Министерство угольной промышленности СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ленинград
1986

gost.e-ecolog.ru

Министерство угольной промышленности СССР

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГОРНОЙ ГЕОМЕХАНИКИ И МАРКШЕЙДЕРСКОГО ДЕЛА
ВНИМИ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО МЕТОДИКЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ДЛЯ ПРОГНОЗА УСЛОВИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Ленинград
1986

УДК 556.332

Рекомендации по методике определения гидрогеологических параметров для прогноза условий строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий. Л., 1986. — 116 с. (М-во угольной пром-сти СССР. Всесоюз. ордена Трудового Красного Знамени НИИ горн. геомех. и маркшейд. дела)

Изложены рекомендации по определению гидрогеологических параметров при опытно-фильтрационных работах и режимных наблюдениях на месторождениях полезных ископаемых. Систематизированы аналитические зависимости для оценки параметров, сформулированы рекомендации по применению электрических моделей и электронно-вычислительных машин для интерпретации исходной гидрогеологической информации. Изложены указания по оценке погрешностей при определении фильтрационных параметров по результатам наблюдений за режимом подземных вод. Рекомендации предназначены для проектных и разведочных организаций, а также для геологических служб шахт и карьеров.

Ил. 33, табл. 29, библиогр. 39.

© Всесоюзный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский институт горной геомеханики и маркшейдерского дела ВНИМИ. 1986.

ВВЕДЕНИЕ

Проекты осушения карьерных и шахтных полей, а также мероприятия по охране подземных вод от вредного влияния горнодобывающих предприятий базируются на результатах гидрогеологических прогнозов, достоверность которых зависит прежде всего от обоснованности гидрогеологической схематизации реальных природных условий, в частности, от качества расчетных гидрогеологических параметров. Каждая стадия освоения месторождения характеризуется определенными возможностями изучения гидрогеологических условий. Эти возможности предопределяют детальность и надежность расчетных схем, на базе которых прогнозируют изменения режима подземных вод под влиянием горных и дренажных работ. Следует подчеркнуть, что прогноз наиболее достоверен в рамках гидродинамических схем, так как область применения методов гидрогеологической аналогии и балансовых ограничена. Эти методы не могут быть рекомендованы для проектирования дренажных, природоохранных и других инженерных мероприятий. С отмеченных позиций, на стадии разведки месторождений по результатам буровых, геофизических и опытно-фильтрационных работ могут быть сформированы общие представления о гидрогеологической структуре изучаемого объекта и получены лишь основные расчетные характеристики выделенных водоносных горизонтов: параметры проводимости (коэффициенты фильтрации), коэффициенты пьезопроводности (уровнепроводности) и в некоторых случаях — параметры взаимосвязи горизонтов.

По результатам разведочных работ не удается, как правило, получить данные о параметрах питания водоносных горизонтов, об условиях на границах последних, а также о гравитационной водоотдаче напорных (в условиях проведения опытных откачек) водоносных горизонтов. Кроме того, на стадии разведки месторождений не может быть получена информация об изменении проницаемости массива горных пород вследствие проявления техногенных процессов, а также об изменении условий и параметров питания водоносных горизонтов при их дренировании. В связи с этим, при обосновании инженерных мероприятий указанные гидрогеологические характеристики приходится назначать, ориентируясь на методы гидрогеологической аналогии и экспертные оценки, что не может гарантировать достоверность последующего прогноза техногенного режима подземных вод.

В период строительства и на первых стадиях эксплуатации горно-добывающих предприятий появляется реальная возможность уточнения принятых гидродинамических схем и расчетных гидрогеологических параметров при соответствующей организации режимных наблюдений. По результатам этих наблюдений могут быть прежде всего определены параметры питания водоносных горизонтов, параметры их взаимосвязи на значительной площади, условия на границах водоносных горизонтов, уточнены

параметры проводимости и пьезопроводности последних с выявлением параметрической неоднородности в плане и в разрезе. Кроме того, результаты режимных наблюдений на этой стадии освоения месторождений позволяют непосредственно количественно оценить техногенные изменения таких гидрогеологических характеристик, как проницаемость горных пород в кровле подземных горных выработок, интенсивность питания водоносных горизонтов по площади их развития и на границах. Таким образом, интерпретация результатов режимных наблюдений дает возможность существенно повысить достоверность прогнозных гидродинамических схем и обосновать целесообразность корректировки ранее принятых проектных решений. В частности, реализация этих возможностей позволяет вскрыть внутренние резервы запроектированных по результатам разведочных работ дренажных систем, обоснованно изменить направление и объемы дренажных мероприятий, обеспечить повышение эффективности горных работ, их безопасность, а также ограничить вредное влияние горно-технических мероприятий на окружающую среду.

Вопросы организации и методики режимных гидрогеологических наблюдений на угольных месторождениях отражены в соответствующих документах, в частности, в «Методических указаниях по гидрогеологическому обслуживанию угледобывающих предприятий» (ВНИМИ, 1975). Вместе с тем возрастающие требования к технико-экономической эффективности горных работ, увеличение объема дренажных мероприятий при разработке месторождений со сложными гидрогеологическими условиями диктуют необходимость систематической обработки результатов режимных наблюдений шахтными геологическими службами, а также целесообразность тщательной интерпретации этих результатов на стадии корректировки технических проектов.

Следует отметить, что расчетным гидродинамическим схемам, рассматриваемым при прогнозных оценках нарушенного режима подземных вод, присущи специфические особенности, которые обусловлены как геологическими характеристиками угольных месторождений, так и существенным влиянием горно-технических факторов на закономерности техногенного режима. Необходимость учета отмеченных особенностей гидродинамических схем предопределяет ряд специфических требований к определению фильтрационных параметров водоносных горизонтов и характеристик питания последних по результатам разведочных работ и режимных наблюдений.

В данных Рекомендациях рассмотрен порядок интерпретации результатов опытно-фильтрационных опробований слоистых и планово-неоднородных водоносных комплексов. Научно-методические основы интерпретации режимных наблюдений разработаны к настоящему времени менее детально в силу особой сложности так называемых обратных гидрогеологических задач по определению фильтрационных параметров и характеристик питания водо-

носных горизонтов. Обратные задачи лишь в простейших вариантах можно решать аналитически, а в общем случае эти задачи целесообразно анализировать с использованием математических моделей, реализуемых на аналоговых вычислительных машинах (АВМ) или электронных вычислительных машинах (ЭВМ). Необходимо отметить, что в настоящее время АВМ и ЭВМ все шире применяются в практике проектирования систем осушения для прогнозных оценок. В этих условиях эффективность математического моделирования может быть обеспечена лишь при предварительном использовании его для решения обратных гидрогеологических задач.

Особое внимание в Рекомендациях уделено определению параметров питания водоносных горизонтов и параметров связи взаимодействующих горизонтов. Рекомендации содержат также предложения по оценке возможных погрешностей определяемых параметров, что позволяет подойти к количественной характеристике качества прогноза.

Предлагаемые Рекомендации базируются на анализе специальной литературы по рассматриваемому вопросу, на обобщении опыта определения гидрогеологических параметров при разведке и эксплуатации угольных и сланцевых месторождений, а также на специальных теоретических и методических разработках, выполненных институтом ВНИМИ в связи с применением АВМ и ЭВМ для решения прогнозных и обратных гидрогеологических задач.

Первая редакция Рекомендаций рассмотрена «Гипрошахтом», ИГД им. А. А. Скочинского, ВИОГЕМ, «Гипрорудой», Ленинградским горным институтом, УкрНИИпроектом. Замечания и предложения этих организаций учтены при подготовке работы к изданию.

Работа рассмотрена и рекомендована к изданию секцией маркшейдерской службы и шахтной геологии Научно-технического совета Минуглепрома СССР (г. Новокузнецк, 19 сентября 1984 г.) и одобрена ВГО «Союзуглегеология».

Рекомендации предназначены прежде всего для проектных и разведочных организаций, могут быть использованы геологическими службами, проводящими гидрогеологические работы на месторождениях твердых полезных ископаемых, занимающимися вопросами дренирования карьерных и шахтных полей, а также обеспечивающими выполнение природоохранных мероприятий.

1. ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННОГО РЕЖИМА ПОДЗЕМНЫХ ВОД ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ УГОЛЬНЫХ (СЛАНЦЕВЫХ) МЕСТОРОЖДЕНИЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ СХЕМ

1.1. Специфика техногенного режима подземных вод

Эксплуатация угледобывающих предприятий обычно сопровождается существенными изменениями естественного режима подземных вод. Проходка горных выработок и реализация дренажных мероприятий приводят прежде всего к изменению условий разгрузки подземных вод, к появлению техногенных контуров дренажа, к изменению направления, градиентов и фильтрационных расходов потоков подземных вод. Эти изменения зачастую происходят в течение длительного периода, продолжительность которого нередко оказывается соизмеримой со сроком эксплуатации горно-добывающего предприятия.

Нестационарность техногенного режима подземных вод, связанная со сработкой их статических запасов, является одной из главных особенностей гидродинамических схем, рассматриваемых при анализе изменений естественных гидрогеологических условий. Кроме того, заметное снижение напоров подземных вод в пределах карьерных и шахтных полей может приводить и зачастую приводит к существенному изменению условий питания водоносных горизонтов. В частности, поверхностные водоемы и водотоки, которые в условиях естественного режима водоносных горизонтов обычно являются границами их дренажа, становятся источниками их питания при нарушенном режиме. Нередко интенсифицируется питание дренируемых водоносных горизонтов по площади их развития за счет увеличения просачивания атмосферных вод. При наличии нескольких водоносных горизонтов зачастую развиваются процессы перетекания через слабопроницаемые слои в дренируемые водоносные пласты из смежных пластов и структур. Изменение условий и параметров питания водоносных горизонтов по площади их развития особенно ощутимо при ведении очистных горных работ с управлением кровлей полным обрушением. Общая интенсификация питания водоносных горизонтов нередко компенсирует сработку их статических запасов и способствует стабилизации нарушенного режима. С другой стороны, снижение напоров водоносных горизонтов на контурах горных выработок на десятки и нередко сотни метров приводит к «истощению» водоносных структур при ограниченном их питании. При этом развиваются сложные нелинейные процессы, характеризующиеся изменением расчетных фильтрационных параметров и граничных условий дренируемых горизонтов (в том числе условий их питания и разгрузки).

Режим водоносных горизонтов зависит от технологии горных работ, определяющей специфику условий разгрузки дренируемых горизонтов. В частности, при ведении открытых горных работ на режим вскрытых водоносных горизонтов существенно влияет скорость движения бортов разрезов, их ориентация по отношению к границам питания и т. д. При разработке месторождений подземным способом технологические факторы влияют на закономерности нарушенного режима при изменениях проницаемости массива горных пород по площади очистных работ. Характер этих изменений определяет в данном случае условия на границах дренажа водоносных горизонтов.

Широкие масштабы дренирования водоносных структур по площади и в разрезе стимулируют существенное проявление фильтрационной неоднородности, характерной для стратифицированных угленосных отложений. Эта неоднородность зачастую полностью определяет характер техногенного режима подземных вод и поэтому является предметом тщательного анализа.

1.2. Классификация расчетных гидродинамических схем

Гидродинамические схемы, отражающие различные формы техногенного режима водоносных горизонтов, можно сгруппировать, выделив следующие их основные классы:

— I класс. Режим фильтрации стационарный, питание водоносных горизонтов по площади их развития отсутствует;

— II класс. Режим водоносных горизонтов явно нестационарный, питание по площади отсутствует;

- III класс. Характер техногенного режима определяется наличием инфильтрационного питания по площади развития горизонтов (при стационарности или нестационарности режима);

— IV класс. Характер техногенного режима водоносных комплексов определяется проявлением взаимодействия смежных горизонтов (при стационарности или нестационарности этого режима);

- V класс. Режим водоносных горизонтов характеризуется особой сложностью нелинейных фильтрационных процессов.

Таким образом, классы расчетных схем выделяют по главному признаку — характеру основных источников питания водоносных горизонтов и его проявлению в условиях техногенного режима. Выделение классов расчетных схем может быть проведено предварительно на основе анализа гидрогеологического строения месторождения и характера проектируемых горных работ с учетом метеорологических и гидрологических условий района, что позволяет провести подобную классификацию уже на стадии разведки. В дальнейшем классификация объекта может быть уточнена (или полностью пересмотрена) по данным разведочных работ и окончательно скорректирована по результатам режимных наблюдений на стадии эксплуатации угледобывающего предприятия.

Сложность анализа предлагаемых расчетных схем возрастает от первого класса к пятому. В соответствии с этим повышаются требования к составу и объему исходной гидрогеологической информации, необходимой для обоснования расчетной схемы, определения фильтрационных параметров и характеристик питания водоносных горизонтов.

Наиболее простые схемы I класса характеризуются следующими параметрами: проводимостью горизонта, напорами на границах питания и дренажа, дополнительными сопротивлениями, определяющими степень совершенства этих границ. Для схем II класса указанные характеристики дополняются емкостными параметрами горизонта, а для схем III класса — интенсивностью питания горизонта по площади. Схемы IV класса дополнительно характеризуются параметрами перетекания через относительные водоупоры, напорами питающих водоносных горизонтов. Схемы V класса требуют детальных сведений о строении водоносного комплекса, проницаемости и водоотдаче отдельных его элементов.

В пределах каждого класса расчетных схем можно выделить различные группы по ряду дополнительных признаков (взаимное расположение границ и условия на них, наличие фильтрационной неоднородности в плане или разрезе, характер инфильтрационного питания и т. д.).

При анализе материалов режимных наблюдений эта классификация может быть использована непосредственно в процессе интерпретации натурных данных, так как методика определения гидрогеологических параметров неотделима от конкретной расчетной схемы, в рамках которой оценивают параметры.

Классификация расчетных схем в дальнейшем позволяет систематизировать изложение методических аспектов анализа результатов режимных наблюдений.

Предлагаемая классификация расчетных гидродинамических схем позволяет на стадии разведки целенаправленно планировать опытно-фильтрационные работы, регламентировать состав гидрогеологических параметров и порядок их определения при опытных откачках или опытно-эксплуатационных водопонижениях. Вместе с тем гидродинамические схемы при опытно-фильтрационных работах чаще всего не совпадают с прогнозными, поэтому необходима специальная увязка тех и других схем для получения достоверных исходных данных для прогноза.

Следует отметить, что все расчетные схемы (независимо от принадлежности к тому или иному классу) при их интерпретации можно разделить на две крупные категории:

1) типовые,

2) сложные.

Типовые схемы предполагают возможность применения для их анализа конечных аналитических зависимостей при следующих условиях:

— простейшая конфигурация области фильтрации (типовая структура потока);

— однородность водоносного горизонта;

— линейность процесса фильтрации;

— совершенство границ питания и дренажа.

Сложные схемы выходят за рамки этих условий, и поэтому их эффективный анализ, в принципе, возможен лишь с привлечением математического моделирования.

Определение гидрогеологических параметров по результатам опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений целесообразно проводить вначале на уровне предварительных оценок в рамках типовых схем. Затем следует переходить к анализу сложных схем при наличии соответствующей исходной информации. Выполнение принципа этапности гидрогеологических исследований обеспечивает их оптимизацию и повышение достоверности гидрогеологических параметров.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ КУСТОВЫХ ОТКАЧЕК

2.1. Постановка задачи

При опробовании водоносных толщ кустовыми откачками достоверно решают некоторый ограниченный круг вопросов идентификации гидрогеологического строения исследуемой области фильтрации, что обусловлено техническими возможностями и сроками изысканий, с одной стороны, требуемой точностью и направленностью гидрогеологических прогнозов, с другой. Результаты, полученные на отдельных наиболее типичных («ключевых») для данной гидродинамической схемы участках, экстраполируются затем с учетом данных о закономерностях геологического строения, режимных наблюдений, опытно-эксплуатационного водопонижения на остальную область фильтрации. При планировании гидрогеологических исследований области фильтрации сложного строения подразделяют на подобласти, характеризующиеся локально однородными параметрами, достаточно надежно определяемыми по данным опытных работ. Конечной задачей интерпретации данных кустовой откачки является идентификация схемы фильтрации в пределах опытного участка, расчет фильтрационных параметров, а также определение граничных условий и условий питания опробуемого водоносного горизонта.

Метод интерпретации данных кустовых откачек, основанный на использовании специального графического представления информации о реакции области фильтрации на возмущение, позволяет оперативно оценить соответствие этой информации возможным расчетным схемам, выбрать наиболее подходящую схему расчета и вычислить фильтрационные параметры.

Основное дифференциальное уравнение материального баланса, используемое при анализе данных опытных фильтрационных работ, имеет вид:

$$\partial Q(r,t)/\partial r = 2\pi\mu r\,\partial S/\partial t + f(r,t), \qquad (1)$$

где Q — расход потока подземных вод к опытной скважине; r — расстояние от опытной скважины; t — время; μ — водоотдача; S — понижение уровня подземных вод; $f(r, t)$ — функция, учитывающая питание водоносного горизонта за счет взаимодействия с другими водоносными горизонтами, инфильтрации (перетекания) по площади и на линейных границах области.

Расход потока подземных вод определяют из выражения:

$$Q = -2\pi rT\,\partial S/\partial r, \qquad (2)$$

где T — проводимость водоносного горизонта.

Подставив выражение (2) в формулу (1), получим

$$\partial^2 S/\partial r^2 + [\partial S/\partial r]/r = (1/a)\ [\partial S/\partial t] + f(r,\ t)/2\pi rT, \quad (3)$$

где a — коэффициент пьезопроводности водоносного горизонта.

Типичными для условий угольных месторождений являются следующие схемы:

— бесконечный изолированный пласт (горизонтальное залегание, выдержанные водоупоры): $f(r,\ t) \equiv 0$;

— бесконечный открытый пласт с инфильтрацией (горизонтальное залегание, водоносный горизонт перекрыт рыхлыми отложениями): $f(r,\ t) = 2\pi r\omega(t)$, где $\omega(t)$ — интенсивность инфильтрации;

— бесконечный открытый пласт, перекрытый слабопроницаемым мощным слоем с водоотдачей: $f(r, t) = -2\pi r k_0\, \partial S(r, t, z_0)/\partial z$, где k_0 — коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя; $S(r,\ t,\ z_0)$ — понижение уровня на границе водоносного горизонта со слабопроницаемым слоем; вектор z направлен по нормали к кровле (почве) водоносного горизонта (двухслойная схема);

— бесконечный пласт, перекрытый слабопроницаемым (разделяющим) слоем относительно небольшой мощности, на котором залегает взаимодействующий водоносный горизонт: $f(r,\ t) = f(r, t, S, m_0, k_0, \mu_0, S_1, T_1, a_1)$, где m_0, k_0, μ_0 — мощность, коэффициент фильтрации и водоотдача разделяющего слоя; S_1, T_1, a_1 — понижение уровня, проводимость и пьезопроводность взаимодействующего водоносного горизонта. Вид функции $f(r,\ t)$ определяется решением системы уравнений:

$$\frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{\partial S}{r\partial r} = \frac{\partial S}{a\partial t} + \frac{k_0}{m_0 T}(S - S_1);$$

$$\frac{\partial^2 S_1}{\partial r^2} + \frac{\partial S_1}{r\partial r} = \frac{\partial S_1}{a_1\partial t} + \frac{k_0}{m_0 T_1}(S_1 - S), \quad (4)$$

если величиной $\mu_0 \cdot m_0$ можно пренебречь (жесткая фильтрация в разделяющем слое); при условии $S_1 \ll S$ функция питания имеет вид: $f(r,\ t) = 2\pi r\,(k_0/m_0)\,S(r,\ t)$;

— безнапорный водоносный горизонт, характеризующийся переменной в процессе дренирования водоотдачей;

— ограниченные в плане водоносные горизонты с различными условиями на границах;

— неоднородные в плане водоносные горизонты.

Наряду с основным уравнением (1), используют уравнение материального баланса одномерной фильтрации:

$$\partial q/\partial x = \mu\partial S/\partial t + f(x,\ t), \quad (5)$$

где q — погонный расход; x — расстояние от линейного источника возмущения; $f(x,\ t)$ — функция питания.

Применение уравнения (5) реализуется в следующих схемах:

— при откачках из линейных рядов скважин, вытянутых котлованов — в зоне, в которой течение близко к одномерному;

— для описания фильтрации в разделяющем слабопроницаемом слое;

— при описании течения к скважине по пласту-полосе.

