис. 47. Возможные пути образования очагов загрязнения в грунтовых водах

б) участки скопления на поверхности твердых отходов, особенно отходов химических производств (загрязненные территории промышленных предприятий, свалки, солеотвалы, и т. п.), где происходит загрязнение выпадающих атмосферных осадков и последующая их фильтрация через зону аэрации на местах скопления отходов или в понижениях рельефа;

в) дефектная канализационная сеть, отводящая сточные воды (разрушены или протекают трубы, отсутствует или разрушен водоупорный экран в дне и стенках отводящих канав); в данном случае сточные воды фильтруются через зону аэрации;

г) участки складирования и хранения нефтепродуктов, а также сырья и готовой продукции химических производств, где происходит загрязнение выпадающих атмосферных осадков и последующая их инфильтрация или фильтрация самих нефтепродуктов или других жидких веществ из мест хранения непосредственно к грунтовым водам;

д) участки самоизлива на дневную поверхность минерализованных вод из глубоких скважин, где происходит инфильтрация этих вод к грунтовым (см. рис. 47 б);

е) земельные поля, на которых широко применяются удобрения и ядохимикаты, а также сельскохозяйственные поля орошения сточными водами.

Источниками загрязнения, специфическими для артезианских водоносных горизонтов, являются:

ж) участки распространения загрязненных грунтовых вод, если в водоупорной кровле горизонта имеются «гидрогеологические окна» или она нарушена горными выработками (рис. 48 б, в, г).

Источниками, могущими вызвать загрязнение как грунтовых так и артезианских вод, являются:

з) сточные воды, сбрасываемые в поглощающие скважины (см. рис. 47 в, 48 а).

и) нижележащие водоносные горизонты, содержащие минерализованные воды. Последние являются источником загрязнения только в том случае, если они соединяются с вышележащим водоносным горизонтом через затрубное пространство плохо оборудованных и незатампонированных разведочных скважин или через корродированные (или оборванные) трубы этих скважин, а пьезометрический их уровень выше чем уровень загрязненного горизонта.

При эксплуатации водоносных горизонтов к названным возможным источникам загрязнения прибавляются гидравлически с ними связанные загрязненные реки и водоемы (рис. 49).

Следует отметить еще один источник загрязнения, который может возникнуть в районе некоторых рудных месторождений, разрабатываемых с водопонижением. При подъеме уровня подземных вод, вызванном разного рода переборами в работе водоопускательных систем, может происходить загрязнение этих вод

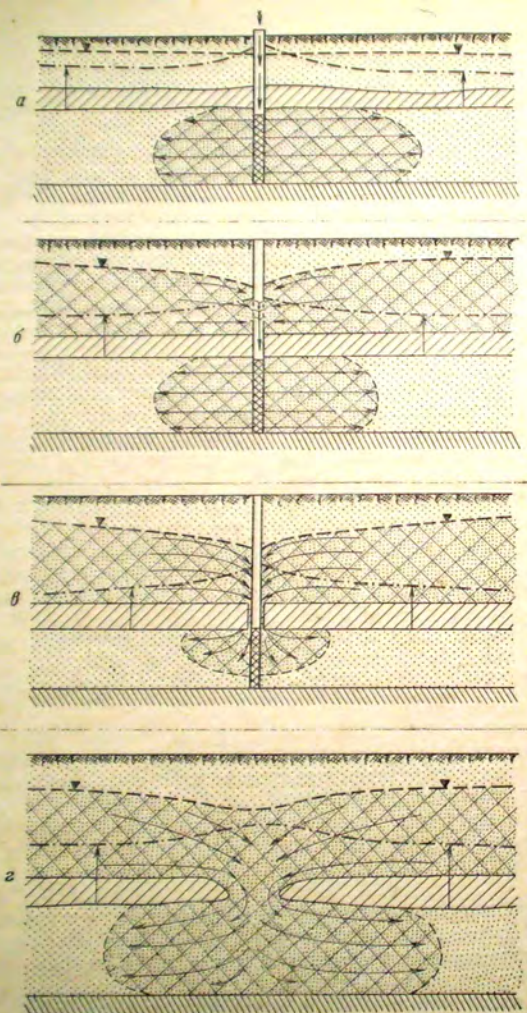


Рис. 48. Возможные пути проникновения загрязнения в артезианские воды

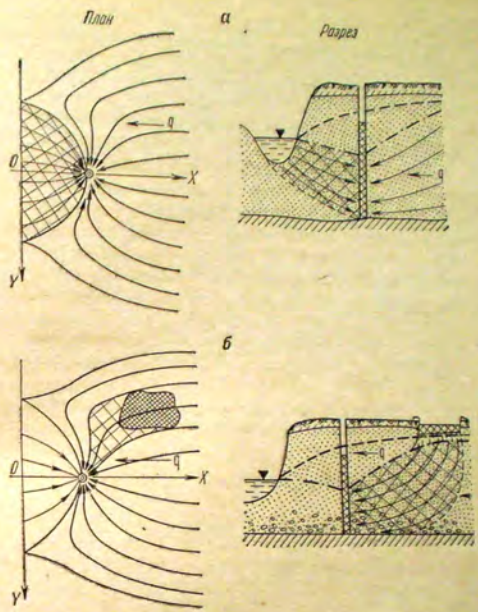


Рис. 49. Поступление загрязненных вод к береговому водозабору

в результате растворения легкорастворимых соединений, образовавшихся в ранее осушенной зоне (рис. 50).