Для идентификации перечисленных схем и определения фильтрационных параметров водоносных горизонтов по данным кустовых откачек разработаны методические приемы по технической реализации универсального метода интерпретации откачек — метода типовых кривых.

2.2. Принципы интерпретации откачек методом типовых кривых

Результаты кустовых откачек представляют в виде таблиц данных понижений уровней и расхода откачки: $S = f(r', t)$*, $S(r, t')$, $Q = f(t)$, где $S(r', t)$ — функция понижения при временном прослеживании уровня в заданной наблюдательной скважине, удаленной от центральной скважины на расстояние r'; $S(r, t')$ — функция понижения при площадном прослеживании уровня для заданного фиксированного момента t' от начала откачки.

Эти таблицы служат исходным материалом для расчета фильтрационных параметров водоносного горизонта, параметров перетекания и граничных условий. Наибольший объем информации может быть получен при анализе таблиц временного прослеживания $S = f(r', t)$, поэтому основное внимание при рассмотрении способов обработки результатов кустовых откачек уделено методу типовых кривых временного прослеживания $F(\lambda, t)$. Этот метод позволяет сравнивать графики $S(t)$, полученные при откачке, с графиками функций $F(\lambda, t)$, описывающих понижения уровней для условий, соответствующих одной из схем фильтрации. Функцию $F(\lambda, t)$, описывающую решение для данной схемы фильтрации, называют *типовой*, а ее график, построенный в координатах, выбранных таким образом, чтобы обеспечить совпадение этого графика с графиком понижения уровня в наблюдательных скважинах, построенного в соответствующей координатной системе, называют *типовым*. Для построения типового графика функций, зависящих от переменной (времени t, либо пространственной координаты x или z) и от других параметров схемы фильтрации, не зависящих от этой переменной, необходимо выбрать систему координат, облегчающую совмещение графика фактических данных $S(r, t)$ с типовым графиком. Для анализа функций понижения вида $S = cF(\alpha t)$, описываемых типовой функцией, зависящей от линейной комбинации переменных, используется построение графиков типовой функции $y = F(x)$ и графика понижения уровней $S = cF(\alpha t)$, где c, α — некоторые константы, в билогарифмическом

---

* Здесь и далее переменная со знаком «штрих» — фиксированная.

масштабе. При этом используется свойство логарифмов переводить произведение объектов в их сумму. Перевод функций в билогарифмический масштаб показан в табл. 1.

Таблица 1

Операция	Функция понижения	Типовая функция
Исходная запись	$S=cF(\alpha t)$	$y=F(x)$
Логарифмирование функций и аргументов (билогарифмирование)	$\ln S=\ln c+\ln F(\ln\alpha+\ln t)$	$\ln y=\ln F(\ln x)$
Перенаименование функций и аргументов	$\ln S=S_l$; $\ln c=S_{0l}$, $\ln\alpha=\alpha_l$, $\ln t=t_l$, $\ln F(\alpha_l+t_l)=F_l(\alpha_l+t_l)$	$\ln x=x_l$, $\ln F(x_l)=F_l(x_l)$, $\ln y=y_l$
Запись в билогарифмическом масштабе	$S_l=S_{0l}+F_l(\alpha_l+t_l)$	$y_l=F_l(x_l)$

После билогарифмирования преобразованные функция понижения и типовая функция в координатах соответственно $x_l\sim\alpha_l+t_l$, $y\sim S_l-S_{0l}$ тождественны (см. табл. 1). Это значит, что график функции понижения, построенный в билогарифмическом масштабе, должен совместиться всеми точками с графиком типовой функции, построенным также в билогарифмическом масштабе, если при совмещении графиков соответствующие координатные оси параллельны ($t\parallel x$, $S\parallel y$). При этом во всех точках совмещенных графиков выполнены соотношения

$$y_l=S_l-S_{0l};\quad x_l=\alpha_l+t_l \tag{6}$$

на основании которых могут быть вычислены значения параметров c и α по формулам

$$S(0)=cF(0);\ c=S(0)/F(0);\ \alpha t(0)=x(0);\ \alpha=x(0)/t(0),. \tag{7}$$

где индексом (0) отмечены значения функций и аргументов обоих графиков в любой произвольной точке их совмещения.

Аналогичным образом может быть обработана выборка данных вида $S(r, t')$, если известно решение, описывающее зависимость понижения уровней по площади депрессионной воронки для данной схемы фильтрации. Принцип построения графика типовой кривой в билогарифмическом масштабе для функции $y=F(\alpha r)$ аналогичен изложенному выше.

2.3. Основные гидродинамические схемы, используемые при интерпретации откачек

2.3.1. Схема изолированного пласта

Обработка результатов откачки проводится расчетом по формуле Тейса [2]:

$$S = [Q/4\pi T]\, Ei(-r^2/4at). \qquad (8)$$

Значения функции $Ei(-x)$, необходимые для построения типовой кривой, приведены в табл. 2. Кривую строят на кальке, наложенной на формат билогарифмической бумаги (рис. 1)*, в диапазоне значений $10^{-5} \leqslant x \leqslant 3$ и $0{,}01 \leqslant y \leqslant 10$.

Построенную кривую и сетку координат затем обводят с обратной стороны чертежа, чем достигается трансформация функции $y(x)$ в функцию $y(1/x)$, более удобную для использования (рис. 2), поскольку графики $S(t)$ технически проще строить в координатах S—t.

Таблица 2

x	1 (—5)	3 (—5)	5 (—5)	1 (—4)	3 (—4)	5 (—4)	1 (—3)	3 (—3)	5 (—3)
$Ei(-x)$	10,7	9,7	9,2	8,6	7,5	7,0	6,3	5,2	4,8

Окончание табл. 2

x	0,01	0,03	0,05	0,1	0,3	0,5	1,0	2,0	3,0
$Ei(-x)$	4,0	3,0	2,47	1,82	0,91	0,56	0,22	0,049	0,013

Графики $S(r', t)$ замеров уровней в наблюдательных скважинах наносят также на кальку в билогарифмическом масштабе. Желательно каждый график наносить отдельно, чтобы была возможность совмещать его не только с типовой кривой, но и с другими графиками. График $S(t)$ совмещается с типовым при соблюдении условия параллельности координатных осей. Точка совмещения может быть любой, однако для удобства предпочтительнее снимать с совмещенного графика $S(t)$ значения S_0 и t_0, соответствующие значениям $x=1$ и $y=1$ типового графика. Это упрощает вычисление параметров, которое проводится по формулам

$$T = Q/4\pi S_0; \qquad a = r'^2/4t_0. \qquad (9)$$

Графики $S(t)$ строят с использованием произвольной системы размерностей $[S]$ и $[t]$, обусловленной точностью замеров уровней, продолжительностью откачки и т. д. При вычислении параметров должен быть выполнен перевод размерности, использованной при

* Рисунки 1—20 приведены в прил. 3 (вкладка).

построении графиков, в стандартную: $[T] = [м^2/сут]$, $[a] = [м^2/сут]$. При расчете параметра проводимости допустимо использовать следующие соотношения:

$$T \approx 2Q/S_0, \qquad [Q] = [м^3/ч], \qquad [S] = [м];$$
$$T \approx 7{,}2Q/S_0, \qquad [Q] = [л/с]. \tag{10}$$

Поскольку функция $Ei(-1/x)$ при малых значениях x приближается к функции $\ln 1{,}78x$, то при условии $x < 0{,}1$ параметры можно рассчитать по «стандартной» методике [3, 4, 18], используя зависимость

$$S = [Q/4\pi T] \ln (2{,}25at/r^2). \tag{11}$$

График $S(t)$ для этого случая строят на полулогарифмической бумаге. Тогда типовая кривая имеет вид прямой $y = kx + b$, параметры k и b соответственно, равны $k = Q/4\pi T$, $b = [Q/4\pi T] \times \times \ln (2{,}25a/r'^2)$. В точке графика с координатами $(S = 0, t_0)$ выполнено соотношение

$$t_0 = r'^2/2{,}25a, \tag{12}$$

позволяющее определить пьезопроводность $a = r'^2/2{,}25t_0$. Пусть ΔS_{1-10} — разность понижений уровней в точках, отличающихся по времени на порядок, тогда

$$\Delta S_{1-10} = S_{10} - S_1 = 2{,}3Q/4\pi T, \tag{13}$$

откуда параметр $T = 2{,}3Q/4\pi\Delta S_{1-10}$; $T = 4{,}6Q/\Delta S_{1-10}$, если $[T] = = [м^2/сут]$, $[Q] = [м^3/ч]$. Величина $T = 16{,}5Q/\Delta S_{1-10}$, если $[T] = [м^2/сут]$, $[Q] = [л/с]$.

При обработке данных площадного прослеживания, т. е. графиков $S(r, t)$, на фиксированный момент t' для нескольких наблюдательных скважин, можно либо использовать типовой график (рис. 3), построенный специально для этой цели в координатах $y \sim \sqrt{x}$, либо выполнить построение графиков $S(r,t')$ в координатах $S \sim r^2$ и воспользоваться типовой кривой $Ei(-x)$, применяемой для обработки графиков временного прослеживания. Значения функции $Ei(-\sqrt{x})$ приведены в табл. 3.

При использовании типовой кривой $Ei(-x)$ график $S = f(r^2, t')$ совмещают с типовой кривой, построенной на обратной стороне чертежа (по отношению к графику типовой кривой, используемой при обработке графиков $S(t, r')$. В точке совмещения графиков с координатами $(x = 1, y = 1)$, (S_0, r_0) выполняются равенства:

$$S_0 = Q/4\pi T; \qquad r_0^2/4at' = 1. \tag{14}$$

При использовании типовой кривой $Ei(-\sqrt{x})$ график $S(r, t')$, построенный на билогарифмической бумаге, совмещают с этой типовой кривой точно так же, как и в предыдущем случае. В точке совмещения с координатами типового графика (1, 1) выполняются соотношения:

Таблица 3

$\sqrt{x}$	3,15 (—3)	5,5 (—3)	7,1 (—3)	1 (—2)	1,74 (—2)
$Ei(-\sqrt{x})$	10,7	9,7	9,2	8,6	7,5

Продолж. табл. 3

$\sqrt{x}$	2,25 (—2)	3,15 (—2)	5,5 (—2)	$7{,}1\cdot10^{-2}$	0,1
$Ei(-\sqrt{x})$	7,0	6,3	5,2	4,8	4,1

Окончание табл. 3

$\sqrt{x}$	0,174	0,225	0,315	0,55	0,71	1	1,4	1,7
$Ei(-\sqrt{x})$	3,0	2,47	1,82	0,91	0,56	0,22	0,049	0,013

$$S_0 = Q/4\pi T; \qquad r_0/2\sqrt{at'} = 1, \tag{15}$$

где (S_0, r_0) — координаты точки совмещения на графике $S(r, t')$.

Если выполнено условие $r^2/4at \leqslant 0{,}1$, то график $S(r, t')$ трансформируется в прямую линию $y = kx + b$ при построении его в полулогарифмическом масштабе. При этом в точке графика $S_0 = 0$ величина $r_0 = \sqrt{2{,}25at'}$, откуда значения $\Delta S_{1-10} = 4{,}6Q/4\pi T$, $T \approx 9{,}2/\Delta S_{1-10}$, если $[T] = [м^2/сут]$, $[Q] = [м^3/ч]$, $\Delta S_{1-10} = S(r_1) - S(r_{10} = 10r_1)$.

2.3.2. Схема пласта с перетеканием

Для расчета используют формулу Хантуша [5]:

$$S = [Q/4\pi T]W(r^2/4at,\ r/B). \tag{16}$$

Функция $W(u, \beta)$ широко табулирована. Достаточное для построения типовой кривой количество значений функции приведено в табл. 4.

Для каждого значения параметра $\beta = r/B$ по правилам, изложенным в п. 2.3.1, следует построить свою типовую кривую $W(u, \beta')$ и свести процедуру обработки графиков $S(t, r')$ к их совмещению с наиболее близко совпадающей с ним типовой кривой из набора кривых, соответствующих функции $W(u, \beta)$. В точках совмещения графиков $S(r', t)$ и $W(u, \beta')$, построенных на билогарифмической бумаге (рис. 4), выполняются условия

$$r'/B = \beta'_0; \qquad r'^2/4at_0 = 1; \qquad S_0 = Q/4\pi T, \tag{17}$$

если (S_0, t_0) — точка совмещения графика $S(r', t)$ с точкой графика функции $W(u, \beta')$ с координатами (1, 1).

Обработка графиков $S = f(r, t')$ площадного прослеживания для фиксированного момента времени t' может быть проведена

Таблица 4

u	β											
	0,001	0,005	0,01	0,05	0,1	0,15	0,3	0,5	0,8	1,0	2,0	3,0
10^{-6}	13,0	10,8	9,44	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
$2 \cdot 10^{-6}$	12,4	10,8	9,44	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
$5 \cdot 10^{-6}$	11,6	10,7	9,44	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
10^{-5}	10,9	10,4	9,4	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
2(—5)	10,2	10,0	9,3	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
5(—5)	9,3	9,2	8,9	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
1(—4)	8,6	8,6	8,4	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
2(—4)	7,9	7,9	7,8	6,2	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
5(—4)	7,0	7,0	7,0	6,1	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
1(—3)	6,3	6,3	6,3	5,8	4,8	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
2(—3)	5,6	5,6	5,6	5,4	4,7	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
5(—3)	4,7	4,7	4,7	4,6	4,3	3,5	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
1(—2)	4,0	4,0	4,0	4,0	3,8	3,3	2,7	1,85	1,13	0,84	0,23	0,07
2(—2)	3,4	3,4	3,4	3,4	3,2	3,0	2,6	1,84	1,13	0,84	0,23	0,07
5(—2)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,4	2,3	2,1	1,7	1,12	0,84	0,23	0,07
0,1	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,75	1,7	1,4	1,05	0,82	0,23	0,07
0,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,16	1,06	0,86	0,71	0,23	0,070
0,5	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,56	0,54	0,52	0,46	0,42	0,19	0,068
1,0	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,20	0,19	0,11	0,053
2,0	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,021
5,0	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,0008

α	β											
	0,001	0,005	0,01	0,05	0,007	0,1	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
0,001	13,0	10,8	9,4	6,23	5,46	4,83	1,85	1,55	1,32	1,13	0,97	0,84
0,002	13,0	10,8	9,4	6,23	5,46	4,83	1,85	1,55	1,32	1,13	0,97	0,84
0,005	13,0	10,8	9 4	6,23	5.46	4.83	1,85	1,55	1,32	1,13	0,97	0,84
0,01	13.0	10.8	9,4	6.23	5.46	4,83	1,85	1,55	1,32	1,13	0,97	0,84
0,02	13,0	10,8	9 4	6.23	5,46	4,83	1,85	1,55	1,32	1.13	0,97	0,84
0,05	13,0	10,8	9.4	6,23	5.42	4.83	1,85	1,55	1,32	1,13	0,97	0,84
0,1	13,0	10,8	9,42	6,20	5.41	4.83	1,82	1,53	1,30	1,11	0,95	0,82
0,2	13.0	10,7	9 30	6,08	5,41	4.71	1,71	1,42	1,18	1,00	0,86	0,71
0,5	13,0	10,3	8.88	5.70	4.99	4,30	1,35	1,06	0 82	0.68	0,53	0,42
1	13,0	9,95	8,40	5.19	4.47	3.82	0.94	0,67	0,49	0.37	0,26	0,18
2	12,4	9,20	7,82	4,61	3 92	3,24	0.52	0,33	0.20	0,16	0,093	0,044
5	11,6	8,39	6,98	3,82	3.11	2,43	0.17	0,089	0,030	0.011	0,004	0,0011
10	10,9	7,31	6,31	3,14	2,44	1.80	0.032	0,013	0,0011	—	—	—
20	10,2	7,01	5.63	2,46	1,81	1,22	0,0011	—	—	—	—	—
50	9,32	6,16	4.72	1,77	1,06	0,56	—	—	—	—	—	—
100	8,63	5,44	4.04	1,06	0,56	0,22	—	—	—	—	—	—
200	7,94	4,72	3.35	0,56	0,22	0 049	—	—	—	—	—	—
500	7,02	3,87	2.47	0,18	0,031	0,0011	—	—	—	—	—	—
1000	6,33	3,16	1.82	0,03	0.0011	—	—	—	—	—	—	—
2000	5,64	2,47	1,22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5000	4,73	1,67	0,56	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10000	4,04	1,06	0.22	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1 \cdot 10^5$	1,82	0,23	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1 \cdot 10^6$	0,22	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 5*

α	β									
	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7
0,001	0,43	0,23	0,12	0,070	0,039	0,022	0,013	0,0074	0,0025	0,0008
0,002	0,43	0,23	0,12	0,07	0,039	0,022	0,013	0,0074	0,0025	0,0008
0,005	0,43	0,23	0,12	0,07	0,039	0,022	0,013	0,0074	0,0025	0,0008
0,01	0,43	0,23	0,12	0,07	0,039	0,022	0,013	0,0074	0,0025	0,0008
0,02	0,43	0,23	0,12	0,070	0,039	0,022	0,013	0,0074	0,0025	0,0008
0,05	0,43	0,23	0,12	0,068	0,038	0,0218	0,012	0,0068	0,002	0,0007
0,1	0,43	0,21	0,11	0,057	0,029	0,014	0,008	0,0039	0,0009	0,0001
0,2	0,32	0,14	0,067	0,028	0,011	0,004	0,0013	0,0004	—	—
0,5	0,14	0,034	0,0079	0,0020	—	—	—	—	—	—
1	0,013	0,0031	—	—	—	—	—	—	—	—
2	0,022	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
500	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
10000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1 \cdot 10^5$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$1 \cdot 10^6$	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

*Таблица рассчитана И. Н. Мельниковой.

с помощью типовых кривых $W(\alpha', \beta)$, т. е. при фиксированных значениях $\alpha = B^2/4at$ (рассматриваемых как параметр) и изменяющемся аргументе $\beta = r/B$ (табл. 5 и рис. 5).

График $S(r, t')$, построенный на билогарифмической бумаге, совмещают с одной из типовых кривых $W(\alpha', \beta)$. В точке совмещения с координатами типового графика (1, 1) выполняются соотношения:

$$r_0/B = 1; \qquad B^2/4at' = \alpha'_0; \qquad Q/4\pi T = S_0, \quad (18)$$

где r_0, S_0 — координаты точки совмещения графика $S(r, t')$ с точкой (1, 1) типовой кривой $W(\alpha', \beta)$.

При выполнении условия $u < 0{,}1\beta^2$ или $\alpha < 10^{-1}$ функция $W(u, \beta)$ аппроксимируется с большой точностью выражением $2K_0(\beta)$, и понижения уровней в водоносном горизонте описываются зависимостью для стационарного потока с перетеканием:

$$S = [Q/2\pi T]K_0(r/B), \quad (19)$$

где $K_0(x)$ — функция Бесселя. Для построения типовой кривой (рис. 6) достаточно ее значений [6], приведенных в табл. 6.

Таблица 6

x	10^{-5}	$2\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-5}$	10^{-4}	$2\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$	10^{-3}	$2\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-3}$	0,01
$K_0(x)$	11,6	11,0	10,0	9,3	8,7	7,7	7,0	6,4	5,4	4,7

Окончание табл. 6

x	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	4,8
$K_0(x)$	4,03	3,11	2,43	1,75	0,92	0,36	0,11	0,035	0,011	0,005

Таким образом, при выполнении условия квазистационарности потока, для $t > 2{,}5B^2/a$ графики $S(r, t')$ могут быть обработаны с использованием типовой кривой $K_0(x)$. Координаты S_0, r_0 графика $S(r, t')$, соответствующие координатам точки (1, 1) графика типовой кривой $K_0(x)$, связаны соотношениями

$$r_0 = B; \qquad S_0 = Q/4\pi T. \quad (20)$$

Для значения $x \leqslant 0{,}05$ допустима аппроксимация $K_0(x) = \ln 1{,}12/x$. Если одновременно выполняются условия $r'' \leqslant 0{,}05B$ и $t > 2{,}5B^2/a$:

$$S(r'') = [Q/2\pi T]\ln 1{,}12B/r'', \quad (21)$$

то график $S(r, t')$ трансформируется в прямую при построении его в полулогарифмическом масштабе. Причем в точке графика $S_0 = 0$ величина $r_0 = 1{,}12B$, откуда значения $\Delta S_{1-10} = 2{,}3Q/2\pi T$; $T = 4{,}6Q/\Delta S_{1-10}$, если $[T] = [м^2/сут]$, $[Q] = [м^3/ч]$.