Загрязненные растворы попадают к грунтовым водам разными путями. Наиболее частый случай — инфильтрация через зону аэрации или непосредственная фильтрация от источника загрязнения (см. рис. 47, а, б).

Часто путями проникновения загрязненных растворов к грунтовым водам является затрубное пространство плохо оборудованных эксплуатационных и разведочных скважин, расположенных вблизи названных выше возможных источников загрязнения или утепленных на устье материалом, содержащим загрязняющие вещества (шлак, навоз и т. п.) (рис. 51).

На всех позициях рисунков 48 и 51, где показаны дефектные скважины (не зацементировано затрубное пространство или корродированы трубы), эти скважины являются бездействующими.

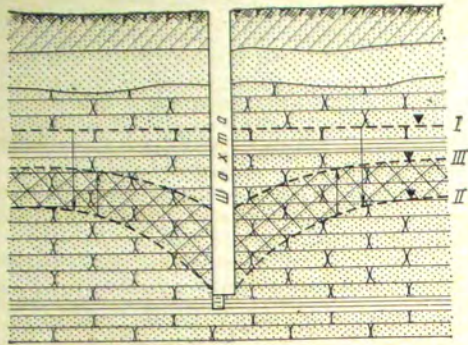


Рис. 50. Загрязнение подземных вод в районе месторождений полезных ископаемых

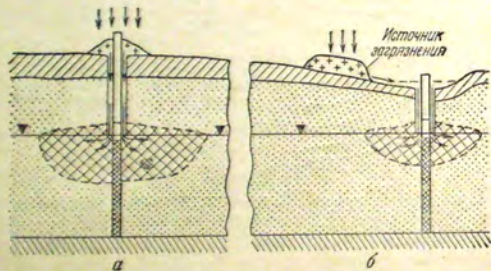


Рис. 51. Возможные пути проникновения загрязнения к грунтовым водам

Только в таком случае образовавшийся в районе скважины очаг загрязнения будет иметь в разрезе и в плане тот вид, который изображен на рис. 47, 48 и 51.

При работе этих скважин очаг загрязнения вокруг них будет иметь другие очертания и значительно меньшие размеры в плане и в разрезе. Через поглощающие скважины загрязненные растворы попадают как к грунтовым, так и к артезианским водам непосредственно с дневной поверхности. Загрязненные грунтовые воды попадают к артезианским через «гидрогеологические окна» в водопорной кровле последних, через корродированные в интервале грунтовых вод стенки труб, которыми обсажены скважины, вскрывшие артезианский горизонт, или через затрубное незаце-

ментированное пространство этих скважин (см. рис. 48, б, в, г). Образовавшиеся в результате поступления загрязненных растворов очаги загрязнения в подземных водах имеют в плане очертания (рис. 47, г), в общем одинаковые как для грунтовых, так и для артезианских вод.

При приближении условий водоносного горизонта к условиям бассейна, т. е. когда скорость движения подземных вод будет пренебрежимо мала ($v < 0,01$ м/сутки), очаг загрязнения будет иметь в плане форму окружности или в общем повторять форму источника загрязнения, если последний имеет крупные размеры, а загрязненные растворы просачиваются к грунтовым водам непосредственно на месте их скопления.

Все приведенные на рис. 47, 48 и 51 схемы показывают очертания очага загрязнения, находящегося вдали от действующих эксплуатационных скважин. При работе водозабора вблизи очага загрязнения очертания последнего будут совершенно отличными от изображенных на этих рисунках и будут определяться фильтрационным полем, создаваемым водозабором (например, рис. 49, б).

Следует отметить также, что приведенные на рис. 47, 48 и 51 схемы справедливы лишь для случая, когда удельные веса чистых и загрязненных вод примерно одинаковы. Если удельный вес загрязненного раствора заметно выше, то загрязненные воды перемещаются в подошве пласта, и их движение в плане происходит преимущественно в нижней части водоносного горизонта даже если водонепроницаемость здесь значительно ниже, чем в верхней части разреза. При этом скорость горизонтального перемещения границы загрязненных вод в ряде случаев значительно превышает скорость движения всего потока подземных вод, так как оно происходит под влиянием более высоких градиентов.