Таблица 7

u	β_1										
	10^{-3}	0,05	0,5	1	2	5	10	20	50	100	200
1(—6)	12,0	8,3	6,0	5,4	4,7	3,8	3,1	2,5	1,7	1,13	0,7
2(—6)	11,5	8,0	5,7	5,0	4,3	3,4	2,8	2,2	1,4	0,9	0,5
5(—6)	10,9	7,5	5,2	4,6	3,9	3,0	2,4	1,8	1,06	0,6	0,31
1(—5)	10,4	7,2	4,9	4,2	3,55	2,7	2,06	1,48	0,83	0,45	0,20
2(—5)	9,8	6,8	4,6	3,9	3,2	2,4	1,8	1,2	0,63	0,31	0,12
5(—5)	9,0	6,4	4,1	3,44	2,78	1,96	1,39	0,9	0,4	0,17	0,04
1(—4)	8,4	6,0	3,8	3,11	2,26	1,67	1,13	0,69	0,27	0,10	0,02
2(—4)	7,8	5,6	3,4	2,78	2,15	1,40	0,9	0,5	0,17	0,05	0,01
5(—4)	6,9	5,1	3,0	2,36	1,76	1,06	0,62	0,31	0,08	0,02	—
1(—3)	6,3	4,7	2,7	2,05	1,48	0,83	0,45	0,20	0,04	0,006	—
2(—3)	5,6	4,3	2,3	1,75	1,21	0,62	0,31	0,12	0,017	0,002	—
5(—3)	4,7	3,7	1,9	1,38	0,9	0,4	0,17	0,05	0,004	—	—
1(—2)	4,0	3,3	1,6	1,11	0,68	0,27	0,10	0,02	—	—	—
2(—2)	3,3	2,8	1,3	0,87	0,49	0,16	0,05	0,008	—	—	—
5(—2)	2,5	2,1	0,95	0,58	0,29	0,08	0,016	—	—	—	—
0,1	1,8	1,6	0,7	0,40	0,18	0,03	0,005	—	—	—	—
0,2	1,2	1,1	0,46	0,24	0,10	0,014	0,0015	—	—	—	—
0,5	0,56	0,5	0,21	0,10	0,03	0,002	—	—	—	—	—
1,0	0,22	0,20	0	0,04	0,010	—	—	—	—	—	—

2.3.3. Схема пласта с перетеканием из мощной слабопроницаемой толщи

Если время откачки t соизмеримо с величиной $t = m_0^2\mu_0'/k_0$, где m_0, μ_0', k_0 — соответственно, мощность, удельная водоотдача и коэффициент фильтрации относительно водоупорного слоя, перекрывающего опробуемый водоносный горизонт, то появляется необходимость учета влияния водоотдачи μ_0' этого слоя на снижение напоров. Для времени $0 < t < 10\,(a_0/m_0^2)^{-1}$, $a_0 = k_0/\mu_0' m_0$ существует аналитическое решение [25], описывающее поведение уровней в водоносном горизонте:

$$S = (Q/4\pi T)H(u,\ \beta_1), \qquad (22)$$

где $u = r^2/4at$; $\beta_1 = r/4\sqrt{k_0\mu_0'/T\mu} = r/4\,k_{\varepsilon\varepsilon}$; $k_{\varepsilon\varepsilon} = \sqrt{T\mu/k_0\mu_0'}$. Функция $H(u,\ \beta_1)$ табулирована в диапазоне значений $10^{-6} < u < 1$ и $10^{-3} < \beta_1 < 500$ для построения достаточного количества типовых кривых $H(u,\ \beta_1')$ с фиксированным параметром β_1 (табл. 7).

Графики откачки $S(r',\ t)$ по обычным правилам совмещают с типовой кривой $H(u,\ \beta_1')$. Каждую типовую кривую для фиксированного параметра $\beta_1 = r'/4k_{\varepsilon\varepsilon}$ строят на кальке в билогарифмическом масштабе точно так же, как и типовую кривую $Ei(-1/x)$.

α_1	β_1							
	10^{-3}	$2\cdot10^{-3}$	$5\cdot10^{-3}$	10^{-2}	$2\cdot10^{-2}$	$5\cdot10^{-2}$	10^{-1}	$2\cdot10^{-1}$
10^4	4,02	2,66	0,90	0,21	0,0036	—	—	—
10^3	6,26	4,88	3,15	1,77	0,67	—	—	—
10^2	8,42	7,04	5,40	3,84	2,50	0,78	0,18	0,0025
10	10,37	8,99	7,0	5,77	4,40	2,50	1,39	0,45
1	11,98	11,06	8,3	7,38	6,00	4,00	2,84	1,60
0,1	—	—	9,8	8,71	7,33	5,40	4,13	2,80
0,01	—	—	—	9,92	8,54	6,80	5,33	3,96
0,001	—	—	—	—	—	7,10	6,49	5,12
0,0001	—	—	—	—	—	9,80	7,65	6,27
10^{-5}	—	—	—	—	—	—	8,90	7,30
10^{-6}	—	—	—	—	—	—	10,00	8,60
10^{-7}	—	—	—	—	—	—	—	
10^{-8}	—	—	—	—	—	—	—	—

В точках совмещения графиков с координатами (1, 1) графика типовой кривой (рис. 7) и (S_0, t_0) графика $S(t, r')$ выполняются соотношения

$$S_0 = Q/4\pi T; \qquad r'^2/4at_0 = 1; \qquad \beta'_{1_0} = r'/4\,k_{\varepsilon\varepsilon}, \qquad (23)$$

из которых находят параметры проводимости T, пьезопроводности a, водоотдачу водоносного горизонта μ, а также комплексный параметр $k_0\mu'_0 = (16\beta'^2_{1_0}/r'^2)T\mu$.

Для обработки графиков $S = f(r, t')$ площадного прослеживания следует воспользоваться типовыми кривыми вида $H(\alpha'_1, \beta_1)$, в которых значения $\alpha_1 = (4T\mu/k_0\mu'_0)1/at = 4k^2_{\varepsilon\varepsilon}/at$; $k_{\varepsilon\varepsilon} = \sqrt{T\mu/k_0\mu'_0}$. При этом значение α'_1 фиксировано для каждой кривой, а величина β_1 — переменная (табл. 8).

Графики $S(r, t')$ при совмещении с одной из кривых $H(\alpha'_1, \beta)$ (рис. 8.) характеризуются следующим соотношением параметров для точек (1, 1) типового графика и (S_0, r_0) графика понижений уровней:

$$S_0 = Q/4\pi T; \qquad 4k^2_{\varepsilon\varepsilon}/at' = \alpha'_{1_0}; \qquad r_0/4\,k_{\varepsilon\varepsilon} = 1. \qquad (24)$$

Следует отметить, что при выполнении соотношения $\alpha_1 < 0{,}1$, т. е. при $t > 40k^2_{\varepsilon\varepsilon}/a = 40\mu^2/k_0\mu'_0$, функция $H(\alpha_1, \beta_1)$ аппроксимируется выражением $H(0{,}1\alpha_1, \beta_1) = H(\alpha_1, 1{,}8\beta_1)$. Графики $H(\alpha_1, \beta_1)$ совпадают с графиками $W(\alpha, \beta)$ для величин $\alpha \leqslant 0{,}1$ и $K_0(r/B_{\text{пр}})$, причем «приведенное» значение коэффициента перетекания $B_{\text{пр}}$ зависит от времени $B_{\text{пр}} = \sqrt[4]{atk^2_{\varepsilon\varepsilon}}$, где $k_{\varepsilon\varepsilon} = \sqrt{T\mu/k_0\mu'_0}$, $B_{\text{пр}} = \sqrt{Tm_{\text{о.пр}}/k_0}$. Таким образом, $m_{\text{о пр}} = \sqrt{(\mu/\mu'_0)at}$ зависит от

Таблица 8*

β_1							
$5\cdot10^{-1}$	1	2	5	10	20	50	100
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—
0,38	0,036	0,00011	—	—	—	—	—
1.20	0,40	0,044	—	—	—	—	—
2,10	1,11	0,34	0,015	0,00015	—	—	—
3.30	2,05	0,96	0,20	0,0035	42(—7)	—	—
4.40	3.11	1,85	0,60	0.096	0,0025	—	—
5,40	4,22	2,89	1,30	0,45	0,062	0,00035	—
6,60	5,36	3,99	2,15	1,14	0,35	0,020	0,000027
8.00	6,50	5,10	3,20	2,06	0,97	0,13	0,059
9.70	8,10	6,70	4,60	3,11	1,86	0,50	0,096

*Таблица рассчитана И. Н. Мельниковой.

времени, т. е. процесс перетекания из сжимаемого слоя можно рассматривать в этот период как постепенное удаление от кровли водоносного горизонта питающей границы. При этом по воронке депрессии выдерживается режим перетекания, описываемый функцией $W(\alpha, \beta)$ или $K_0(r/B)$ с непрерывно возрастающим во времени значением параметра B.

2.3.4. *Схема фильтрации в разделяющем («слабопроницаемом») слое*

В разделяющем слое преобладает вертикальная фильтрация. При откачке из водоносного горизонта снижение уровней в разделяющем слое определяется понижением уровней на кровле водоносного горизонта (рассматривается случай залегания разделяющего слоя над водоносным горизонтом, из которого ведется откачка) и на кровле разделяющего слоя. Решение задачи по определению понижений уровней $S_p(z,t)$ в разделяющем слое можно записать:

$$S_p(z, t) = \int_0^\tau S(t-\tau)\, d[erfc\,(z/2\sqrt{a_0\tau})] + \int_0^\tau S_1(t-\tau)\, d[erfc\,\{(m_0 - z)/2\sqrt{a_0\tau}\}] + \sum_{i=1}^{\infty} f_i(S, S_1, z), \qquad (25)$$

где $S(t)$, $S_1(t)$ — понижение уровней в основном водоносном горизонте (вг) и во взаимодействующем; z — расстояние от кровли основного вг; t — время от начала откачки; a_0 — коэффициент пьезопроводности разделяющего слоя; m_0 — мощность разделяющего слоя; f_i — функции понижения, учитывающие влияние границ слоя.

В случае, когда понижение уровня в дренируемом* водоносном горизонте формируется достаточно быстро по отношению ко времени наблюдений $S(t) = S' = \text{const}$, а во взаимодействующем вг понижение уровней относительно невелико $S_1 = 0$, возникает ситуация, при которой решение задачи упрощается. Это дает возможность надежно определить коэффициент пьезопроводности разделяющего слоя по графику $S_p(t, z')$ понижений уровней в точке z', расположенной в разделяющем слое (имеется в виду вскрытие короткого интервала в разделяющем слое безынерционной скважиной, либо установка в этом интервале специальных датчиков порового давления). Решение рассматриваемой задачи записывают в виде выражения [7]:

$$S_p = S' erfc(z/2\sqrt{a_0 t}) + S' \sum_{i=1}^{\infty} \{erfc[(2nm_0 + z)/(2\sqrt{a_0 t})] - erfc[(2nm_0 - z)/2\sqrt{a_0 t}]\}, \quad (26)$$

в котором каждый последующий член меньше предыдущего. Таким образом, прослеживая понижение уровня достаточно долгое время, можно последовательно учитывать роль каждого из слагаемых, представляя тем самым процесс в виде суммы течений, возбуждаемых источниками равной интенсивности и различного удаления от точки с координатой z. При таком подходе может быть использована одна типовая функция $erfc(x^2)$, значения которой приведены в табл. 9 (рис. 9)

Функция

$$F_1(Fo, \theta) = erfc(Fo) - \sum_{n=1} \{erfc[Fo(2n\theta - 1)] - erfc[Fo(2n\theta + 1)]\}, \quad (27)$$

(где $Fo = a_0 t/m_0^2$; $\theta = z/m_0$) описывает фильтрацию в разделяющем слое мощностью m_0 при условии, если взаимодействующий вг рассматривают как границу с постоянным напором (рис. 10). Значения функции $F_1(Fo, \theta')$ приведены в табл. 10.

При значениях $Fo \geqslant 0{,}5$ функция $F_1(Fo, \theta)$ достигает предельной величины, равной $1-\theta$. Графики $S(t, z')$ наблюдений, построенные на кальке в билогарифмическом масштабе, совмещают с типовой кривой $erfc(x^2)$ или с одной из типовых кривых $F_1(Fo, \theta')$.

* Дренируемым в данном случае назван водоносный горизонт, из которого производится откачка.

Таблица 9

x	0	10^{-4}	$2{,}5\cdot10^{-3}$	0,01	0,022	0,04	0,063	0,09
$erfcx^2$	1	0,989	0,935	0,887	0,832	0,777	0,724	0,671
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Продолж. табл. 9

x	0,12	0,16	0,20	0,25	0,30	0,36	0,42	0,49
$erfcx^2$	0,621	0,572	0,524	0,479	0,437	0,396	0,358	0,322
1	10	11	12	13	14	15	16	17

Продолж. табл. 9

x	0,56	0,64	0,81	1,0	1,21	1,44	1,69	1,96
$erfcx^2$	0,289	0,258	0,203	0,157	0,12	0,09	0,066	0,048
1	18	19	20	21	22	23	24	25

Окончание табл. 9

x	2,25	2,56	2,89	3,24	3,59	4,0
$erfcx^2$	0,034	0,024	0,016	0,011	0,007	0,005
1	26	27	28	29	30	31

В первом случае в точке совмещения с координатами типового графика (1, 1) и координатами графика понижений (S_0, t_0) выполняются соотношения $S_0 = S'$, $(z')^2/4a_0t_0 = 1$; во втором случае $S_0 = S'$, $(r')^2/4a_0t_0 = 1$ и $z'/m_0 = 0$.

Как следует из сравнения графиков функций $erfc(x^2)$ и $F_1(Fo, 0')$, влияние верхней границы разделяющего слоя в рассматриваемом случае начинает проявляться при значениях $r/m_0 > 0{,}1$. При соотношениях $r/m_0 > 0{,}6$, наоборот, влияние верхней границы настолько существенно, что начальный отрезок графика оказывается представленным небольшими значениями понижений. В этом случае весь график от $S = 0{,}1S'$ до $S = (1-0)S'$ может быть идентифицирован только с помощью соответствующей кривой $F_1(Fo, 0')$, что несколько снижает надежность интерпретации. Таким образом, единственный датчик в разделяющем слое следует размещать в интервале $z = (0{,}3-0{,}5)m_0$ от почвы этого слоя.

Следовательно, по данным наблюдений за снижением уровней в однородном слабопроницаемом слое можно определить его пьезопроводность.

Таблица 10

Fo	θ											
	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,40	0,50	0,60	0,80
0,001	0,81	0,635	0,26	0,022	—	—	—	—	—	—	—	—
0,002	0,88	0,78	0,42	0,11	0,016	—	—	—	—	—	—	—
0,005	0,91	0,83	0,61	0,31	0,135	0,045	0,016	—	—	—	—	—
0,01	0,93	0,88	0,88	0,48	0,29	0,16	0,08	0,035	—	—	—	—
0,02	0,955	0,915	0,80	0,62	0,45	0,315	0,21	0,13	0,045	—	—	—
0,05	0,975	0,945	0,87	0,75	0,635	0,52	0,43	0,345	0,21	0,11	0,06	0,015
0,1	0,98	0,96	0,91	0,82	0,74	0,65	0,575	0,51	0,37	0,27	0,18	0,07
0,2	0,985	0,975	0,94	0,87	0,81	0,75	0,685	0,63	0,52	0,41	0,315	0,15
0,5	0,99	0,98	0,945	0,90	0,845	0,795	0,745	0,695	0,597	0,49	0,395	0,195

Таблица 11

x	0,00	0,01	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
erfcx	1,00	0,99	0,93	0,89	0,83	0,78	0,72	0,67	0,62	0,57	0,52	0,48	0,40	0,32	0,32	0,20	0,157	0,12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

Окончание табл. 11

x	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2
erfcx	0,09	0,077	0,066	0,056	0,048	0,040	0,034	0,024	0,016	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002
1	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33

При обработке данных наблюдений по нескольким датчикам, установленным в полупроницаемом слое на различных расстояниях от его подошвы, следует использовать типовые кривые линейного прослеживания $erfc(x)$ (рис. 11) и $F_1(F'o, \theta)$ (рис. 12), соответственно, для приема графического разложения течений или обработки единым графиком. Данные для построения графика $erfc(x)$ (см. рис. 11) приведены в табл. 11.

В точках совмещения графиков с координатами (S_0, z_0) и типового графика $erfc(x)$ с координатами (1, 1) выполняются соотношения $S_0 = S'$; $x_0/2\sqrt{a_0 t'} = 1$, из которых можно определить напор в дренируемом водоносном горизонте и коэффициент пьезопроводности разделяющего слоя a_0.

В случае, если в кровле разделяющего слоя залегают отложения, отличающиеся по водоотдаче и коэффициенту фильтрации, решение для понижения уровня $S_p(z, t)$ имеет вид [7]:

$$S_p = S' erfc(z/2\sqrt{a_0 t}) - S'(1 - k_{\varepsilon 01})/(1 + k_{\varepsilon 01}) \times$$
$$\times \sum_{n=1} [(1 - k_{\varepsilon 01})/(1 + k_{\varepsilon 01})]^{n-1} \{erfc[(2nm_0 - z)/(2\sqrt{a_0 t})] -$$
$$- erfc[(2nm_0 + z)/(2\sqrt{a_0 t})]\}, \qquad (28)$$

где S_p — понижение уровня в разделяющем слое; S' — понижение уровня в дренируемом вг; z — расстояние от кровли дренируемого вг; $a_0 = k_0/\mu_0'$; t — время от начала откачки; $k_{\varepsilon 01}$ — коэффициент гидравлической активности разделяющего слоя по отношению к взаимодействующему вг: $k_{\varepsilon 01} = \sqrt{k_0\mu_0'/k_{01}\mu_{01}'}$; k_0, μ_0', k_{01}, μ_{01}' — коэффициенты фильтрации и удельная водоотдача разделяющего слоя мощностью m_0 и слоя, залегающего выше кровли, условно принимаемого бесконечным.

$$S_{p1} = S' [2k_{\varepsilon 01}/(1 + k_{\varepsilon 01})] \sum_{n=1}^{\infty} [(1 - k_{\varepsilon 01})/(1 + k_{\varepsilon 01})]^{n-1} \times$$
$$\times erfc\{[z - m_0 + (2n - 1)\sqrt{a_{01}/a_0}\, m_0]/2\sqrt{a_0 t}\}, \qquad (29)$$

где S_{p1} — понижение уровня в слое выше разделяющего слоя; $a_{01} = k_{01}/\mu_{01}'$.

При наличии двух датчиков, размещенных в разделяющем слое в перекрывающих его породах, графики $S_p(t, z')$ следует обрабатывать с использованием типовой кривой $erfc(x^2)$ и путем разложения графика на составляющие: 1) в случае анализа кривой $S_p(t, z')$ — «откликов», возбужденных наличием неоднородности, можно оценить гидравлическую активность первого слоя по отношению ко второму: $k_{\varepsilon 01} = \sqrt{k_0\mu_0'/k_{01}\mu_{01}'}$ (по аналогии с процессами теплопроводности [7]); 2) по известному коэффициенту $k_{\varepsilon 01}$ и определенному по кривой $S_{p1}(t, z')$ значению a_0 — коэффициент пьезопроводности верхнего слоя a_{01}.