ЗАЩИЩЕННОСТЬ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ И СВЯЗАННЫЕ С НЕЙ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ КО ВТОРОМУ ПОЯСУ САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

К факторам, определяющим защищенность водоносных горизонтов от загрязнения, относятся литологический состав, строение и мощность зоны аэрации, характер водоносного пласта и условия его связи с поверхностными водами, а также мощность и выдержанность глинистых толщ, слагающих кровлю и подошву рассматриваемых водоносных горизонтов.

От литологического состава, строения и мощности зоны аэрации зависит защищенность грунтовых вод главным образом от бактериального загрязнения. Если зона аэрации сложена глинами, суглинками или глинистыми песками мощностью свыше 3 м и не

создается сплошного фильтрационного потока сверху, можно не опасаться попадания бактериального загрязнения к грунтовым водам.

Если зона аэрации сложена трещиноватыми скальными и полускальными породами и особенно если эти породы закарстованы, поступление загрязнения к грунтовым водам существенно облегчается.

Химическое загрязнение может попадать к грунтовым водам и при отсутствии сплошного фильтрационного потока через зону аэрации. Глинистый состав зоны аэрации не является при этом гарантированным препятствием загрязнению. *

Характер водоносного пласта (его литологический состав и строение) определяет масштабы распространения загрязнений, после того как они тем или иным путем попадут в водоносный горизонт. Чем больше коэффициент фильтрации пласта и чем меньше его активная пористость, тем дальше при прочих равных условиях распространится загрязнение по пласту.

Наличие карстовых каналов может привести к тому, что даже бактериальное загрязнение, время нахождения которого в подземных водах является достаточно ограниченным (срок выживаемости бактерий), может распространиться на много километров от источников загрязнения.

Условия связи водоносного горизонта с поверхностными водоемами и водоотками характеризуют возможность попадания к подземным водам загрязненных поверхностных вод.

Определяющими при этом являются: глубина вреза речных долин и водоемов по отношению к водоносным горизонтам, экранированность их дна и бортов, мощность аллювиальных отложений, их выдержанность и механический состав, наличие или отсутствие выдержанных глинистых слоев, отделяющих водоносный горизонт от поверхностных вод.

Характер и выдержанность глинистых толщ, разделяющих водоносные горизонты, определяют условия перетекания подземных вод из одного горизонта в другой и, в частности, перетекание загрязненных грунтовых вод в нижележащие водоносные горизонты. Можно с достаточной уверенностью считать, что перетекание загрязненных вод возможно лишь при наличии «гидрогеологических окон» — разрывов или другого рода перерывов в разделяющей горизонтах глинистой толще.

Наиболее благоприятными в отношении защищенности являются глубокие артезианские и межпластовые воды, изолированные сверху непроницаемой кровлей и имеющие области питания на достаточно большом удалении от района водозабора.

В наименее благоприятных условиях в отношении защищенности находятся, как уже отмечалось выше, грунтовые воды; действительно, свыше 70% всех выявленных случаев загрязнения подземных вод приходится на их долю.

Оценка степени защищенности водоносных горизонтов в районах проектируемых водозаборов производится по материалам гидрогеологической и геологических съемок, как плановых, так и специальных, проводившихся применительно к конкретным объектам на территории, прилегающей к водозабору, а также по материалам разведки самих водозаборов.

При этом должны быть получены сведения о мощности, строении и литологическом составе зоны аэрации, их изменениях по площади, выявлены участки, наиболее угрожаемые в отношении загрязнения.

Целесообразно выяснить закономерности в соотношениях пьезометрических уровней и химического состава различных водоносных горизонтов на участках их совместного распространения.

Снижение пьезометрических уровней эксплуатируемых водоносных горизонтов при наличии «гидрогеологических окон» в их кровле или подошве может существенно уменьшить степень защищенности этих горизонтов от засоления снизу и, особенно, от загрязнения сверху из загрязненных грунтовых вод, уровень которых ранее был ниже уровня эксплуатируемого водоносного горизонта. Должны быть выделены все участки древних и современных размывов в кровле артезианских водоносных горизонтов, через которые возможна связь этих горизонтов с вышележащими грунтовыми или поверхностными водами. Должны выясниться глубины врезов речных долин и условия взаимосвязи водоносных горизонтов с подруслыми водами и водами в русле рек.

Наиболее надежным критерием для суждения о связи поверхностных и подземных вод являются режимные наблюдения за уровнями подземных вод в приречной зоне в естественных условиях и при откачках. В последнем случае целесообразно также иметь данные о режиме уровня подземных вод на противоположном берегу реки или в самом русле. Если влияние откачки распространяется на эти участки, т. е. происходит «отрыв» уровня, — связь поверхностных и подземных вод затруднена.