По данным наблюдений за уровнями в основном водоносном горизонте рассчитывают гидравлическую активность этого вг

относительно разделяющего слоя $k_{\varepsilon\varepsilon} = \sqrt{T\mu/k_0\mu_0'}$ (см. выше, функцию $H(u, \beta_1)$, где $\beta_1 = r/4k_{\varepsilon\varepsilon}$); при этом параметры T и μ водоносного горизонта также определены по данным наблюдений в основном вг; с учетом зависимостей (28) и (29) появляется возможность замкнуть систему соотношений, необходимых для определения параметров k_0, μ_0' и k_{01}, μ_{01}':

$$k_0\mu_0' = T\mu/k_{\varepsilon\varepsilon}^2; \qquad k_0/\mu_0' = a_0; \qquad k_0 = \sqrt{T\mu a_0}/k_{\varepsilon\varepsilon};$$
$$\mu_0' = \sqrt{T\mu/a_0}/k_{\varepsilon\varepsilon}. \tag{30}$$

$$k_{01}/\mu_{01}' = a_{01}; \qquad k_{\varepsilon 01} = \sqrt{k_0\mu_0'/k_{01}\mu_{01}};$$
$$k_{01} = \sqrt{k_0\mu_0' a_{01}}/k_{\varepsilon 01} = \sqrt{T\mu a_{01}}/k_{\varepsilon\varepsilon}k_{\varepsilon 01};$$
$$\mu_{01}' = \frac{\sqrt{k_0\ \mu_0'/a_{01}}}{k_{\varepsilon 01}} = \frac{\sqrt{T\mu/a_{01}}}{k_{\varepsilon\varepsilon}\ k_{\varepsilon 01}}. \tag{31}$$

Поскольку оборудование безынерционных пьезометров или установка датчиков в слабопроницаемом слое недоступны в настоящее время для геолого-разведочных организаций, то при определении свойств относительных водоупоров можно использовать график понижений уровней в пьезометрах, оборудованных на контактный интервал взаимодействующего вг. При этом первый отклик на откачку из дренируемого водоносного горизонта, т. е. первый член формулы (29), имеет вид:

$$S_{p1} = S_1\,[\,2k_{\varepsilon 01}\,/\,(\,1 + k_{\varepsilon 01}\,)\,]\,erfc\,(\,m_0\,/\,2\,\sqrt{a_0 t}\,)\,. \tag{32}$$

С помощью типовой кривой $erfc(x^2)$ определяют соотношения $S_{op1} = S_1\,[\,2k_{\varepsilon 01}\,/\,(\,1 + k_{\varepsilon 01}\,)\,]$ и $m_0/2\,\sqrt{a_0 t}$, из которых по известному понижению S_1' в дренируемом пласте рассчитывают коэффициент гидравлической активности и пьезопроводность разделяющего слоя:

$$k_{\varepsilon 01} = S_{op1}\,/\,(2S_1 - S_{op1}); \qquad a_0 = m_0^2\,/\,4t_0. \tag{33}$$

Если коэффициент гидравлической активности разделяющего слоя намного больше 1, то для обработки данных используют зависимость [7]:

$$S_p = S_1 F_2(Fo,\ \theta);$$

$$F_2(Fo,\ \theta) = \sum_{n=1}^{\infty}(-1)^{n+1} erfc\,\{[(2n-1)m_0 - z]/(2\,\sqrt{a_0 t}] + \\ + erfc\,[(2n-1)m_0 + z]/(2\,\sqrt{a_0 t})\,]\,\}. \tag{34}$$

Значения функции $F_2(Fo,\ \theta)$ приведены в табл. 12.

При построении графика функции $F_2(Fo,\ \theta')$, используемой для обработки графиков временного прослеживания (рис. 13), параметр θ фиксируют и выбирают значения функции, соответствующие различным значениям переменной Fo (обобщенного

времени), т. е. считывают значения по столбцам табл. 12. При построении графика функции $F_2(Fo, \theta)$, используемой для обработки графиков прослеживания по мощности слоя, фиксируют значения параметра Fo. Переменной величиной является приведенное расстояние θ, значения считывают по строкам табл. 12 (рис. 14).

Таблица 12

Fo	θ									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
0,005	0,32	0,05	0,01	0,0	—	—	—	—	—	—
0,01	0,47	0,16	0,04	0,01	—	—	—	—	—	—
0,02	0,60	0,32	0,13	0,04	0,01	—	—	—	—	—
0,03	0,67	0,41	0,22	0,10	0,04	0,02	—	—	—	—
0,04	0,71	0,49	0,30	0,16	0,08	0,04	0,02	—	—	—
0,06	0,77	0,57	0,39	0,25	0,15	0,08	0,04	0,02	0,01	0,01
0,08	0,80	0,62	0,46	0,32	0,21	0,13	0,08	0,05	0,04	0,025
0,1	0,82	0,66	0,51	0,38	0,27	0,18	0,12	0,08	0,06	0,05
0,15	0,86	0,72	0,59	0,47	0,36	0,28	0,22	0,17	0,15	0,14
0,2	0,88	0,76	0,64	0,54	0,44	0,36	0,30	0,26	0,24	0,23
0,3	0,90	0,82	0,73	0,65	0,57	0,51	0,46	0,42	0,40	0,39
0,4	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,62	0,58	0,55	0,54	0,53
0,6	0,955	0,91	0,87	0,83	0,79	0,76	0,74	0,72	0,71	0,71
0,8	0,97	0,945	0,92	0,90	0,875	0,855	0,84	0,83	0,825	0,82
1,0	0,98	0,965	0,95	0,935	0,92	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88

Совмещение графиков $S(t, z')$ и $S(t', z)$ с соответствующими типовыми кривыми проводят в обычном порядке. При этом в точках совмещения типового графика с координатами (1, 1) и графика $S(t, z)$ с координатами (S_0, t_0) или (S_0, z_0) выполняются соотношения $S_0 = S_1$, $z'/m_0 = \theta'_0$, $at_0/m_0^2 = 1$ — в случае временного прослеживания и $S_0 = S'$, $Fo = at'/m_0^2$, $z_0/m_0 = 1$ — в случае прослеживания понижений уровня по мощности слоя.

2.3.5. Схема фильтрации в пласте-полосе

Без перетекания

К такой схеме фильтрации сводится откачка из скважины, вскрывающей водоносный горизонт, приуроченный к наклонно залегающим отложениям ограниченной мощности. За исключением начального момента откачки, когда боковые границы слабо влияют на темп снижения уровней, а в зоне с радиусом $M/2$ (M — ширина полосы пород) формируется осесимметричная воронка, весь последующий период характеризуется настолько существенным влиянием боковых границ, что попытка произвести анализ данных путем расчленения графика $S(t)$ на составляющие, обусловленные «вступлением» членов суммы бесконечного ряда в точной зависимости

Таблица 13

$x=\lambda$	0,00	10^{-4}	0,01	0,04	0,09	0,16	0,25
$y=xi(\lambda)$	∞	55,4	4,7	1,93	1,05	0,63	0,4

Продолж. табл. 13

$x=\lambda$	0,36	0,49	0,64	0,81	1,0	1,21	1,44
$y=xi(\lambda)$	0,26	0,17	0,114	0,085	0,05	0,003	0,0216

Окончание табл. 13

$x=\lambda$	1,69	1,96	2,25	2,56	2,9	3,24
$y=xi(\lambda)$	0,014	0,009	0,0057	0,0036	0,0022	0,0014

$$S=\frac{Q}{4\pi T}Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right)+\frac{Q}{2\pi T}\sum_{n=1}^{\infty}Ei\left(-\frac{(nM)^2+x^2}{4at}\right) \qquad (35)$$

при малых M/a, не дает надежных результатов. Поэтому неизбежен переход к аппроксимации течения к скважине одномерным потоком [7], в котором понижения уровней описываются формулой:

$$S=S'+\frac{Q}{MT_{\text{п}}}\sqrt{a_{\text{п}}t}\,ierfc\left(\frac{x}{2\sqrt{a_{\text{п}}t}}\right), \qquad (36)$$

где S' — поправка на переход от осесимметричного к одномерному течению; $T_{\text{п}}$, $a_{\text{п}}$ — проводимость и пьезопроводность пласта-полосы.

Понижение в начальный отрезок времени $t_0>t>0$ будет равно:

$$S'=\frac{Q}{4\pi T}Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right)-\frac{Q}{MT_{\text{п}}}\sqrt{at}\,ierfc\left(\frac{x}{2\sqrt{at}}\right), \qquad (37)$$

если $S(r_0)<[Q/2\pi T]\ln(m/2\pi r_0)$; $S_{\text{c}}=[Q/2\pi T]\ln(M/2\pi r_0)$ (при условии $t>t_0$ и $0<r<M$). В зоне, отстоящей от центральной скважины на расстояние $x\geqslant M$, $S_{\text{c}}=0$, и поток в чистом виде описывается закономерностями, присущими одномерной фильтрации, т. е.

$$S=[Q/T_{\text{п}}M]\sqrt{a_{\text{п}}t}\,ierfc\,(x/2\sqrt{a_{\text{п}}t}). \qquad (38)$$

Для удобства расчета параметров введена функция $xi(x)\equiv\equiv x^{-1}ierfc(x)$. Тогда

$$S=[Qx/2T_{\text{п}}M]\,xi(\lambda);\qquad \lambda=x^2/4at. \qquad (39)$$

Функция $xi(\lambda)$, пригодная для обработки графиков $S(t, x')$ временного прослеживания (рис. 15), табулирована (табл. 13),

она может рассматриваться как типовая для условий фильтрации по пласту-полосе с заданным расходом.

В точке совмещения графиков $S(t, x')$ и типовой кривой $xi(\lambda)$ с координатами (S_0, t_0) и (1, 1), соответственно, выполнены соотношения $Qx'/2MT_п = S_0$, $x'^2 = 4a_п t_0$, из которых определяют

$$T_п = Qx'/2MS_0; \qquad a_п = x'^2/4t_0. \tag{40}$$

Для анализа данных площадного прослеживания в зоне $x > M$ используют типовую функцию $ierfc(x)$ (табл. 14, рис. 16).

В точке совмещения графиков $S(t', x)$ и типовой кривой $ierfc(x)$ (координаты (S_0, x_0) и (1, 1), соответственно) соблюдаются соотношения $S_0 = Q\sqrt{a_п t'}/MT_п$, $x_0 = 2\sqrt{a_п t'}$, из которых определяют:

$$a_п = x_0^2/4t'; \qquad T_п = Qx_0/2MS_0. \tag{41}$$

Для створа центральной скважины $x = 0$, $ierfc(0) = 0{,}5642$ и

$$S = [Q/2\pi t_п]\ln(M/2\pi r_0) + 0{,}56(Q/T_п M)\sqrt{a_п t}. \tag{42}$$

В этом случае целесообразно обработать данные $S = f(t)$, построив график понижений уровней в масштабе $\sqrt{t}$. Прямая $S(\sqrt{x}) = \alpha + \beta\sqrt{t}$ пересекает ось понижений в точке S_0, причем $S_0 = Q/2\pi T_п \ln(M/2\pi r_0)$, а ось времени — в точке t_0, причем $\beta = -\alpha/\sqrt{t_0}$, т. е. $a_п = [M\ln(M/2\pi r_0)]^2/12{,}4t_0$.

С перетеканием

Для этой схемы фильтрации («жесткий» режим в разделяющем слое и постоянный уровень взаимодействующего вг) существует решение при условии $S = \text{const}$ [7]:

$$q = T_п S_1\left[\left(\frac{1}{\sqrt{\pi a_п t}}\right)e^{-a_п t/B_п^2} + \frac{1}{B_п}\,erf\left(\frac{\sqrt{a_п t}}{B_п}\right)\right]. \tag{43}$$

Поскольку в этом случае функция расхода претерпевает существенные изменения только в начальный момент, а затем расход быстро стабилизируется, его величина стремится к значению $q = T_п S_1/B_п$, режим откачки с постоянным понижением уровня близок к режиму с постоянным дебитом откачки.

Решение для понижения уровней в пласте-полосе с перетеканием имеет вид [7]:

$$S = (S_1/2)\{e^{-(x/B)}erfc[(x/2\sqrt{at}) - (\sqrt{at}/B)] + e^{(x/B)}erfc[(x/2\sqrt{at}) + (\sqrt{at}/B)]\}. \tag{44}$$

После введения переменных $x/B = \gamma$, $\sqrt{at}/B = \delta$ формула (44) сводится к уравнению $S = S_1 F_3(\delta\gamma)$, где

$$F_3(\delta, \gamma) = (1/2)\{e^{-\gamma}erfc(\gamma/2\delta - \delta) + e^{\gamma}erfc[(\gamma/2\delta) + \delta]\} \tag{45}$$

Функция $F_3(\gamma, \delta)$ удобна для получения семейств типовых функций $F_3(\gamma', \delta')$ при прослеживании уровней по наблюдатель-

Таблица 14

x	0,0	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
$ierfcx$	0,5642	0,5542	0,5444	0,5156	0,47	0,39	0,31	0,25	0,20	0,16	0,12	0,09

Окончание табл. 14

x	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$ierfcx$	0,068	0,05	0,036	0,026	0,018	0,013	0,086	0,058	0,038	0,025	0,016	0,001

Таблица 15

γ	δ											
	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0
0,001	0,48	0,72	0,89	0,93	0,94	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,999
0,002	0,16	0,48	0,78	0,89	0,94	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,998
0,005	—	0,08	0,48	0,72	0,86	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,995
0,01	—	—	0,16	0,48	0,72	0,86	0,95	0,98	0,98	0,98	0,98	0,99
0,02	—	—	0,005	0,16	0,58	0,77	0,89	0,95	0,95	0,95	0,95	0,98
0,05	—	—	—	—	0,08	0,48	0,72	0,06	0,93	0,93	0,93	0,93
0,1	—	—	—	—	—	0,16	0,48	0,71	0,87	0,91	0,91	0,91
0,2	—	—	—	—	—	—	0,16	0,48	0,76	0,81	0,81	0,82
0,5	—	—	—	—	—	—	—	0,10	0,44	0,54	0,60	0,60
1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	0,14	0,33	0,37	0,37
2,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,07	0,135	0,137
3,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,012	0,05

ным скважинам, расположенным на различном удалении x от створа центральной скважины (линейное прослеживание, рис. 18) и $F_3(\delta', \gamma)$ — при временном прослеживании понижений уровней (см. рис. 17).

Для построения графиков типовых кривых функция $F_3(\gamma, \delta')$ табулирована (табл. 15).

При совмещении графиков линейного («площадного») прослеживания $S(x, t')$ с типовой кривой $F_3(\gamma, \delta')$ в точках с координатами (S_0, x_0) и (1, 1), соответственно, выполняются соотношения $S_1 = S_0$, $x_0 = B_п$, $\gamma'_0 B_п = \sqrt{a_п t'}$, т. е. $a_п = x_0^2 \gamma'^2 / t'$. Поскольку расход $Q = 2qM$ (M — ширина полосы, q — погонный дебит потока), то из соотношения $q = T_п S_1 / B_п$ можно определить параметр $T_п = QB_п / 2MS_1$.

Для удобства обработки графиков временного прослеживания функция $F_3(\delta, \gamma)$ пересчитана в зависимость $F_3(\gamma, \delta^2)$, значения которой приведены в табл. 16.

При совмещении графиков временного прослеживания $S(x', t)$ с типовой кривой $F_3(\gamma', \delta^2)$ в точках с координатами (S_0, t_0) и (1, 1) выполняются соотношения $S_1 = S_0$, $a_п t_0 = x'^2$ и $T_п = QB_п / 2MS_1$.

Как следует из анализа графиков функции $F_3(\gamma, \delta)$, в зоне $0 < x < 0{,}1B$ и при $t < B^2/a$ перетекание практически не оказывает влияния на форму графиков (графики близки к функции $erfcx$). При условии $x > 3B$ понижение уровня $S < 0{,}05S_1$, а при времени, большем $t > 4B^2/a$ режим потока близок к стационарному. Согласно этим критериям наблюдательные скважины следует размещать:

в зоне $M < x < 0{,}1B_п$ — для надежного определения значений $a_п$, $T_п$;

в зоне $0{,}1B_п < x < B_п$ — для определения значения $B_п$;

в зоне $B_п < x < 2B_п$ — для контроля влияния границ.

2.3.6. Схема безнапорного водоносного горизонта

Специфика откачек в безнапорных водоносных горизонтах состоит в том, что на разных этапах от начала откачки понижения уровней определяются различными значениями водоотдачи. На начальном этапе понижение определяется так называемой упругой водоотдачей, при этом водоносный горизонт работает подобно напорному пласту с перетеканием. На следующем этапе понижение уровней определяется соотношением значений упругой и гравитационной водоотдачи, а также соотношением значений коэффициентов фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях, а на конечном этапе дренирования — гравитационной водоотдачей. Приближенное решение, описывающее поведение уровней при откачке из безнапорного водоносного горизонта [8] имеет вид:

$$S(r, t) = [Q/4\pi T]\, V(\tau_1, \tau_2, \beta); \qquad (46)$$

Таблица 16

δ^2	γ											
	0,001	0,002	0,005	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	3,0
10^{-6}	0,48	0,16	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$4 \cdot 10^{-6}$	0,72	0,48	0,08	—	—	—	—	—	—	—	—	—
$2,5 \cdot 10^{-5}$	0,89	0,78	0,48	0,16	—	—	—	—	—	—	—	—
10^{-4}	0,93	0,89	0,72	0,48	0,16	—	—	—	—	—	—	—
$4 \cdot 10^{-4}$	—	0,94	0,86	0,72	0,58	0,08	—	—	—	—	—	—
$2,5 \cdot 10^{-3}$	—	0,98	0,95	0,86	0,77	0,48	0,16	—	—	—	—	—
10^{-2}	—	—	0,98	0,95	0,89	0,72	0,48	0,16	—	—	—	—
0,04	—	—	—	0,98	0,95	0,86	0,71	0,48	0,10	—	—	—
0,25	—	—	—	—	—	0,93	0,87	0,76	0,44	0,14	—	—
1	—	—	—	—	—	—	0,91	0,81	0,54	0,33	0,07	0,01
4	—	—	—	—	—	—	—	0,82	0,60	0,37	0,14	0,05

$$V(\tau_1, \tau_2, \beta) = \int_0^\infty 4yJ_0(y\beta^{1/2})[u_0(y) + \sum_{n=1}^{\infty} u_n(y)]\,dy; \qquad (47)$$

$$u_0(y) = \frac{\{1 - exp[-\tau_1\beta(y^2 - \gamma_0^2)]\}\,tanh\,\gamma_0}{\{y^2 + (1+\sigma)\gamma_0^2 - [(y^2 - \gamma_0^2)/\sigma]\}\gamma_0};$$
$$u_n(y) = \frac{\{1 - exp[-\tau_1\beta(y^2 + \gamma_n^2)]\}\,tanh\,\gamma_n}{\{y^2 - (1+\sigma)\gamma_n^2 - (y^2 + \gamma_n^2)^2/\sigma\}\gamma_n}, \qquad (48)$$

где γ_0, γ_n — корни уравнений;

$$\sigma\gamma_0 \operatorname{sh}\gamma_0 - (y^2 - \gamma_0^2)\operatorname{ch}\gamma_0 = 0, \qquad \gamma_0^2 < y^2;$$
$$\sigma\gamma_n \sin\gamma_n + (y^2 + \gamma_n)^2 \cos\gamma_n = 0, \qquad (49)$$
$$(2n-1)\pi/2 < \gamma_n < n\pi, \qquad n \geqslant 1,$$

где r — расстояние от центральной скважины; t — время откачки; Q — дебит; T — проводимость; $V(\tau_1, \tau_2, \beta)$ — функция Неймана—Болтона; $\tau_1 = at/r^2$; $\tau_2 = a^x t/r^2$; $\beta = k_0/m^2kr^2$; k_0 — коэффициент фильтрации в вертикальном направлении; k — в горизонтальном; m — начальная мощность вг; $\sigma = \mu' m/\mu$; μ' — удельная упругая водоотдача вг; μ — гравитационная водоотдача; a, a^x — пьезопроводность, соответственно, при упругой и гравитационной водоотдаче.

При допущении $\sigma = 0$ получены асимптотические семейства кривых вида A (напорный участок откачки) и B (безнапорный). Значения функции $V(\tau_1, \beta')$ приведены в табл. 17, а функции $V(\tau_2, \beta')$ в табл. 18 и на рис. 19.

Графики временного прослеживания $S(r', t)$ интерпретируют по обычной схеме. При совмещении начального участка графика $S(r', t)$ с типовыми кривыми вида A $V(\tau_1, \beta')$ в точках с координатами (S_0, t_0) и $(1, 1)$, соответственно, выполняются соотношения $Q = 4\pi TS_0$, $r'^2 = at_0$, $\beta_0' = k_0/mTr'^2$, откуда находят параметры T, a и k_0. Аналогично по конечному участку графика $S(r', t)$ и типовой кривой $V(\tau_2, \beta')$ определяют параметры T, a^x, k_0 из соотношений: $r'^2 = a^x t_0$, $Q = 4\pi TS_0$, $\beta_0' = k_0/mTr'^2$.