При обследовании санитарного состояния речных вод следует иметь в виду, что в различное время года оно может быть различным. В частности, в период половодья концентрация загрязняющих веществ может быть во много раз меньше, чем в меженьный период, вследствие различной степени разбавления одного и того же количества стоков. Поэтому необходимо иметь данные о санитарном состоянии воды в реке не менее чем на два срока, в том числе обязательно на меженьный период. Кроме этого, следует учитывать и сезонный характер сброса в реки сточных вод некоторых промышленных предприятий.

Все перечисленные выше сведения, дающие представление о степени защищенности водоносных горизонтов от загрязнения, позволяют наметить граничные условия, которые должны быть положены в основу расчета и выделения зон санитарной охраны.

а также обоснованно заметить те ограничения, которые должны соблюдаться в пределах второго пояса санитарной охраны. Эти ограничения для различных гидрогеологических условий будут различными.

В пределах второго пояса санитарной охраны водозаборов, эксплуатирующих грунтовые воды, нельзя допускать создания перечисленных выше источников загрязнения, так как в противном случае загрязненные воды, попав тем или иным путем в грунтовый поток, обязательно рано или поздно придут в район водозабора, если, конечно, при движении не будет происходить их самоочищения.

При организации второго пояса санитарной охраны водозаборов, эксплуатирующих артезианские воды, в ряде случаев требования могут быть менее строгими. Если есть уверенность, например, что повсюду в пределах рассчитанной зоны санитарной охраны намечаемый к эксплуатации артезианский водоносный горизонт надежно изолирован от грунтовых вод толщей водоупорных отложений, то в пределах этой зоны нельзя лишь оставлять неликвидированными горные выработки (скважины, шахты), нарушившие водоупорную кровлю горизонта, а сама проходка этих выработок должна производиться со строгим контролем за качеством изоляции проходимых выработкой водоносных горизонтов.

Если же известно, что в водоупорной кровле горизонта имеются «гидрогеологические окна» или в пределах рассчитанной зоны санитарной охраны имеются заброшенные разведочные или эксплуатационные скважины, ликвидация которых по тем или иным причинам невозможна, в ее пределах должны выполняться те же ограничения, что и при эксплуатации грунтовых вод.

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ И СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ИЗ НИХ

Гидрогеологические параметры, входящие в расчетные зависимости, в значительной своей части определяются при разведке водозабора.

Значения коэффициента фильтрации, его изменения по площади определяются главным образом по данным опытных откачек.

Бурение разведочных скважин позволяет определить мощность водоносного горизонта и ее изменения по площади.

Построенные по материалам съемок, разведочного бурения и режимных наблюдений карты гидроизогипс (или гидроизопьез) позволяют определить уклоны естественного потока в различных направлениях.

При использовании методов выделения зон санитарной охраны, описанных в главах 3 и 4, следует иметь в виду, что аналитические решения, положенные в основу этих методов, получены при допущении фильтрационной однородности водоносного горизонта

в плане и по разрезу. Это обстоятельство должно учитываться в основном при установлении границ зоны санитарной охраны, рассчитываемой на определенный срок.

Что касается зон санитарной охраны, границей которых является нейтральная линия тока, то здесь влияние фильтрационной неоднородности (по площади) на размеры и форму зоны значительно слабее, и с достаточной для практических целей обоснованностью и даже «запасом» может быть учтено заложением в расчеты зоны наиболее низких значений водопроводимости. Фильтрационная неоднородность по разрезу учитывается осреднением водопроводимости.

Значительно сложнее учесть фильтрационную неоднородность при установлении границы зон, рассчитываемых на определенный срок.

Отдельные, даже небольшие прослои, имеющие повышенную проницаемость, могут внести существенные коррективы в расчеты зон санитарной охраны, проводимые по осредненным для всего водоносного горизонта параметрам.

Загрязненные воды попадают при этом в район водозабора значительно раньше расчетного срока, и зоны санитарной охраны, выделенные с учетом этого срока, могут не выполнить своего назначения. Следует отметить, однако, что количество загрязняющих веществ, которые могут прийти к водозабору по маломощным, наиболее проницаемым прослоям в условиях возможного поступления в эти прослои чистых вод сверху и снизу будет, как правило, незначительным, и их концентрация в откачиваемой воде в большинстве случаев будет безопасной.

Поэтому чаще всего, если загрязняющие вещества, появление которых возможно в районе водозабора, не являются высокотоксичными, при расчете зон санитарной охраны можно не учитывать фильтрационную неоднородность водоносного горизонта по вертикали, если, конечно, она не очень велика.

Но в ряде случаев, когда водозабору может угрожать загрязнение высокотоксичными веществами, появление которых в откачиваемой воде недопустимо, фильтрационная неоднородность должна приниматься в расчет.

Чтобы ее учесть, следует в процессе разведочных работ по оценке запасов подземных вод и обоснованию охраны их качества произвести опыты с индикаторами по определению активной пористости водоносного пласта с загрузкой индикатора по всему стволу загрузочной скважины.