Для построения семейства типовых кривых, пригодных для обработки данных площадного прослеживания, значения функции $V(\tau_1, \tau_2, \beta)$ пересчитаны для параметров $\alpha = \tau\beta = at/B_в^2$, $\sqrt{\beta} = r/B_в$, где $B_в = \sqrt{m^2k/k_0}$ (табл. 19, рис. 20). Совмещая, как обычно, графики $S(r, t')$ с соответствующей кривой графика $V(\alpha', \sqrt{\beta})$, в точке с координатами $V_0 = 1$, $\sqrt{\beta_0} = 1$ на типовом графике со значением α_0' и координатами (S_0, r_0) на графике площадного прослеживания, получим соотношения $S_0 = Q/4\pi T$, $at/B_в^2 = \alpha_0'$, $B_в = r_0$, из которых можно определить параметры безнапорного водоносного горизонта T, a, $B_в = \sqrt{Tm/k_0}$. Следует отметить, что данные площадного прослеживания должны обрабатываться с учетом положения интервала активной связи водоносного гори-

Таблица 17

τ_1	β								
	0,001	0,03	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
0,1	0,025	0,023	0,023	0,022	0,021	0,02	0,019	0,018	0,017
0,2	0,14	0,14	0,13	0,127	0,12	0,11	0,10	0,09	0,085
0,6	0,66	0,6	0,57	0,54	0,48	0,4	0,34	0,30	0,26
1	1,02	0,9	0,85	0,79	0,69	0,54	0,44	0,36	0,30
2	1,57	0,35	1,23	1,12	0,92	0,66	0,50	0,39	0,32
6	2,52	2,0	1,73	1,47	1,07	0,70	—	—	—
10	3,0	2,2	1,85	1,53	1,08	—	—	—	—
20	3,56	2,4	1,92	1,55	—	—	—	—	—
60	4,4	2,5	1,94	—	—	—	—	—	—
100	4,8	2,5	—	—	—	—	—	—	—
200	5,2	—	—	—	—	—	—	—	—
600	5,5	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	5,6	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	5,6	—	—	—	—	—	—	—	—

Окончание табл. 17

τ_1	β							
	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	0,7
0,1	0,015	0,014	0,012	0,011	0,009	0,008	0,006	0,005
0,2	0,071	0,06	0,05	0,04	0,032	0,023	0,017	0,013
0,6	0,18	0,13	0,10	0,07	0,05	0,031	0,021	0,015
1	0,20	0,14	0,1	0,08	—	—	—	—
2	0,20	0,14	—	—	—	—	—	—
6	—	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—
100	—	—	—	—	—	—	—	—
200	—	—	—	—	—	—	—	—
600	—	—	—	—	—	—	—	—
1000	—	—	—	—	—	—	—	—
2000	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 18

τ_2	β								
	0,001	0,03	0,06	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
1,0(—3)	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—
0,002	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—
0,006	—	—	—	—	—	0,7	—	—	—
0,01	—	—	—	—	—	0,7	0,52	0,4	0,33
0,02	—	—	—	1,56	1,1	0,71	0,52	0,41	0,34
0,06	—	2,5	1,95	1,57	1,1	0,74	0,56	0,45	0,37
0,1	—	2,5	2,0	1,6	1,1	0,76	0,59	0,48	0,41
0,2	5,6	2,5	2,0	1,6	1,2	0,83	0,68	0,57	0,51
0,6	5,6	2,6	2,1	1,7	1,35	1,07	0,95	0,89	0,85
1	5,6	2,6	2,1	1,8	1,5	1,3	1,2	1,16	1,13
2	5,6	2,7	2,3	2,1	1,85	1,7	1,7	1,66	1,65
6	5,7	3,1	2,9	2,8	2,7	2,66	2,6	2,65	2,65
10	5,7	3,4	3,2	3,2	3,15	3,14	3,1	3,1	3,1
20	5,8	3,9	3,8	3,8	3,8	3,82	3,8	3,8	3,8
60	6,0	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9

Окончание табл. 18

τ_2	β							
	1,5	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0
1,0 (—3)	—	—	—	—	—	—	0,022	0,016
0,002	—	—	—	—	—	—	0,023	0,016
0,006	—	—	—	—	—	—	0,026	0,019
0,01	0,21	0,15	0,11	0,09	0,06	0,04	0,029	0,021
0,02	0,22	0,16	0,12	0,1	0,07	0,05	0,036	0,028
0,06	0,26	0,20	0,17	0,14	0,11	0,08	0,071	0,061
0,1	0,31	0,25	0,21	0,18	0,15	0,13	0,11	0,10
0,2	0,41	0,36	0,32	0,30	0,27	0,24	0,23	0,22
0,6	0,79	0,76	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,30
1	1,10	1,08	1,07	1,07	1,06	1,06	1,05	1,05
2	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6	1,6
6	2,65	—	—	—	—	—	—	—
10	—	—	—	—	—	—	—	—
20	—	—	—	—	—	—	—	—
60	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблица 19*

α	$\sqrt{\beta}$							
	0,0315	0,063	0,1	0,17	0,24	0,315	0,45	0,63
10	5,62	4,30	3,16	2,50	1,94	1,55	1,08	0,70
1	5,59	4,27	3,43	2,47	1,90	1,53	1,06	0,67
0,6	5,54	—	3,37	—	—	1,47	—	—
0,1	4,77	3,42	2,61	1,7	1,1	0,79	0,4	0,154
0,06	4,42	3,05	2,27	1,35	0,85	0,54	0,23	0,055
0,03	3,9	2,6	1,85	0,9	0,44	0,23	0,057	—
0,01	2,97	1,66	0,96	0,33	0,17	0,023	—	—

Окончание табл. 19

α	$\sqrt{\beta}$							
	0,77	0,9	1,0	1,25	1,4	1,6	2	2,24
10	0,51	0,39	0,32	0,20	0,14	0,11	0,048	0,031
1	0,48	0,37	0,30	0,18	0,12	0,065	0,036	0,023
0,6	—	—	0,26	—	—	—	—	—
0,1	0,073	0,038	0,017	—	—	—	—	—
0,06	0,019	—	—	—	—	—	—	—
0,03	—	—	—	—	—	—	—	—
0,01	—	—	—	—	—	—	—	—

* Таблица рассчитана И. Н. Мельниковой.

зонта со скважиной относительно подошвы этого водоносного горизонта, т. е. кривые $S(r)$ необходимо строить по скважинам с однотипным положением фильтров, а при значительной мощности вг интервалы активной связи должны определяться методом расходометрии и геофизическими способами опробования скважин (резистивиметрия, термометрия и т. п.).

2.3.7. Схема откачки у реки

Приближенное решение, описывающее влияние линейной питающей границы, находится методом сложения двух течений в неограниченном пласте: течения S_1, получаемого для соответствующей схемы осесимметричной или линейной фильтрации к к реальной скважине (стоку), и течения S_2 от зеркально отраженного от границы фиктивного источника, обеспечивающего выполнение условия $S(L)=0$, где L — «питающая» граница:

$$S(r',\ t)=S_1(r',\ t)-S_2(r',\ t). \qquad (50)$$

График $S(r', t)$ на начальном этапе откачки соответствует неограниченному пласту, вследствие чего на кривой $S_1(r', t)$, построенной в билогарифмическом масштабе, обычным путем определяют соответствующие фильтрационные параметры дренируемого водоносного горизонта. При этом подобранную типовую кривую наносят на график функции понижения; для последующего периода откачки, на котором проявляется влияние границы, отстраивают график «расхождения» фактической и типовой кривой $S_2 = S - S_1$, соответствующий функции понижения отраженного источника; график $S_2(r_1', t)$ обрабатывают с помощью той же типовой кривой. При этом в точке совмещения (1, 1) и (S_{02}, t_0) графиков выполняются соотношения, позволяющие найти удаление фиктивного источника r_1 и его дебит Q_1 по формулам

$$r_1 = 2\sqrt{at_0}; \qquad Q_1 = 4\pi TS_0. \tag{51}$$

Величина

$$\Delta L = \frac{\sqrt{r_1^2 - x_1^2} + y}{2} - R, \tag{52}$$

где y — ордината наблюдательной скважины; R — ордината реки относительно центральной скважины, соответствует эквивалентному увеличению расстояния до реки:

$$\Delta L = Tm_0 / k_0 b, \tag{53}$$

где m_0, k_0 — мощность зоны контакта реки и водоносного горизонта и коэффициент фильтрации; b — ширина реки.

Отношение Q_1 / Q характеризует долю восполнения запасов подземных вод за счет перетекания из реки.

2.3.8. Схема откачки у экранирующей линейной границы

На экранирующей границе водоносного горизонта выполняется условие $Q(L) = 0$. Решение, описывающее фильтрацию, есть сумма двух течений в неограниченном пласте: стока S_1 реальной скважины и стока S_2 зеркально отраженного от границы;

$$S(r, t) = S_1(r, t) + S_2(r_1, t). \tag{54}$$

График $S(r', t)$ совмещают на начальном отрезке с типовой кривой, соответствующей условиям фильтрации. Типовую кривую наносят на график $S_1(r', t)$ и для периода «расхождения» строят график кривой $S_2 = S - S_1$, соответствующий функции понижения отраженного стока. Этот график совмещают с выбранной типовой кривой. В точке совмещения (1, 1) и (S_{20}, t_0) выполнены соотношения

$$r_1' = 2\sqrt{at_0}; \qquad Q_1 = 4\pi TS_{20}, \tag{55}$$

позволяющие определить фактическое положение непроницаемой границы и фактическое сокращение потока на этой границе Q_1/Q.

2.4. Использование численного моделирования для планирования опытных откачек и интерпретации их результатов

2.4.1. Совершенствование научно-методических основ планирования, проведения и интерпретации опытных откачек при изучении сложных гидрогеологических условий связано с использованием методов математического, в частности, численного моделирования фильтрационных процессов. Математическое моделирование позволяет количественно учесть влияние на развитие фильтрационного процесса большого числа разнообразных факторов, осложняющих закономерности этого процесса и затрудняющих интерпретацию результатов опытных опробований традиционными аналитическими методами.

2.4.2. Лабораторией гидрогеологии ВНИМИ и кафедрой гидрогеологии ЛГИ создана специализированная программа численного моделирования задач фильтрации в профильной осесимметричной постановке для анализа условий проведения опытных откачек. Специализированная программа «SATIR» позволяет рассматривать осесимметричное нестационарное движение подземных вод к скважине с постоянным дебитом, вскрывающей с заданной степенью несовершенства напорный водоносный пласт с любой профильной и кольцевой плановой неоднородностью, проводить анализ следующих факторов:

— неоднородность по проницаемости и емкостным свойствам элементов водоносного пласта (слоистость, концентрическая неоднородность в плане);

— взаимодействие нескольких водоносных прослоев с любым соотношением параметров и характеристик относительных водоупоров;

— кольматация центральной скважины;

— нестационарность фильтрации в слабопроницаемых пластах (разделяющих водоупорах) с заданной их профильной неоднородностью;

— сложная структура потока, обусловленная профильной неоднородностью водоносного пласта;

— внешние границы пласта (контур обеспеченного питания, непроницаемая граница и т. д.).

При численных экспериментах, проведенных с использованием специализированной математической модели, можно:

— выполнить методические исследования, направленные на выявление общих закономерностей фильтрационных процессов при опробовании сложных гидрогеологических структур;

— обосновать общие требования к постановке, проведению и интерпретации опытных опробований с учетом выявленных закономерностей фильтрационных процессов в стратифицированных водоносных комплексах;

— оценить эффективность аналитических решений и предлагаемых приемов для интерпретации результатов опытных опробований в разнообразных условиях;

— обосновать гидрогеологическую схематизацию при интерпретации результатов опытных опробований стратифицированных водоносных комплексов;

— исследовать точность аналогового моделирования фильтрационных процессов;

— имитировать прогнозные условия проведения конкретных опытных откачек с целью обоснования конструкции опытного куста, регламента наблюдений, продолжительности испытаний и т. д.

— проверить и откорректировать результаты интерпретации конкретной опытной откачки, полученные аналитическими методами путем приближенных решений и упрощенных приемов.

Разработанная программа дает возможность рассмотреть большое число вариантов той или иной сложной расчетной гидродинамической схемы и выполнить многофакторный анализ таких схем и соответствующих гидрогеологических условий.

2.4.3. Работоспособность и эффективность программы «S A T I R» проверена путем решения многочисленных тестовых задач. Это позволило выявить основные характеристики программы и точность вычислительной схематизации, положенной в основу программы и реализованной в ее расчетных алгоритмах. Программа обеспечивает точность решения на уровне 1—2% по величине напоров, что дает основание считать ее вполне пригодной для анализа результатов влияния того или иного фактора или группы факторов на закономерности фильтрационного процесса.

Однако при неконтролируемой точности решения может создаваться ложное представление об изучаемом гидрогеологическом процессе вследствие проявления чисто вычислительных эффектов.

2.4.4. В основу программы «S A T I R» заложен модифицированный локально-одномерный метод (МЛОМ), реализующий конечно-разностную схему вычисления понижений напора.

Модифицированный неявный локально-одномерный метод реализуется на прямоугольной сетке с неравномерной разбивкой ее по горизонтальной r и вертикальной z координатам. Разбивка по горизонтали соответствует радиальной системе координат.

Вычислительный алгоритм осуществляют по схеме:

— на основе величин моделируемых функций (напоров или понижений), рассчитанных на предыдущем шаге (или соответствующих начальным условиям), находят первое приближенное решение на расчетном шаге прогонкой вначале по оси or, а затем по ортогональной оси oz;

— процедуру получения решения на расчетном шаге повторяют, однако порядок прогонки при этом меняют — сначала производят прогонку по оси oz, затем по оси or. Полученный результат рассматривают как второе приближенное решение задачи на расчетном шаге;

— искомое решение на каждом расчетном шаге находят как осредненную величину первого и второго приближенных решений;

— потом переходят к следующему временному шагу с тем же алгоритмом получения решения.

На основе решения тестовых задач выявлена наиболее рациональная пространственная разбивка.

Разбивка по горизонтали основана на том, что оптимальное расположение центров расчетных блоков отвечает соотношению:

$$r_i = 0{,}5\,(r_i' + r_i''),$$

где r_i' — центр тяжести по фильтрационным сопротивлениям; r_i'' — центр тяжести по площадям элементарных блоков.

Разбивку по вертикали целесообразно выбирать следующим образом: один блок для относительно проницаемых слоев и от одного до пяти блоков — для слабопроницаемых, относительно «водоупорных» слоев (1 блок — для жесткого режима фильтрации, 3—5 блоков — для упругого режима этих слоев).

Результаты численных экспериментов свидетельствуют о том, что увеличение количества блоков сверх указанного не приводит к практическому повышению точности решения. Эти результаты позволяют также сделать вывод о том, что при весьма сложном строении водоносного комплекса оптимальное общее число расчетных блоков не должно превышать 200—300. Для реальных расчетных схем это число составляет 100—150 блоков.

Максимальные погрешности численного решения в рамках неявных схем возникают в результате грубой аппроксимации временной производной. При имитации условий проведения опытных откачек этот вопрос имеет принципиально важное значение, так как типичной является необходимость получения численного решения для существенно разных моментов времени (от десятков секунд до десятков суток). Следовательно, для специализированной программы совершенно не приемлемо использование постоянного временного шага.

Программой «S A T I R» предусматривается «ступенчатое» укрупнение временного шага по мере увеличения продолжительности откачки, которое реализуется при переходе от одного выделенного временного интервала к другому. При этом весь период откачки (или восстановления напоров) разбивают на несколько временных интервалов, отличающихся на порядок величин (начиная от интервала 10^{-5}—10^{-4} сут до интервала 10—10^{2} сут).

В пределах каждого интервала величину временного шага выбирают постоянной, причем ее контроль производится исходя из следующих требований:

— она должна быть приемлемой (по числу шагов) для расчета функций по двум смежным временным интервалам (из выделенных);

— при расчете функций в пределах каждого выделенного временного интервала необходимо, чтобы выбранный для него

шаг по времени обеспечивал требуемую точность к концу предыдущего временного интервала (для расчетного интервала эта точность будет заведомо выше);

— качество дискретности по времени необходимо проверять посредством сравнения вариантов решения на границах временных интервалов — один из вариантов с минимальным числом временных шагов, а другой — с максимальным.

Постоянство дебита водопонижающей скважины обеспечивается итеративным способом с учетом возможной неравномерности его поступления по стволу скважины.

2.4.5. Предлагаемый вариант программы «S A T I R » занимает 200 кб оперативной памяти. Среднее время расчета функций на каждом временном шаге (при разбивке области на 100—150 элементарных блоков) составляет 1—2 с.

Практическая апробация программы «S A T I R» (см. прил. 2) свидетельствует об ее эффективности при анализе разнообразных факторов, осложняющих проведение и интерпретацию опытных откачек.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ИНТЕРПРЕТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ОПЫТНО-ЭКСПЛУАТАЦИОННОГО ВОДОПОНИЖЕНИЯ

3.1. Постановка задачи

Опытно-эксплуатационное водопонижение по масштабам воздействия на природную обстановку, по длительности и по объемам наблюдений занимает промежуточное положение между кустовыми откачками и эксплуатационным водопонижением. Опытное водопонижение проводится на завершающем этапе разведочных работ из наиболее водообильного водоносного горизонта. Основная цель этой операции — смоделировать работу системы осушения месторождения, уточнить условия взаимосвязи водоносных комплексов, получить критерии увязки локальных параметров, определенных на предыдущих стадиях гидрогеологической разведки. В целом опытное водопонижение — крупномасштабная многоцелевая кустовая откачка, позволяющая повысить качество гидродинамической схематизации, уточнить расчетные параметры и граничные условия области фильтрации. При анализе результатов опытно-эксплуатационного водопонижения возникает необходимость диагностики областей фильтрации сложного строения. Достоверность такой диагностики определяется степенью сложности гидрогеологического строения и качеством исходных данных, с одной стороны, совершенством и доступностью рекомендуемого к использованию математического аппарата, с другой.

Основная задача гидрогеологической разведки на стадии опытных работ — получение количественных значений средних параметров, необходимых для прогнозных расчетов.

Основным требованием, обусловливающим переход от реальной среды, состоящей из набора в общем случае разнородных по свойствам блоков, к модели однородного фильтрационного поля, является аддитивность рассматриваемого параметра.

Погрешность определения среднего параметра при этом [10] обратно пропорциональна корню из числа блоков:

$$\delta_A \doteqdot 1/\sqrt{N}, \tag{56}$$

где $\delta_A = \sqrt{(\Delta\overline{A})^2/A_{ср}}$ — относительная флуктуация параметра, $(A^2)_{ср} - (A_{ср})^2 = (\Delta\overline{A})^2$; $A_{ср} = \Sigma A_i/N$; $(A^2)_{ср} = \Sigma A_i^2/N$.

Наряду с определением средних параметров, характеризующих водоносный горизонт или крупные его «куски», следует устанавливать параметры небольших по размерам зон неоднородности водоносных горизонтов, характеризующих условия взаимосвязи и питания подземных вод [11]. Эту задачу решают при постановке опытно-эксплуатационного водопонижения. Целесообразно выделить две группы решаемых вопросов, обусловливающие специфику организации и методики опытных работ — идентификация

параметров зон неоднородности в плане, с одной стороны, и в разрезе, с другой. В схемах плановой неоднородности можно выделить варианты гидрогеологического строения, характерные для угольных месторождений:

Две зоны: 1) неоднородность по проводимости водоносного горизонта; 2) неоднородность по проводимости и водоотдаче.

Три зоны: 1) неоднородность по проводимости (разлом); 2) неоднородность по проводимости и водоотдаче («выход» под «наносы»); 3) то же, с «выходом» под реку.

Круговая неоднородность.

Влияние смежных по вертикали водоносных горизонтов изучают для следующих схем осесимметричной фильтрации:

— взаимодействующий водоносный горизонт изолирован от питания;

— взаимодействующий водоносный горизонт с перетеканием.

3.2. Основные схемы плановой неоднородности водоносных комплексов

3.2.1. Две зоны: $a_1 = a_2$, $T_1 \neq T_2$.