При обработке результатов этих опытов в расчетную формулу

$$\mu = \frac{Qt}{\pi r^2} \quad (VI.1)$$

закладывается время появления первых порций индикатора в откачиваемой скважине (r — расстояние загрузочной скважины от центральной).

Определенное таким образом значение μ является фиктивным и может быть значительно ниже действительного значения активной пористости, в том числе и активной пористости наиболее проводящего прослоя.

Однако оно позволяет учесть фильтрационную неоднородность пласта и, будучи заложенным в подсчет приведенного времени на соответствующих графиках, позволит так рассчитать зоны санитарной охраны, чтобы высокотоксичное загрязнение действительно не пришло к водозабору ранее расчетного срока.

Следует отметить, что полученное значение μ , будучи заложенным в расчет зоны санитарной охраны, может дать в некоторых, правда, очень редких случаях чрезмерный «запас надежности», что приведет к необоснованному отчуждению больших территорий. Связано это с тем, что некоторые загрязняющие вещества при их фильтрации в водных растворах по пласту вступают во взаимодействие с породой. Как правило, это выражается в виде сорбции загрязняющих веществ на породе и приводит к замедлению продвижения фронта загрязнения. Особенно заметно проявляется процесс сорбции при загрязнении подземных вод некоторыми радиоактивными веществами. В этих случаях скорость продвижения фронта загрязнения может уменьшаться в несколько раз.

Чтобы учесть связанное с процессами сорбции замедление продвижения фронта загрязнения, В. М. Шестаков (1961) предлагает закладывать в соответствующие расчеты вместо полученного значения μ величину так называемой «эффективной пористости» $\mu_{эф}$.

Для определения значения $\mu_{эф}$ В. М. Шестаков предлагает два способа. Первый способ — аналитический — основан на использовании формулы

$$\mu_{эф} = \mu \left(1 + \frac{N}{c} \right), \quad (VI.2)$$

где N — количество загрязняющего сорбированного вещества, отнесенное к единице активного порового объема;

c — концентрация загрязняющего вещества в растворе.

Величина N , входящая в формулу (VI.2) и при прочих равных условиях зависящая от сорбционных свойств различных литологических разностей горных пород и от характера самого сорбируемого вещества, в большинстве случаев не известна.

Поэтому более надежным и практически целесообразным является второй способ, основанный на непосредственном эксперименте в условиях, максимально приближающихся к реально возможным.

Для этих условий описанным выше путем определяется значение μ , но индикатором при опыте должны явиться те загрязняющие вещества, появление которых возможно в районе работы водозабора.

При этом количество индикатора, загружаемого в опытную скважину, должно быть таким, чтобы концентрация загрязненных подземных вод, идущих от загрузочной скважины, была примерно равна возможной концентрации загрязненных растворов, идущих от очага загрязнения.

Полученное таким образом значение μ и будет искомым величиной «эффективной пористости», которая и используется для необходимых расчетов.

Конечно, подобные опытные работы являются целесообразными только тогда, когда известны состав и концентрация загрязняющих веществ, появление которых возможно в районе, прилегающем к водозабору, и когда известно, что эти вещества могут сорбироваться на породах данного водоносного горизонта.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ, РАСПОЛАГАЮЩИХСЯ В РАЙОНАХ ВЫЯВЛЕННОГО ИЛИ ВОЗМОЖНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

В ряде случаев в районах, где производится разведка подземных вод для организации водозаборов, обнаруживаются участки распространения загрязненных или засоленных вод, контактирующие с намечаемыми к эксплуатации водоносным горизонтом. В ряде случаев таких участков еще нет, но имеются источники, могущие вызвать загрязнение подземных вод.

В таких условиях при проведении разведочных работ необходимы дополнительные исследования, которые должны дать сведения о границах распространения загрязненных или засоленных вод, распределении интенсивности загрязнения или минерализации в плане и по разрезу. Должны быть получены также сведения о самом источнике загрязнения, его масштабах, сезонном или постоянном действии, составе и объеме сточных вод, характере экранированности дна и стенок. Если это хранилище, должны быть получены данные о поступающих к подземным водам загрязненных растворах и возможных путях их проникновения.

Конечно, не все из перечисленных сведений представится возможным собрать на стадии детальной разведки водозабора. Поэтому при проектировании необходимо выбрать такое место его заложения, чтобы факторы, оставшиеся невыясненными, не могли оказать влияния на возможность попадания загрязняющих веществ в район водозабора.

Для выяснения перечисленных выше вопросов, помимо обследования источников загрязнения, требуется организовать створы наблюдательных скважин главным образом винз по потоку от источников загрязнения. Проходка этих скважин обязательно должна сопровождаться последним опробованием подземных вод. На скважинах организовываются режимные наблюдения за распространением загрязнения и за изменением состава загрязненных вод.