Схема соответствует двум случаям: 1) в пределах одного горизонта при сохранении литологии отложений выделяются две области с различной средней мощностью пород; 2) «выход» наклонно залегающих рыхлых отложений под покровные отложения без разделяющего слоя, при условии примерного равенства водоотдачи и коэффициентов фильтрации водоносных горизонтов. Решение, описывающее понижения уровней в случае откачки из зоны с проводимостью T_1 (дебит скважины Q), имеет следующий вид [12]:

$$S_1 = \frac{Q}{4\pi T_1} Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) - \frac{Q_1}{4\pi T_1} Ei\left(-\frac{r_1^2}{4at}\right);$$

$$S_2 = \frac{Q_2}{4\pi T_2} Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right); \qquad (57)$$

$$Q_1 = \frac{(T_2 - T_1)}{(T_2 + T_1)} Q; \quad Q_2 = \frac{2T_2}{(T_1 + T_2)} Q,$$

где r — расстояние от водопонизительной скважины; r_1 — расстояние от «отраженного» стока с координатами $x = 0$, $y = 2R$ (R — расстояние от границы между зонами).

Ось x направлена вдоль границы, y — по нормали к ней, начало координат — в точке расположения центральной скважины; индексы 1, 2 — соответственно, для зоны размещения центральной скважины и второй зоны, отличающейся проводимостью.

Как следует из решения (57), при наличии пьезометров во второй зоне обычными методами типовой кривой определяют полусумму проводимостей обеих зон $(T_1 + T_2)/2$. Проводимость и

пьезопроводность первой зоны проще всего определить по начальному этапу откачки, когда

$$S = S_1' = (Q/4\pi T_1)\, Ei\,(-r^2/4at), \qquad (58)$$

а затем, используя метод сложения течений, выделить разность $S_1'' = S_1 - S_1'$, построить график $S_1''(t)$. Поскольку понижение

$$S_1'' = [(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)]\, QEi(-r_1^2/4at)/4\pi T_1, \qquad (59)$$

то можно определить соотношение $(T_1 - T_2)\,/\,(T_1 + T_2)$, значение $r_1^2/4at$ и по известным T_1 и a рассчитать величины T_2 и r_1, сравнить с величиной T_2, определенной по пьезометрам второй зоны, уточнить из соотношения $r_1 = \sqrt{(2R - y)^2 + x^2}$ (где r_1 — расстояние от пьезометра до «отраженного» стока; x, y — координаты пьезометра) положение границы (т. е. величину R).

3.2.2. Две зоны, изолированный пласт: $a_1 \neq a_2$, $T_1 \neq T_2$.

В этом, более общем, случае для упрощения методики расчета параметров целесообразно использовать схему проведения опыта, при которой возможно выделить область одномерной фильтрации, пересекающей границу. Для этой цели откачку проводят из цепочки скважин с равным максимальным дебитом (условие $S = S_{max}$), при котором обеспечивается постоянное понижение на границе дренажа. Последняя ориентирована вдоль границы между зонами и отстоит от нее на расстояние R. Наблюдения проводят по осевому створу пьезометров, расположенному посередине цепочки и ориентированному по нормали к направлению границы. Скважины размещены в первой и второй зонах по направлению к границе и от границы. Параметры по данным графиков $S(x, t)$ рассчитывают на основе решения [7]:

$$S_1 = S_0 erfc\,\frac{x}{2\sqrt{a_1 t}} - S_0 \sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1-k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right)^n \times$$
$$\times\left[erfc\left(\frac{2nR - x}{2\sqrt{a_1 t}}\right) - erfc\left(\frac{2nR + x}{2\sqrt{a_1 t}}\right)\right];$$
$$S_2 = S_0\left(\frac{2k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right)\sum_{n=1}^{\infty}\left(\frac{1-k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right)^{n-1} \times$$
$$\times erfc\left[\frac{x - R + (2n-1)\sqrt{(a_2/a_1)}R}{2\sqrt{a_2 t}}\right], \qquad (60)$$

где $k_\varepsilon = \sqrt{T_1\mu_1/T_2\mu_2}$ — коэффициент гидравлической активности первой зоны относительно второй.

На начальном этапе откачки по данным наблюдений в первой зоне определяют величину a_1 по графику $S_1' = S_0 erfc\,(x/2\sqrt{a_1 t})$. Одновременно из зависимости $q = T_1 S_0/2\sqrt{\pi a_1 t}$ (где $2q = Q_{скв}/\sigma$; $Q_{скв}$ — дебит скважины; σ — расстояние между скважинами) определяют проводимость первой зоны T_1. Затем по начальному отрезку графиков $S_2(t, x')$ во второй зоне методом типовых кривых $erfcx^2$ определяют соотношение $2k_\varepsilon/(1 + k_\varepsilon)$, используя зависимость

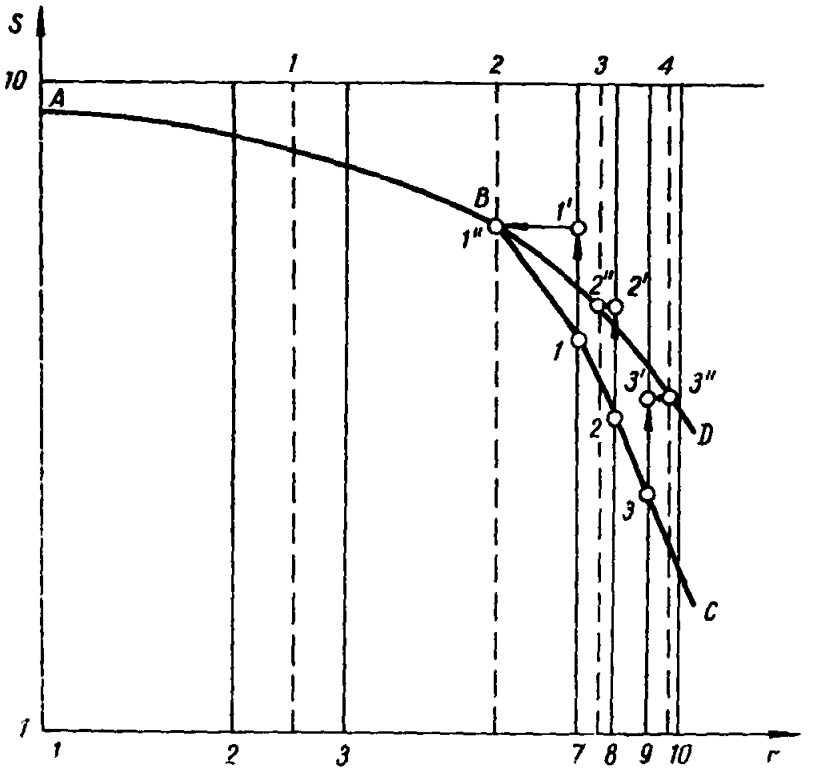


Рис. 21. Перестроение графика площадного прослеживания для определения параметров 2-й зоны:

1—3 — положение понижений уровня во 2-й зоне на графике, построенном без искажения масштаба; *1'—3'* — положение тех же точек после приведения к коэффициенту $K_{\varepsilon 12}=1$; *1"—3"* — положение точек после перемещения их на типовую кривую *ierfcx ABD* с параметрами 1-й зоны; — — — — ординатные оси билогарифмической основы после приведения соотношений расстояний между точками *1"*, *2"*, *3"* к исходному соотношению расстояний между точками *1*, *2*, *3*

$S'_2=[S_0 2k_\varepsilon/(1+k_\varepsilon)]erfc\{[x-R(1-\sqrt{a_2/a_1})]/2\sqrt{a_2 t}\}$ и величину a_2, что позволяет найти значения T_2 и μ_2 параметров второй зоны.

Определение параметров второй зоны по данным площадного прослеживания заключается в построении серии кривых $S(x, t')$ для разных значений t' и совмещении этих кривых с эталонной кривой $y=ierfcx$. Вначале по известному коэффициенту k_ε, определенному по графикам $S(x', t)$, корректируют понижения уровней во второй зоне, в результате график $S(x, t')$ приводят к постоянному значению $T_1\mu_1=T'_2\mu'_2$ (приведенный коэффициент гидравлической активности $k'_\varepsilon=1$); для этого понижения уровней во второй зоне умножают на коэффициент $(1+k_\varepsilon)/2k_\varepsilon$. Полученные точки затем смещают на график типовой кривой по горизонтали и новое положение точек «привязывают» к координатным осям следующим образом (рис. 21): перемещением приведенного графика по горизонтальной оси координатной сетки находят положение, в котором соотношение фактических расстояний между точками соответствует соотношению проекций расстояний между этими точками на

координатную основу (расстояний по оси абсцисс сдвинутой билогарифмической сетки), затем по известному расстоянию между точками определяют масштаб полученного таким образом графика.

Параметр пьезопроводности второй зоны определяют из соотношения

$$x(0) = x + (\sqrt{a_2/a_1} - 1)R, \qquad (61)$$

где $x(0)$ — координата точки после перестроения графика; x — фактическая координата той же точки наблюдений; a_2, a_1 — пьезопроводности второй и первой зон, соответственно; R — расстояние до границы между зонами.

Аналогичным образом по данным наблюдений в пьезометрах, размещенных в первой зоне между цепочкой скважин и второй зоной, по отрезку графика, соответствующего влиянию первого «отклика» зоны, т. е.

$$\begin{aligned} S_1 &= S_1' - \left(\frac{1-k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right) S_0 erfc\left(\frac{2R-x}{2\sqrt{a_1 t}}\right); \\ S_1'' &= S_1 - S_1' = S_0\left(\frac{k_\varepsilon - 1}{k_\varepsilon + 1}\right) erfc\left(\frac{2R-x}{2\sqrt{a_1 t}}\right), \end{aligned} \qquad (62)$$

определяют соотношение $(k_\varepsilon - 1)/(k_\varepsilon + 1)$, из которого можно рассчитать величины $T_2\mu_2$ по уже найденным значениям T_1 и μ_1. Следует отметить, что без наблюдений в пьезометрах, установленных во второй зоне, определить ее параметры можно только с привлечением графика второго «отклика», т. е., во-первых, при идеально проведенной длительной откачке (постоянство дебита скважин, высокая точность замеров уровней):

$$\begin{aligned} S_1 &= S_1' + S_1'' + \left(\frac{1-k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right) S_0 erfc\left(\frac{2R+x}{2\sqrt{a_1 t}}\right); \\ S_1''' &= S_1 - S_1' - S_1'' = S_0\left(\frac{1-k_\varepsilon}{1+k_\varepsilon}\right) erfc\left(\frac{2R+x}{2\sqrt{a_1 t}}\right); \end{aligned} \qquad (63)$$

во-вторых, в отсутствие «сбивающих» график $S(t)$ помех (площадной, вертикальной неоднородности, границ). Поскольку в обычных условиях помехи неизбежны, установка пьезометра во второй зоне гарантирует получение достоверных ее параметров, контроль положения границы раздела и оценки влияния на откачку факторов, не учитываемых решением (60).

3.2.3. *Однородный водоносный горизонт, разделенный на три зоны разломом.* Зона разлома может быть аппроксимирована полосой шириной b с проводимостью T_2 и пьезопроводностью, примерно равной пьезопроводности водоносного горизонта вне зоны разлома. Решение для откачки из скважины с постоянным дебитом Q из водоносного горизонта с проводимостью T_1 при

расположении скважины на расстоянии R от зоны разлома получено методом суперпозиции течений [1] и имеет вид [13]:

$$S_j = \sum_{i=1}^{\infty} f_j^i(Q, r, t); \tag{64}$$

$$f_j^i(Q, r, t) = (Q_j^i/4\pi T_j)Ei(-(r_j^i)^2/4at), \tag{65}$$

где r_j^i — расстояние от расчетной точки до i-го источника; j — номер зоны: $j = 1, 2, 3$.

Значения Q_j^i и r_j^i определяют по формулам:

при $j = 1$ (зона расположения откачной скважины):

$$Q_1^{(1)} = Q; \qquad x_1^{(1)} = 0;$$

$$Q_1^{(2)} = [(T_2 - T_1)/(T_2 + T_1)]\, Q; \qquad x_1^{(2)} = 2R; \tag{66}$$

$$Q_1^{(n+2)} = \left[\frac{4T_1T_2(T_2 - T_1)^{2n-1}}{(T_1 + T_2)^{2n+1}}\right] Q; \quad x_1^{(n+2)} = 2(R + nb); \quad n = 1, 2 \ldots$$

при $j = 2$ (зона разлома):

$$Q_2^{(n+1)} = \left[\frac{2T_1(T_2 - T_1)^n}{(T_2 + T_1)^{n+1}}\right] Q; \qquad n = 0, 1 \ldots$$

$$x_2^{(2n+1)} = -nb, \quad n = 0, 1\ldots \tag{67}$$

$$x_2^{(2n)} = 2R + (n + 1)b, \; n = 1, 2\ldots$$

при $j = 3$ (зона за разломом)

$$Q_3^{(n+1)} = \left[\frac{4T_1T_2(T_2 - T_1)^{2n}}{(T_2 + T_1)^{2(n+1)}}\right]; \tag{68}$$

$$x_3^{(n+1)} - 2nb, \; n = 0, 1, 2\ldots$$

Это решение позволяет определить понижения уровней во всех трех зонах как результат сложения течений к стокам (источникам), дебиты которых Q_j^i и расстояния x_j^i от центральной скважины, отсчитываемые по оси, ориентированной по нормали к разлому, известны.

Проводимость зоны разлома и зон водоносного горизонта, прилегающих к разлому, может быть определена методом графического разложения кривых $S(t, r')$ путем выделения первого и двух-трех последующих членов из суммы бесконечного ряда функций влияния источников (стоков). По графикам $S = f(t)$ наблюдений в скважинах, расположенных в первой зоне, в период, когда $S_1 = (Q/4\pi T_1)Ei(-r^2/4at)$, рассчитывают параметры T_1 и a водоносного горизонта. По периоду, когда

$$S_1 = \frac{Q}{4\pi T_1} Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) + \frac{Q}{4\pi T_1}\frac{(T_1 - T_2)}{(T_1 + T_2)} Ei\left(-\frac{r_1^2}{4at}\right), \tag{69}$$

вычисляют параметр T_2 и значение r_1, уточняющее удаление R зоны разлома от центральной скважины. В период, когда

$$S_1 = (Q/4\pi T_1)Ei(-r^2/4at) + (Q/4\pi T_1)[(T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)] \times$$
$$\times Ei(-r_1^2/4at) + \lambda(Q/4\pi T_1)Ei(-r_2^2/4at),$$

рассчитывают значение r_2, по которому можно определить ширину зоны разлома b и т. д.

Интерпретация данных наблюдений в скважинах, расположенных в зоне разлома и за ним, особенно в случае, когда ширина b мала в сравнении с величиной R, имеет целью проконтролировать допустимость использования и надежность расчетной схемы. Полученные по наблюдениям в первой зоне параметры разлома T_2 и b, используют в прямом расчете по формулам, описывающим понижения уровней во второй и третьей зонах. Результаты расчета сравнивают с фактическими графиками $S = f(t)$. Методом подбора уточняют значения параметров, выясняют причины несовпадения их расчетных значений.

При переходе фильтрации в квазистационарный режим допустимо провести обработку по формулам (65)—(68), заменив величину f_j' на

$$f_j'(Q, r) = \frac{Q_j'}{2\pi T_j} \ln \frac{R_0}{r_j'}, \qquad (70)$$

где $R_0 = 1{,}5\sqrt{at}$.

Значения T_1, T_2 рассчитывают по известным величинам b, R методом подбора по разности понижений уровней (что позволяет исключить погрешность параметра R_0).

3.2.4. Три зоны, изолированный пласт: $a_i \neq \text{const}$, $T_i \neq \text{const}$.

Аналогично схеме 3.2.2 откачку проводят из цепочки скважин с равным максимальным дебитом. Это обеспечивает создание полосы одномерного потока с заданным понижением на контуре цепочки скважин.

Решение задачи в общем виде представляет собой сумму рядов функций $erfc(x, R, t)$, причем для расчета параметров в каждой из зон используют начальные участки графиков и участки вступления первых отражений, что позволяет применить метод разложения графиков $S = f(x', t)$ на составляющие. Так, по начальному этапу графиков первой и третьей зон, по аналогии со схемой 3.2.2, находят параметры T_1, μ_1, T_2, μ_2. Для третьей зоны используют зависимость

$$S_3 = S_3' = S_0[4k_{\varepsilon 12}k_{\varepsilon 23}/(1 + k_{\varepsilon 12})(1 + k_{\varepsilon 23})] \times$$
$$\times erfc\left[\frac{x + (R\sqrt{a_2/a_1} + b)(\sqrt{a_3/a_2} - 1))}{2\sqrt{a_3 t}}\right], \qquad (71)$$

где S_0 — понижение уровня на цепочке водопонизительных скважин в первой зоне; $k_{\varepsilon 12} = \sqrt{T_1\mu_1}/T_2\mu_2$ — коэффициент гидравлической активности первой зоны относительно второй; $k_{\varepsilon 23} = \sqrt{T_2\mu_2}/T_3\mu_3$ — коэффициент гидравлической активности второй зоны относитель-

но третьей; x — расстояние от створа водопонизительных скважин; R — ширина первой зоны; b — ширина второй зоны.

По этой зависимости, используя определенные по данным наблюдений в первой и второй зонах значения T_1, μ_1, T_2, μ_2, можно рассчитать параметры T_3 и μ_3 третьей зоны.

Как видно из формул (60), (71) и прил. 1, увеличение числа зон неоднородности осложняет определение параметров взаимодействующих зон по данным откачки из одной из них. В частном случае, когда ширина второй зоны («разделяющей») невелика, а ее проницаемость меньше, чем соседних зон, трехзонная схема трансформируется в двухзонную с «разделяющим слоем». При этом допустимо пренебречь необходимостью определения водоотдачи пород второй зоны. Задача определения параметров этой зоны сводится к нахождению отношения T_2/b, аналогичного коэффициенту перетекания в схеме с вертикальной неоднородностью. Наиболее надежно этот параметр оценивают в режиме квазистационарной фильтрации по известному расходу q и перепаду понижений уровней ΔS в точках $x = R$ и $x = R + b$, т. е. по пьезометрам, расположенным в первой и третьей зонах на границе со второй, из зависимости

$$q = T_2 \Delta S / b. \tag{72}$$

3.2.5. «Пятно» (кругообразная зона) значительных размеров. Для анализа данных откачки, проведенной из скважины, расположенной на расстоянии $a + r_0$ от центра круговой зоны радиусом r_0, можно использовать решение [14], описывающее стационарный режим фильтрации:

$$S = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[\ln 2R/r + \lambda \ln r_2/r_1 \right], \tag{73}$$

где T_1 и T_2 — проводимости водоносного горизонта, соответственно, вне и внутри круговой зоны; R — радиус влияния (можно принять $R = 1{,}5\sqrt{at}$); r — расстояние от пьезометра до центральной скважины; $\lambda = (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)$; r — расстояние до центра зоны; r_1 — расстояние до точки, обратной точке расположения центральной скважины относительно контура круговой зоны.

Для случая, когда можно принять параметр $a = \text{const}$, зависимость $S = f(t)$ имеет вид:

$$S = \left(\frac{Q}{4\pi T_1}\right)\left[Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right) + \lambda\left\{ Ei\left(-\frac{r_1^2}{4at}\right) - Ei\left(-\frac{r_1^2}{4at}\right)\right\}\right]. \tag{74}$$

Это позволяет использовать метод разложения графика $S = f(t, r')$ на слагаемые для поочередного определения значений T_1 и a (по начальному отрезку графика), T_2, r_1 и r_2 (по последующим кускам

графика). Каждое слагаемое здесь описывается типовой функцией с параметрами, зависящими от граничных условий.

Когда значение коэффициента гидравлической активности водоносного горизонта относительно круговой неоднородности $k_\varepsilon = \sqrt{T_1\mu_1/T_2\mu_2}$ близко к 0 и величина $\lambda = -1$, схема фильтрации соответствует случаю неоднородности, обусловленной расположением водоема на зоне размыва водоносного горизонта без кольматации. Если величины $k_\varepsilon = \infty$, $\lambda = 1$, то схема фильтрации соответствует случаю неоднородности типа размыва, заполненного глинистыми осадками.

3.3. Основные схемы многоярусных толщ

Исследование параметров водоносных комплексов, представленных несколькими «этажами» (ярусами) водоносных горизонтов, разделенных между собой слабопроницаемыми отложениями, наиболее целесообразно проводить, опробуя поочередно каждый водоносный горизонт. Как правило, для получения ощутимого (по величине понижений в смежных водоносных горизонтах, а также по площади депрессионной воронки) эффекта взаимодействия необходимо длительное время вести откачку с максимальным дебитом, т. е. проводить опытно-эксплуатационное водопонижение. В этом случае определение фильтрационных параметров смежного горизонта по его реакции на откачку может служить основным источником информации о его фильтрационных свойствах.

3.3.1. Взаимодействующий изолированный водоносный горизонт «жестко» реагирует на откачку из дренируемого водоносного горизонта. Приближенное решение нестационарной задачи имеет вид [15]:

$$S_1 = \frac{Q}{4\pi(T_1+T_2)}\left[Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right)+\left(\frac{T_2}{T_1}\right)W(r^2/4at,\ r/B)\right];$$
$$S_2 = \frac{Q}{4\pi(T_1+T_2)}\left[Ei\left(-\frac{r^2}{4at}\right)-W(r^2/4at,\ r/B)\right], \qquad (75)$$

справедливый при $a_1 = a_2$.

При этом разность понижений уровней в водоносных горизонтах на одинаковом удалении от центральной скважины описывается зависимостью

$$S_1 - S_2 = (Q/4\pi T_1)W(r^2/4at,\ r/B), \qquad (76)$$

соответствующей схеме с «обеспеченным» перетеканием (16), а сумма $S_+ = S_1 + (T_2/T_1)S_2$ — зависимостью

$$S_+ = (Q/4\pi T_1)Ei(-r^2/4at). \qquad (77)$$

Отсюда последовательность обработки данных откачки с учетом взаимодействия будет такой: на начальном этапе определяют параметры T_1 и a по данным наблюдений в дренируемом вг, по-

скольку для малых значений времени выполняется равенство $S_1 = (Q/4\pi T_1)Ei(-r^2/4at)$. Затем по графикам $S_1 - S_2 = f(r', t)$ определяют фактор перетекания B (зависимость $S_1 - S_2 = (Q/4\pi T_1) \times W(r^2/4at, r/B)$. На конечном этапе определяют значение T_2. Поскольку при величине $t \to \infty$, $0{,}5W(0, r/B) \to K_0(r/B)$, то

$$\underset{t\to\infty}{S_1} = \frac{Q}{4\pi(T_1+T_2)} Ei\left(-\frac{r^2}{4a_1^* t}\right), \tag{78}$$

где значение приведенной пьезопроводности

$$a_1^* = a\exp\left[2(T_2/T_1)K_0(r/B)\right] \tag{79}$$

и аналогично

$$\underset{t\to\infty}{S_2} = \frac{Q}{4\pi(T_1+T_2)} Ei\left(-\frac{r^2}{4a_2^* t}\right), \tag{80}$$

где $a_2^* = a\exp\left[-2K_0(r/B)\right]$.

Таким образом, для надежного определения параметров взаимодействующего вг необходимо вывести режим откачки на квазистационарный не только в дренируемом, но и во взаимодействующем вг.

3.3.2. Взаимодействующий водоносный горизонт с обеспеченным перетеканием из недренируемого водоносного горизонта. Приближенное решение нестационарной задачи имеет вид [16]:

$$S_1 = \frac{Q\left[c_2 W(r^2/4at, r\omega_2) + c_1 W(r^2/4at, r\omega_1)\right]}{4\pi T_1 (c_1 + c_2)};$$

$$S_2 = \frac{Q\left[W(r^2/4at, r\omega_1) - W(r^2/4at, r\omega_2)\right]}{4\pi T_1 (c_1 + c_2)};$$

$$c = \frac{1}{1-\omega_1^2 B_1^2};\quad c_2 = \frac{1}{\omega_2^2 B_1^2 - 1}; \tag{81}$$

$$\omega_2^2 B_1^2 = \left[(k_{01}T_1/m_{01}T_2 + T_1/T_2 + 1) + \sqrt{(k_{01}T_1/m_{01}T_2 + T_1/T_2 + 1)^2 - 4k_{01}T_1/m_{01}T_2}\right]/2;$$

$$\omega_1^2 B_1^2 = \left[(k_{01}T_1/m_{01}T_2 + T_1/T_2 + 1) - \sqrt{(k_{01}T_1/m_{01}T_2 + T_1/T_2 + 1)^2 - 4k_{01}T_1/m_{01}T_2}\right]/2.$$

Здесь k_{01}, m_{01} — коэффициент фильтрации и мощность слабопроницаемого слоя, через который поступает расход питания взаимодействующего вг; B_1, B_2 — факторы перетекания, соответственно, из дренируемого вг во взаимодействующий и, наоборот, из взаимодействующего в дренируемый; T_1, T_2 — проводимости дренируемого и взаимодействующего вг; ω_1, ω_2, c_1, c_2 — постоянные коэффициенты.

Определение параметров в этой схеме методом типовых кривых возможно только на асимптотических отрезках режима откачки: на начальном этапе, когда $W(u, \beta) = Ei(-u)$, из соотношения

$S=(Q/4\pi T_1)Ei(-r^2/4at)$ вычисляют значения T_1, a; затем используют зависимости схемы 3.3.1 для первого и второго водоносных горизонтов, а на конечном этапе откачки, когда $W(u, \beta)=2K_0(\beta)$, применяют решение для стационарного режима [16]:

$$S_1=\frac{Q[c_1K_0(r\omega_1)+c_2K_0(r\omega_2)]}{2\pi T_1(c_1+c_2)};$$

$$S_2=\frac{Q[K_0(r\omega_1)-K_0(r\omega_2)]}{2\pi T_1(c_1+c_2)}. \qquad (82)$$

При интерпретации данных опробования многослойных толщ необходимо иметь в виду, что графики понижений уровней в основном вг сходны с графиками, получаемыми при откачках с влиянием плановых «питающих» границ (например, безнапорной зоны вг или выходов под покровные отложения). Таким образом, интерпретация откачек с одновременным проявлением плановой и вертикальной неоднородности возможна лишь при условии получения информации о поведении уровней во взаимодействующем вг, в разделяющем слое и у границ пласта.

В случае весьма сложных схем фильтрации — при наличии более двух взаимодействующих вг или зон площадной неоднородности — число факторов, подлежащих контролю, возрастает, а величина понижения уровней убывает, что приводит к росту погрешности и делает оценки параметров удаленных зон и горизонтов малодостоверными.

4. ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМАТИЗАЦИЯ ПРИ АНАЛИЗЕ МАТЕРИАЛОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА РЕЖИМОМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД НА СТАДИИ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Гидрогеологическая схематизация — обязательный и наиболее ответственный элемент интерпретации исходных гидрогеологических данных. Содержание гидрогеологической схематизации — обоснованное представление схемы в целом или отдельных ее элементов в виде менее сложных (типовых) схем (см. разд. 1). Общий подход к схематизации при определении гидрогеологических параметров, в принципе, отличается от схематизации, реализуемой при решении прогнозных задач. Основным отличием является необходимость взаимной увязки и корректировки как фильтрационных параметров расчетной гидродинамической схемы, так и других ее элементов. В частности, расчетные значения фильтрационных параметров целесообразно определять, рассматривая несколько возможных вариантов расчетных схем, с близкой достоверностью отражающих режим питания и разгрузки подземных вод.

4.1. Схематизация развития фильтрационных процессов во времени

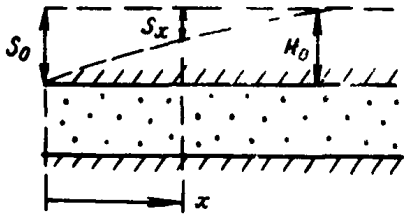
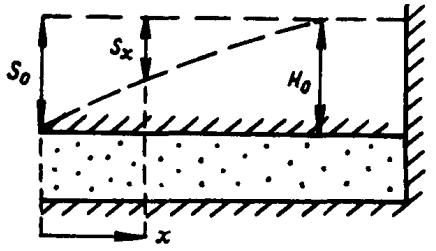
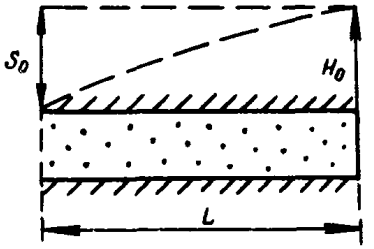
Замена схем нестационарной фильтрации квазистационарными аналогами играет исключительно важную роль при определении параметров проводимости водоносных горизонтов. Возможность такой замены контролируется критериями, зависящими от фильтрационных характеристик и граничных условий рассматриваемого водоносного горизонта (табл. 20).

Условия квазистационарности отвечают определенной стадии процесса, поэтому критерии, приведенные в табл. 20, отражают оценки этой стадии либо по времени ее достижения $t_{кс}$ (с момента возмущения пласта), либо по понижениям в некоторой зоне, прилегающей к границе возмущения (дренажа) S_x или S_r (x и r — координаты внешней границы этой зоны в прямоугольной и полярной системах).

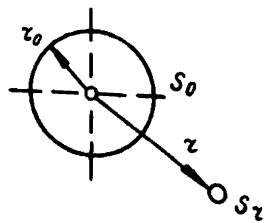
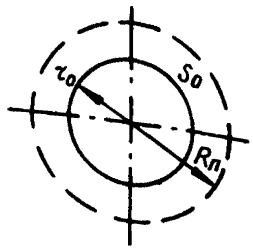
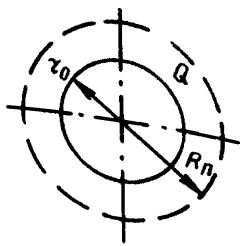
4.2. Схематизация условий на границах области фильтрации

Условия на границах питания дренируемых водоносных горизонтов (вг) предварительно устанавливают исходя из общих представлений о геологическом строении водоносных комплексов, соотношения проницаемости его элементов, гидрологических данных. Для уточнения условий на выделенных границах следует использовать результаты режимных наблюдений. На стадии

Таблица 20

Структура потока и условия на его границах	Схема	Критерии квазистационарности	Номер формулы
Плоскопараллельный полуограниченный; на границе дренажа постоянное понижение S_0		$S_x / S_0 > 0{,}65$ $t_{кв} > 2{,}5x^2 / a$	(83) (84)
Плоскопараллельный; внешняя граница — непроницаемый контур; на границе дренажа постоянное понижение S_0		$S_x / S_0 > 0{,}8$ $t_{кс} > 3x^2 / a$	(85) (86)
Плоскопараллельный; внешняя граница — контур обеспеченного питания; на границе дренажа постоянное понижение S_0		$t_{кс} > 0{,}3L^2 / a$ $S_x \approx S_0 \cdot x / L$	(87)

Окончание табл. 20

Структура потока и условия на его границах	Схема	Критерии квазистационарности	Номер формулы
Осесимметричный, неограниченный внешним контуром; на границе дренажа задано понижение S_0		$S_r / S_0 > 0{,}15$ $t_{кв} > 3(r - r_0)^2 / a$	(88)
Осесимметричный; внешний контур с радиусом $R_п$ — граница обеспеченного питания; на границе дренажа с радиусом r_0 задано постоянное понижение S_0		$t_{кс} > 0{,}3(R_п - r_0)^2 / a$	(89)
Осесимметричный; внешний контур — граница обеспеченного питания; на границе дренажа задан постоянный расход Q		$t_{кс} > 0{,}7(R_п - r_0)^2 / a$	(90)

предварительных оценок контуры водоемов и водотоков, расположенных на площади выхода рассматриваемых горизонтов на поверхность, можно принимать за границы с условиями первого рода (постоянный или изменяющийся по известному закону напор). В дальнейшем необходимо определять (по результатам наблюдений) дополнительное сопротивление русла реки (водоема). На этих контурах могут быть заданы либо условия перетекания, либо инфильтрации (при отрыве уровня дренируемого горизонта от подошвы слабопроницаемых отложений, кольматирующих русло). Контакты анализируемого водоносного горизонта с более водообильным горизонтом (при соотношении их проводимостей примерно 1:10), а также контуры затопленных выработок можно рассматривать как границы с заданными (известными по результатам наблюдений) напорами. Эти же условия могут быть приняты и на контурах выходов напорного водоносного пласта под обводненные покровные отложения (при гравитационной водоотдаче покровных отложений, на порядок и более превышающей упругую водоотдачу этого пласта). При наличии материалов систематических режимных наблюдений может быть определена интенсивность инфильтрационного питания или перетекания через покровные отложения на выходах пластов. Водоразделы подземных потоков при питании их за счет инфильтрации или перетекания следует рассматривать как непроницаемые границы.

Контуры открытых горных выработок, вскрывающих водоносные горизонты, однозначно определяют как границы с условиями первого рода (заданный напор, соответствующий отметке подошвы выработки, частично вскрывающей вг). Несовершенные по степени вскрытия водоносных горизонтов выработки можно рассматривать как совершенные (напор соответствует отметке подошвы выработки) при выполнении условия:

$$m/R_0 < 0{,}1, \tag{91}$$

где m — мощность горизонта; R_0 — минимальное расстояние до границы питания водоносного горизонта.

При условии $m/R_0 > 0{,}1$ необходимо учитывать дополнительное фильтрационное сопротивление, определяемое деформацией (структурой) потока вблизи границы разгрузки. Если напорный водоносный пласт отделен от выработки относительным водоупором (проницаемость «водоупорных» пород на порядок ниже проницаемости водоносного пласта), то по площади вскрытия водоупора должно быть задано условие третьего рода (перетекание с постоянным напором в контуре выработки).

Подземные горные выработки различного назначения характеризуются граничными условиями различных типов. Горизонтальные линейные выработки (подготовительные или капитальные) можно принимать за контуры с условиями первого рода. При необходимости должно быть учтено либо несовершенство этих выработок по степени вскрытия горизонта, либо фильтрационное

сопротивление относительного водоупора, экранирующего дренируемый вг от выработки.

Вертикальные и наклонные выработки (стволы, уклоны и т. д.), проводимые без специальных мероприятий по водоподавлению (т. е. без замораживания или тампонажа водоносных пород), следует рассматривать как круговые контуры с условиями первого рода (заданный напор, отвечающий отметке почвы пересекаемых и дренируемых выработкой горизонтов).

Очистные горные выработки (при управлении их кровлей системами с полным обрушением) обычно дренируют несколько пластов, пересекаемых зоной водопроводящих трещин. Формирование зоны водопроводящих трещин над выработанным пространством является сложным геомеханическим процессом. Следовательно, высоту этой зоны необходимо определять опытным путем по результатам специально поставленных режимных наблюдений [19]. Для ориентировочной оценки высоты зоны водопроводящих трещин в слоистых комплексах, представленных циклическим чередованием алевролитов и аргиллитов, могут быть использованы обобщенные эмпирические критерии, приведенные в табл. 21 [20].

Таблица 21

Мощность пласта m, м	Суммарная мощность аргиллитов, алевролитов и глинистых сланцев в процентах от мощности коренных пород в интервале от $10m$ до $60m$ (от кровли вынимаемого пласта)				
	0—20	21—40	41—60	61—80	81—100
1,0	60	55	50	45	40
1,5	90	80	75	70	60
2,0	115	105	95	85	80
2,5	125	115	105	95	85
3,0	140	130	115	105	90
3,5	150	140	125	110	95
4,0	160	150	135	120	105

Зона техногенных водопроводящих трещин характеризуется относительно высокой проницаемостью (на порядок превышающей проницаемость окружающего ненарушенного массива пород) и активной гидравлической связью с выработанным пространством.

Для водоносных пластов, пересекаемых зоной водопроводящих трещин, на границе дренажа следует задавать условия первого рода, т. е. напор должен соответствовать отметке подошвы водоносного пласта по контуру ее пересечения боковыми границами зоны, совпадающими с контуром горной выработки. При формировании водопритоков в очистные выработки за счет водоносных горизонтов, залегающих выше зоны водопроводящих трещин, в контурах этой зоны (по площади выработок) должны быть заданы условия перетекания с постоянным напором на верхней

границе зоны. Такая расчетная схема требует определения вертикальной проницаемости относительных водоупоров, экранирующих водопроводящих трещин.

4.3. Схематизация профильной неоднородности дренируемых комплексов

Слоистые водоносные комплексы при анализе плановых потоков можно рассматривать как квазиоднородные системы, если соотношение проводимостей и проницаемостей отдельных слоев не превышает 1:10. При выполнении этих условий целесообразно определять суммарную проводимость комплекса на участках, удаленных от контуров его дренажа и питания.

Если соотношения проводимостей и проницаемостей отдельных слоев превышают 10:1, фильтрацию в слабопроницаемых слоях можно рассматривать по нормали к напластованию, а движение в контактирующих с ними водоносных пластах — вдоль напластования (в удалении от контура питания и дренажа). Двуслойный комплекс (водоносный пласт перекрыт слабопроницаемыми отложениями) можно рассматривать как квазиоднородную систему; при этом параметр проводимости, получаемый по результатам наблюдений, характеризует водоносный пласт, а емкостные параметры соответствуют свойствам перекрывающего слабопроницаемого слоя.

4.4. Схематизация плановой неоднородности

Схематизация плановой неоднородности сводится к выбору эффективного (среднего) параметра проводимости или водоотдачи. Осреднение проводимости стационарных потоков ограничивается возможностью использования среднегеометрической величины локальных значений проводимостей по отдельным участкам при соотношении этих значений, не превышающем двух. Осреднение обычно имеет смысл при фрагментарном определении проводимости с последующим представлением всего поля фильтрации квазиоднородным аналогом. Осреднение параметров при сложной структуре потока требует применения математического моделирования.

Осреднение емкостных свойств неоднородных полей фильтрации не может считаться целесообразным.

4.5. Схематизация структуры фильтрационных потоков

Схематизация многомерных фильтрационных потоков заключается в их представлении менее сложными по структуре аналогами. В частности, схематизация структуры может сводиться к выделению характерных фрагментов многомерных потоков для последующего их независимого рассмотрения. Двумерные плановые или профильные потоки могут быть представлены отдельными лентами тока,

ограниченными линиями тока, а также контурами питания и дренажа. При решении обратных задач такие ленты тока следует выделять на участках с известными расходами по контурам дренажа и напорами вдоль лент тока. Выделению лент тока при анализе нарушенного режима подземных вод в пределах карьерных и шахтных полей благоприятствует наличие линейных границ дренажа (контуров горных выработок) с замеренными на них расходами и напорами.

Особое внимание при построении лент тока для определения гидрогеологических параметров должно быть уделено составлению карты изопьез: изопьезы следует строить с учетом не только напоров, зафиксированных в отдельных пьезометрах, но и всего комплекса геологической, гидрологической, геофизической информации, результатов опытно-фильтрационных работ, дающих представление о характере фильтрационной неоднородности.

Ленты тока на основе карты изопьез можно строить графически, проводя линии тока от границ дренажа (контура горных выработок с известными расходами) к внешним границам питания ортогонально ко всем промежуточным изопьезам. Таким образом, лента тока, ограниченная смежными линиями тока, представляет собой совокупность расчетных фрагментов.

Схематизация трехмерной структуры потока вблизи несовершенных выработок связана с выделением особой зоны, непосредственно примыкающей к выработке. В пределах этой зоны поток характеризуется профильной двумерностью, не позволяющей использовать здесь плановую постановку обратной задачи. Размеры деформации потока ориентировочно можно оценить зависимостью:

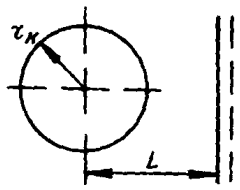
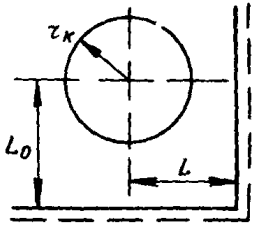
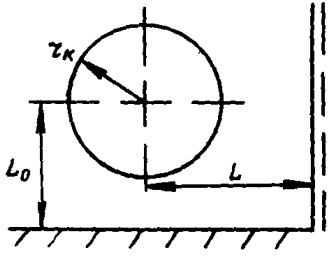
$$L_д \approx 1{,}5m \sqrt{k_x / k_y}, \qquad (92)$$

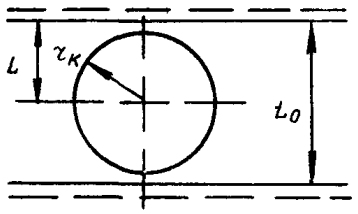
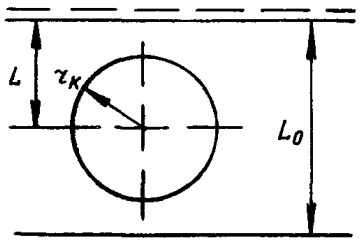
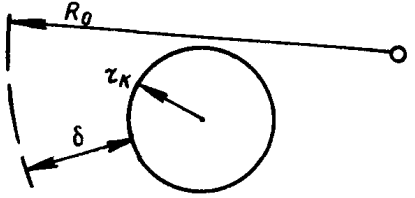
где m — мощность потока вблизи выработки (в пределах зоны $L_д$); k_x, k_y — коэффициенты фильтрации пород в горизонтальном и вертикальном направлениях.