Для обоснованного размещения проектируемых водозаборов нужны также сведения, которые во всех случаях собираются при разведке подземных вод. Это данные о существующих водозаборах, их дебите, размещении в плане, о конструкциях скважин водозабора.

Должны быть собраны сведения о всех имеющихся в разведку районе бездействующих или заброшенных и незатампонированных эксплуатационных и разведочных скважинах, об имеющихся поглощающих скважинах.

К специальным исследованиям, которые в ряде случаев требуется провести на разведку участке, относится и описанное в предыдущем разделе опытное определение эффективной пористости с использованием загрязненных растворов того же состава, что и в очаге загрязнения.

Глава 7

РАЗМЕЩЕНИЕ ВОДОЗАБОРОВ ПРИ НАЛИЧИИ ИЛИ ВОЗМОЖНОМ ВОЗНИКНОВЕНИИ В ПРЕДЕЛАХ РАЗВЕДУЕМОГО УЧАСТКА ОЧАГОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Если в разведку районе отмечено загрязнение подземных вод или имеются источники, могущие вызвать это загрязнение, возникает необходимость в таком размещении водозаборов, при котором вокруг них могла быть создана зона санитарной охраны, удовлетворяющая заданным требованиям.

Решение этой проблемы сводится к нахождению границы, ближе которой по отношению к существующему или возможному очагу загрязнения нельзя располагать проектируемый водозабор.

В сложных гидрогеологических условиях задача эта решается только подбором. При этом путем моделирования или графоаналитическим методом строятся зоны санитарной охраны для различных фиксированных положений проектируемого водозабора. Поочередное совмещение ситуационного плана с нанесением очагов загрязнения и ситуационного плана с построенной зоной санитарной охраны для каждого положения водозабора позволит остановиться на таком его расположении, когда граница зоны не будет захватывать очага загрязнения и не будет проходить в большом удалении от последнего.

Для гидрогеологических условий, могущих быть схематизированными в виде неограниченного и полуограниченного пластов, задача размещения водозабора решается значительно проще. Найти место заложения водозабора так, чтобы около него можно было создать требуемую зону санитарной охраны, можно графическим путем.

Для этого на ситуационный план района (масштаб плана может быть любым — от 1:5000 до 1:25000 — в зависимости от масштаба очага загрязнения и требуемых размеров зоны санитарной охраны) следует возможно точнее нанести границы соответствующего очага загрязнения. Чтобы определить эти границы, проводятся дополнительные специальные исследования. Кроме

этого, на план наносится линия направления движения естественного потока, если водозабор будет работать в условиях неограниченного пласта, или линия уреза реки, если водозабор будет работать в условиях полуограниченного пласта.

Затем в этом же масштабе для данных конкретных граничных условий и для данного типа проектируемого водозабора на отдельном листе строятся описанными выше методами соответствующая зона санитарной охраны.

Границами этой зоны могут быть в зависимости от предъявляемых к ней требований или нейтральная линия тока, или линия, рассчитываемая на определенный срок. При этом если водозабор будет работать в условиях полуограниченного потока с контуром постоянного напора, но очагом загрязнения является не река, или другой водосточник, а какой-либо участок в пределах ее долины, при построении зоны санитарной охраны необходимо задаться расстоянием водозабора от береговой линии.

Построенная зона санитарной охраны, защищаемый ею водозабор, и оси координат снимаются на кальку. Затем эта калька накладывается на ситуационный план.

Для условий полуограниченного потока при наложении береговая линия на плане и ось y на кальке совмещаются, а граница зоны санитарной охраны на кальке и граница очага загрязнения на плане соприкасаются. Проектируемый водозабор не должен располагаться по отношению к очагу загрязнения ближе того места, которое он занимает при таком положении, будучи перенесенным на план.

Для условий неограниченного потока при наложении кальки на план положительное направление оси x на кальке должно идти вверх против направления движения естественного потока, а границы зоны санитарной охраны и очага загрязнения должны соприкасаться. Проектируемый водозабор не должен располагаться по отношению к очагу загрязнения ближе линии, описываемой точкой водозабора (если он одиночный) или ближайшим к очагу загрязнения концом ряда (если водозабор линейный) при таком перемещении кальки, когда ось x на ней все время остается параллельной направлению движения естественного потока, а границы зоны санитарной охраны и очага загрязнения все время соприкасаются.

При проектировании береговых водозаборов одиночного или линейного весьма часто приходится считать за тем, что река, около которой закладываются водозаборы, или уже загрязнена, или может быть загрязненной уже в процессе эксплуатации водозабора.

Поэтому в ряде случаев требуется так заложить водозабор, чтобы загрязненная вода из реки или вообще не дошла до него, или дошла, но не раньше определенного срока.

Недопущение воды из реки в район одиночного водозабора определяется известным соотношением Форхгеймера (1932).

$$\frac{Q}{\pi a q} < 1.$$

(VII.1)

Если же нужно, чтобы поверхностные воды не дошли до водозабора ранее определенного заданного срока, то он должен располагаться от береговой линии на расстоянии a , определяемом по графикам на рис. 52.

Для случая линейного водозабора практический интерес представляет лишь условие, чтобы загрязненные поверхностные воды не пришли в район водозабора ранее заданного срока. Расстояние от береговой линии, на котором должен быть заложен водо-

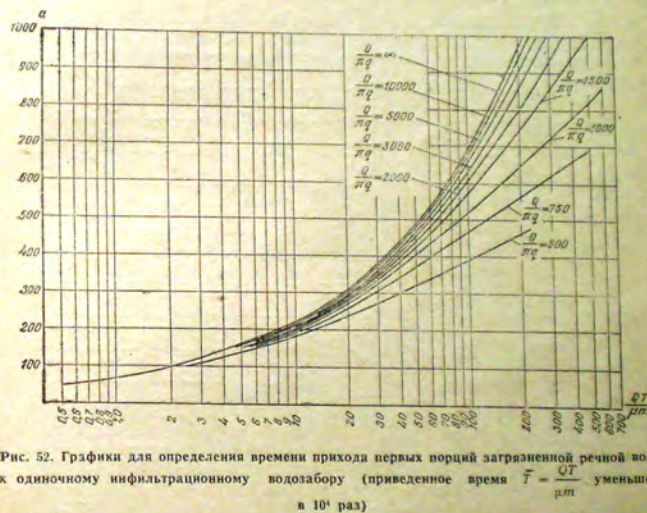


Рис. 52. Графики для определения времени прихода первых порций загрязненной речной воды к одиночному инфильтрационному водозабору (приведенное время $\bar{T} = \frac{QT}{\mu l^2}$ уменьшено в 10^4 раз)

забор, чтобы к нему не поднялись ранее заданного срока загрязненные поверхностные воды, определяется по графикам на рис. 53. В этом случае подсчитывается приведенное время $\bar{T} = \frac{QT}{\mu l^2}$ и отношение $\frac{Q}{2\pi a q}$.

По графику для данного отношения $\frac{Q}{2\pi a q}$ находится соответствующая рассчитанному значению приведенного времени \bar{T} величина $\frac{l}{a}$, из которой легко определяется искомое значение a , т. е. то расстояние от береговой линии, ближе которого нельзя располагать водозабор.

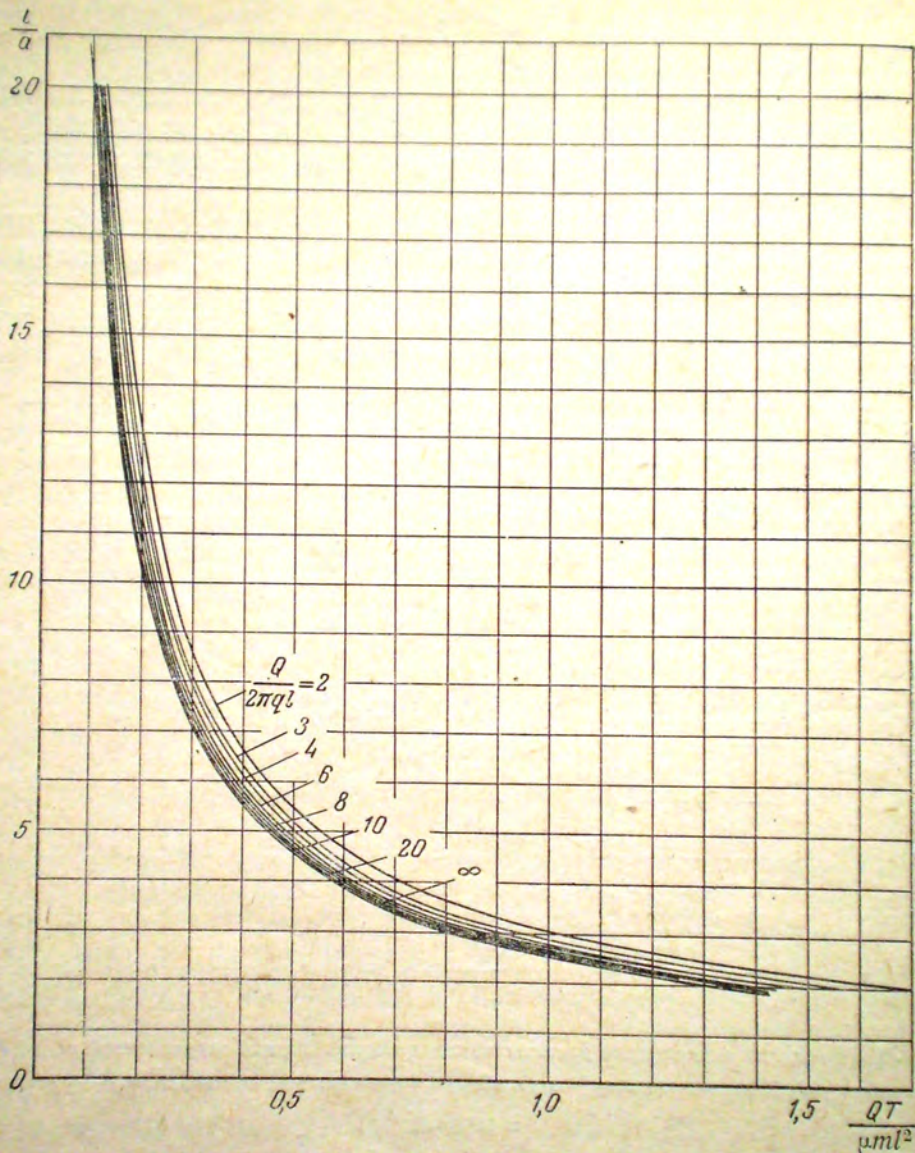


Рис. 53. Графики для определения времени прихода первых порций загрязнения из реки к линейному ряду

ЛИТЕРАТУРА

Белицкий А. С. Вопросы гидрогеологического обоснования зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения. «Гигиена и санитария», № 1, 1961.

Бабушкин В. Д., Прохоров С. П. «Методы расчета общего притока в шахты угольных месторождений». Изд. «Недра», 1964.

Бабушкин В. Д., Глазунов И. С., Гольдберг В. М. Основные принципы эксплуатации и оценка запасов крупных линз пресных вод. Госгеолтехиздат, Москва, 1962.

Владимирский В. И. О гидрогеологических критериях при установлении зон санитарной охраны подземных источников водоснабжения. «Разведка и охрана недр», № 8, 1962.

Гольдберг В. М. Изменение минерализации подземных вод при эксплуатации береговых водозаборов. «Разведка и охрана недр», № 12, 1963.

Гуляев Н. Ф. Зоны санитарной охраны подземных источников водоснабжения. Изд. МКХ РСФСР, 1951.

Салтыков Е. В. Проектирование зон санитарной охраны источников водоснабжения. Изд. МКХ, 1959.

Форхгеймер Ф. Гидравлика. ОНТИ, 1935.

Шестаков В. М. Расчет водопозитивных установок сложенных контуров в плаце. Сб. «Опыт искусственного понижения уровня грунтовых вод на строительстве ГЭС». Госэнергоиздат, 1956.

Шестаков В. М. Основы гидрогеологических расчетов при фильтрации из хранилищ промышленных стоков. Изд. ВОДГЕО, 1961.

Щелкачев Б. Н. Гидродинамический анализ некоторых методов определения расходов подземных потоков. «Советская геология», № 26, 1947.

Melzer A. Cu privire la determinarea distanțelor de protecție sanitara la captările de apă siberana. Hidrotehnica, 1957, 2, № 3, 119—121, 97—98.

Melzer A. Problemele principale ale corcotařilor în domeniul miscării apei siberane. Hidrotehnica, 1958, 3, № 7, 256—262.

Trofin P. Calculul distanțelor de protecție sanitara la captările cu puturi, alimentate prin unfiltratie dinriu. Hidrotehnica, 1956, т. 1, № 2, 78—84.

Cioc D. Calculul distanțelor de protecție sanitara la captările prin puturi. Hidrotehnica, 1956, 1, № 1, 23—21.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Глава 1. Состояние вопроса	6
Глава 2. Методические основы расчета и выделения зон санитарной охраны	11
Глава 3. Выделение зон санитарной охраны водозаборов, работающих в условиях неограниченного водоносного пласта	20
Глава 4. Выделение зон санитарной охраны водозаборов, работающих в условиях полуограниченного фильтрационного потока	57
Глава 5. Выделение зон санитарной охраны водозаборов, работающих в условиях, отличных от рассмотренных в главах 3 и 4	97
Глава 6. Материалы и исследования, необходимые для гидрогеологического обоснования зон санитарной охраны	103
Глава 7. Размещение водозаборов при наличии или возможном возникновении в пределах разведываемого участка очагов загрязнения подземных вод	119

ЕФИМ ЛЬВОВИЧ МИНКИН

ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ ЗОН САНИТАРНОЙ ОХРАНЫ ВОДОЗАБОРОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД

Ведущий редактор *В. С. Потапов*

Технический редактор *В. И. Алексеева*

Корректор *В. И. Ионкина*

Обложка художника *А. Е. Чучканова*

Подписано к набору 21/IV 1967 г.

Подписано к печати 7/VIII-1967 г.

Формат 60×90^{1/16} Бум. № 3 Печ. л. 7,75

Уч.-изд. л. 6,96

Т-08297

Тираж 3000 экз.

Заказ № 811/9264—2

Цена 42 коп.

Индекс 3—4—1.