При решении обратных задач по определению параметров целесообразно исключить зону деформации потока из рассмотрения (из расчетной схемы), анализируя ее при необходимости отдельно с применением математического моделирования, которое дает возможность непосредственно учитывать двумерность потока и фильтрационную неоднородность.

Одним из эффективных приемов схематизации двумерных (плановых) потоков является реализация принципа «большого колодца» при рассмотрении условий фильтрации к одиночной горной выработке с круговым контуром дренажа радиусом $r_к$ (или к группе горных выработок, которая может быть приведена к эквивалентной одиночной). Структура стационарного потока в данном случае учитывается величиной расчетного радиуса области фильтрации R, зависящего от характера и положения границ питания (табл. 22).

Таблица 22

Условия питания и дренажа водоносного горизонта	Схема	Выражение для R
1. Выработка у линейной границы с постоянным напором		$2L$
2. Выработка в углу между границами с постоянным напором		$2LL_0 / \sqrt{L^2 + L_0^2}$
3. Выработка в углу между границей с постоянным напором и непроницаемым контуром		$2L\sqrt{L^2/L_0^2 + 1}$

Условия питания и дренажа водоносного горизонта	Схема	Выражение для R
4. Выработка между границами с постоянным напором		$(2/\pi)\,L_0 \sin(\pi L/L_0)$
5. Выработка между границей с постоянным напором и непроницаемым контуром		$(4/\pi)\,L_0 \operatorname{ctg}(\pi L/2L_0)$
6. Выработка в круговой области с постоянным напором на внешней границе		$R_0 - [(R_0 - \delta)^2/R_0]$

При анализе работы дрены в круговой области схему «большого колодца» можно применять, если выполняются условия: $\delta/R_0 > 0{,}1$ и $\delta/r_к > 1$, где R_0 — расстояние от центра дрены радиусом $r_к$ до ближайшей границы питания; δ — минимальное расстояние от контура дрены до этой границы.

Принцип «большого колодца» позволяет определять проводимость однородного поля фильтрации по известным расходам и напорам на контуре горной выработки.

4.6. Схематизация условий питания водоносных горизонтов по площади

Инфильтрационное питание соответствует поступлению определенного расхода по площади (или локальному участку) в водоносный горизонт. Интенсивность этого расхода не зависит от уровней вг. При сохранении «естественной» интенсивности инфильтрационного питания для анализа поля фильтрации может быть использован принцип сложения течений [22]. В этом случае отпадает необходимость непосредственного учета инфильтрации при определении параметров проводимости в условиях линейных расчетных схем (см. п. 4.7).

Следует отметить, что предпосылка о сохранении «естественной» интенсивности инфильтрационного питания справедлива в большей мере для нарушенного режима карьерных полей, так как на шахтных полях естественные инфильтрационные процессы претерпевают существенные изменения за счет деформации массива горных пород и земной поверхности над горными выработками.

При изменении интенсивности инфильтрационного питания по площади развития горизонта или на локальных участках это питание приходится непосредственно учитывать в расчетных схемах (которые могут переходить при этом в категорию сложных). Пренебрежение инфильтрационным питанием во всех случаях приводит к ощутимому завышению проводимости или емкостных характеристик водоносных горизонтов, к ложному представлению о фильтрационной неоднородности.

Особые трудности возникают при схематизации инфильтрационного питания в условиях его существенной изменчивости в годовом цикле, которая определяет нестационарность нарушенного режима в период от межени до паводка. Для краткосрочных прогнозов и оценки сезонного изменения водопритоков требуется определять переменную интенсивность инфильтрационного питания в рамках сложных нестационарных схем (с непосредственным учетом инфильтрации). Для долгосрочных прогнозов (на период в несколько лет) целесообразно определять среднегодовую интенсивность инфильтрационного питания исходя из среднегодовых величин водопритоков к горным выработкам и среднегодовых уровней дренируемых горизонтов.

Анализ схем с инфильтрационным питанием неоднородных пластов требует применения математического моделирования.

Дополнительное питание дренируемых водоносных горизонтов путем перетекания из смежных с ними следует учитывать при оценке параметров водоносных горизонтов и параметров их взаимосвязи. Схематизация процессов перетекания обычно сводится к максимальному упрощению расчетной схемы, к представлению ее квазиоднородными по всем параметрам аналогами (в том числе и по параметрам перетекания). Тем не менее анализ схем с перетеканием зачастую требует применения математического моделирования.

4.7. Схематизация нелинейных фильтрационных процессов

Нелинейность фильтрационных процессов проявляется в изменчивости фильтрационных параметров водоносных горизонтов (проводимость, водоотдача), в трансформации условий на границах питания или дренажа, в изменении положения самих границ в зависимости от величины напоров, определяемой граничными условиями и фильтрационными параметрами.

Наиболее часто встречающаяся нелинейность по параметру связана с изменением проводимости при дренировании безнапорных горизонтов. Она может быть учтена в расчетных схемах применительно к частному случаю — при однородной по проницаемости обводненной толще, подстилаемой горизонтальным водоупором. В этом варианте учет нелинейности осуществляется введением потенциальной функции*:

$$U = 0{,}5h^2, \tag{93}$$

где h — глубина (мощность) потока.

Потенциальная функция (93) может характеризовать схему стационарного или нестационарного потока при определении коэффициента фильтрации обводненной толщи. В нестационарных схемах требуется дополнительный учет изменчивости коэффициента уровнепроводности горизонта. Этот учет чаще всего осуществляется осреднением проводимости — введением средней мощности безнапорного потока.

При относительно малых величинах снижения уровней безнапорных потоков (не более 20% от первоначальной мощности потока) нелинейностью процесса можно либо пренебречь, либо рассматривать расчетную схему, в которой в качестве потенциальной функции принимают величину

$$U_S = 0{,}5(2H_0 - S)S, \tag{94}$$

---

* «Потенциальная функция» обусловлена величиной напора, она определяет интенсивность фильтрационного расхода при конкретных фильтрационных характеристиках и граничных условиях водоносного пласта.

где H_0 — первоначальная мощность потока; S — понижение уровня на границе дренажа потока.

Нелинейность, связанная с движением границ потока, может быть учтена в частных случаях стационарных расчетных схем. Например, для напорно-безнапорного режима этот вид нелинейности учитывают введением потенциальной функции:

$$U_p = 0{,}5\,(2mH - m^2), \tag{95}$$

где m — постоянная мощность пласта; H — напор (в напорной зоне).

Введение потенциальной функции (95) предполагает переход к схеме безнапорного потока. Для нестационарных расчетных схем возможна замена схемы напорно-безнапорной фильтрации напорными аналогами при выполнении условия [23]:

$$A = [\,1/(H - m)\,]\,\sqrt{\mu/\mu^*} < 0{,}3, \tag{96}$$

где H — напор; μ, μ^* — гравитационная и упругая водоотдача пласта (в напорной зоне).

При $A > 3$ расчетная схема сводится к безнапорному аналогу с потенциальной функцией (93). При соотношении $0{,}3 < A < 3$ следует пользоваться функцией (95), определяя радиус влияния по формулам напорного режима.

Наличие уклона водоупора существенно ограничивает возможность схематизации нелинейных процессов. При стационарном режиме для оценки проницаемости толщи в этом случае можно использовать величину средней проводимости потока, определяемой его глубинами на границах питания и дренажа. Анализ схем нестационарных безнапорных потоков на наклонном водоупоре требует применения математического моделирования.

5. УКАЗАНИЯ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ПАРАМЕТРОВ ПИТАНИЯ ВОДОНОСНЫХ ГОРИЗОНТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ РЕЖИМНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

С максимальной достоверностью гидрогеологические параметры могут быть определены по результатам наблюдений за режимом подземных вод в период строительства и эксплуатации горно-добывающих предприятий. Ориентировочные оценки параметров при ограниченном объеме исходной информации следует получать аналитическими методами. Надежное определение параметров при обширной информации целесообразно проводить методами математического моделирования.

Методические приемы определения тех или иных гидрогеологических параметров зависят от того, в рамках какой гидродинамической схемы анализируют исходные данные. Следовательно, параметры целесообразно определять, ориентируясь на выделенные ранее основные классы расчетных схем, отражающие особенности техногенного режима подземных вод.

5.1. Определение параметров проводимости водоносных горизонтов в условиях установившегося режима фильтрации (первый класс расчетных схем)

5.1.1. Параметры проводимости оценивают в рамках стационарных (квазистационарных) расчетных схем при известных расходах и градиентах напора рассматриваемых водоносных пластов. В общем случае параметры проводимости следует определять по выделенным лентам тока (см. п. 4.5) с фиксированными, т. е. замеренными в натуре, расходами и напорами после проверки расчетной схемы по критериям квазистационарности (см. табл. 19).

Проводимость T_i по ленте тока определяют из зависимости:

$$T_i = Q_л L_i / (\Delta H_i B_i), \qquad (97)$$

где $Q_л$ — расход в пределах ленты (зафиксированный на контуре дренажа — участке горной выработки); L_i, B_i — длина и ширина фрагмента либо всей ленты (рис. 22); ΔH_i — разность напоров на границах фрагмента либо на внешней и внутренней границах ленты.

Таким образом, при известных напорах, зафиксированных в нескольких точках по оси ленты, зависимость (97) позволяет оценить изменчивость проводимости кусочно-однородной ленты (определить проводимость отдельных ее фрагментов). Границы фрагментов в этом случае следует устанавливать по положению пьезометров для ограничения погрешностей, связанных с интерполяцией замеренных величин напоров. Учитывая погрешности вычисленных величин параметров, связанные, в частности, с по-

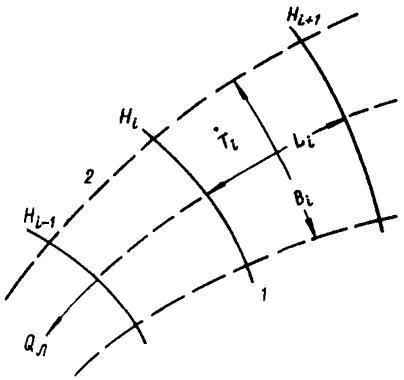


Рис. 22. Схемы ленты тока:

1 — линия равных напоров (пьезоизогипсы), *2* — линии тока

строением лент тока, целесообразно проводить осреднение параметров по ленте (либо по ряду смежных лент) при близком соотношении полученных величин (не превышающем 1:2). Вместе с тем фильтрационную неоднородность, выявленную в результате расчета проводимости по лентам тока, в любом варианте следует анализировать с привлечением геологических, геофизических и других материалов. При этом закономерное увеличение рассчитанных величин параметра проводимости вдоль ленты от контура дренажа к внешней его границе может служить признаком несоответствия принятой расчетной схемы реальным условиям. Если указанная закономерность не может быть объяснена геологическими особенностями участка, то причиной ее может быть либо наличие питания по площади дренируемого горизонта за счет инфильтрации или перетекания, либо нестационарность режима фильтрации. Полученные характеристики кусочно-однородного двумерного поля фильтрации целесообразно анализировать, уточнять и осреднять на плановой математической модели (см. п. 5.6.4).

5.1.2. Аналоговое (электрическое) моделирование целесообразно использовать при определении проводимости по лентам сложной конфигурации, для которых трудно установить их средние геометрические характеристики.

В этом случае проводимость рассчитывают после замера электрического сопротивления вырезанной из электропроводной бумаги ленты, исходя из зависимости:

$$T = Q_л R/(\Delta H_л \varrho), \qquad (98)$$

где $Q_л$ — расход по ленте тока; ϱ — сопротивление квадрата электропроводной бумаги; $\Delta H_л$ — разность напоров на внутренней и внешней границах ленты или отдельного ее фрагмента; R — электрическое сопротивление ленты (фрагмента).

Моделирование оказывается целесообразным также для оценки проводимости квазиоднородного водоносного горизонта, дренируемого несколькими скважинами или горными выработками, при ограниченных данных о распределении напоров. В этом случае можно рекомендовать следующий порядок моделирования [25]:

— на внешней границе однородной модели задают напряжение V_0, соответствующее известному напору H_0;

— на внутренних границах (скважины, выработки) задают токи J_i, пропорциональные известным расходам Q_i;

— в точках модели, соответствующих положению пьезометров с известными напорами H_n, фиксируют напряжения V_n.

Среднюю проводимость горизонта определяют по зависимости:

$$T = \frac{Q_t}{J_t Q n} \sum_{1}^{n} \frac{V_0 - V_n}{H_0 - H}. \qquad (99)$$

В величины H_n и Q_t целесообразно ввести весовые коэффициенты (от 1 до 0), отражающие достоверность этой информации.

5.1.3. При анализе расчетных схем первого класса нередко приходится определять условия взаимосвязи поверхностных и подземных вод. В частности, фильтрационные характеристики ложа водотоков (водоемов) можно определять в условиях нарушенного режима при вычислении проводимости соответствующего граничного фрагмента расчетной ленты тока.

При отсутствии данных о распределении расходов по лентам тока сопротивление ложа водоема или водотока можно охарактеризовать расчетным параметром ΔL, т. е. эквивалентным расстоянием, на которое нужно фиктивно отодвинуть линию действительного уреза воды от контура дренажа при прогнозных оценках.

Согласно известным рекомендациям [22, 23], для определения этого параметра необходимо иметь два пьезометра в створе, перпендикулярном урезу воды в реке или водоеме: первый из них на расстоянии l_1 от уреза (оно должно быть не меньше мощности водоносного горизонта), а второй на расстоянии l_2 от уреза.

Сопротивление ложа реки или водоема определяют по зависимости:

$$\Delta L = \frac{H_1 - H_0}{H_2 - H_1}(l_2 - l_1) - l_1, \qquad (100)$$

где H_0, H_1, H_2 — напоры, соответствующие уровню в реке и в пьезометрах.

Сопротивление ложа реки целесообразно определять для периода межени. Квазистационарность расчетной схемы можно контролировать критерием:

$$\frac{T\Delta t}{\mu(\Delta L + l_2)^2} > 0{,}3, \qquad (101)$$

где T — проводимость водоносного горизонта; Δt — продолжительность периода между расчетным моментом и моментом подъема уровня в реке; μ — расчетная водоотдача пород (максимальная величина в пределах рассматриваемого створа).

При сложной конфигурации контура реки результаты наблюдений по пьезометрам следует обрабатывать, применяя моделирование.

5.2. Определение емкостных характеристик и проводимости горизонтов в условиях нестационарного режима фильтрации (второй класс расчетных схем)

5.2.1. Интерпретацию результатов режимных наблюдений полезно начинать с оценки осредненной величины водоотдачи изучаемого горизонта, которую рассчитывают по зависимости:

$$\mu_{ср} = W_в / W_д, \qquad (102)$$

где $W_в$ — суммарный объем воды, отобранный за расчетный период из водоносного горизонта, не имеющего внешних источников питания (сработанная часть естественных запасов); $W_д$ — объем пород, сдренированных за расчетный период (в случае напорного режима этот объем соответствует разности напоров на начало и конец периода).

Рассчитанная величина $\mu_{ср}$ в дальнейшем может быть использована для контроля результатов, полученных более сложными приемами при интерпретации режимных наблюдений (с дифференцированной оценкой фильтрационных параметров).

5.2.2. Проводимость водоносных пластов надежнее всего определяют в рамках квазистационарных расчетных схем по методике, изложенной выше (см. п. 5.1). Если рассматриваемые стадии нарушенного режима не отвечают условиям квазистационарности, то проводимость водоносных пластов целесообразно оценивать по лентам тока, не подверженным существенной деформации в течение расчетного периода. При наличии данных об изменении расходов по расчетной ленте осредненную величину проводимости можно оценить по зависимости:

$$T_{ср} = Q_л(t)\sqrt{\alpha a t} / [S_к B_{ср}(t)], \qquad (103)$$

где $Q_л(t)$ — расход в пределах ленты на расчетный момент времени t, отсчитываемый от начала снижения напора $S_к$ на контуре дренажа; a — коэффициент пьезопроводности пласта, оцениваемый независимо при известных напорах в пределах ленты (см. п. 5.2.3); α — коэффициент, зависящий от закона снижения напора на контуре дренажа: $\alpha = \pi$ — при мгновенном снижении напора до величины $S_к$; $\alpha = (\pi + 4b)/(1 + 2b)^2$ — при снижении напора по закону $S_к(t) = At^b$; $B_{ср}(t)$ — средняя ширина участка ленты длиной $L(t) = \sqrt{\alpha a t}$.

По формуле (103) проводимость целесообразно рассчитывать на несколько моментов времени. Стабильность полученных величин свидетельствует о достоверности принятой расчетной схемы.

Если внешняя граница расчетной ленты представлена непроницаемым контуром, то проводимость можно ориентировочно оценивать по формуле:

$$T \approx Q_л(t) L_{ср} / [S_к B_{ср} T_q(\tau)], \qquad (104)$$

где $Q_л(t)$ — расход на расчетный момент времени t; $L_{ср}$. $B_{ср}$ — средняя длина и ширина ленты; $T_q(\tau)$ — функция, определяемая по графику (рис. 23); $\tau = at/L^2_{ср}$.

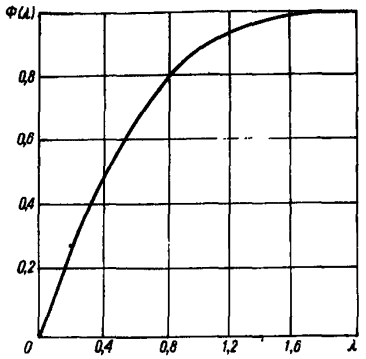


Рис. 23. График функции $Tq(\tau)$

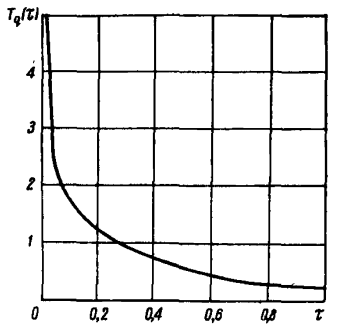


Рис. 24. График функции $\Phi(\lambda)$

Формулой (104) можно пользоваться при значении $\tau > 0{,}3$; при величине $\tau < 0{,}3$ справедлива формула (103).

5.2.3. При наличии данных о темпах снижения напоров (уровней) дренируемого водоносного горизонта можно определить его коэффициент пьезопроводности (уровнепроводности). Коэффициенты пьезопроводности целесообразно определять по лентам тока, построенным на расчетный период, в течение которого их конфигурация в плане мало изменяется.

5.2.4. При наличии в пределах расчетной ленты единичных пьезометров коэффициенты пьезопроводности целесообразно вычислять по аналитическим зависимостям, учитывающим структуру потока (конфигурацию ленты) и граничные условия.

В частности, простейшими граничными условиями можно считать «мгновенное» снижение напоров на контуре дренажа (на контуре горных выработок, контурах водопонижающих скважин). В этом случае для лент тока, по конфигурации близких к сектору, коэффициент пьезопроводности может быть определен по зависимости [26]:

$$S_r/S_к = 1 - R(\gamma, \overline{r}), \qquad (105)$$

где S_r — понижение напора на расчетный момент времени t по пьезометру, удаленному от центра симметрии на расстояние r (по осевой линии ленты); $S_к$ — «мгновенное» (в момент $t = 0$) снижение напора на контуре дренажа с радиусом $r_к$ (от центра симметрии); $\gamma = at/r^2_к$ (a — искомый коэффициент пьезопроводности); $\overline{r} = r/r_к$.

Функцию $R(\gamma, \overline{r})$ определяют по табл. 23.

Таблица 23

γ	10^2	10^3	10^4	10^6	10^8	10^{10}	10^{12}
$R(\gamma, \bar{r})/\ln\bar{r}$	0,33	0,24	0,18	0,13	0,10	0,07	0,06

Для лент, близких по форме к одномерным плоским, коэффициент пьезопроводности можно рассчитать по формуле:

$$S_{x,\,t}/S_{\text{к}} = 1 - \Phi(\lambda), \qquad (106)$$

где $S_{x,\,t}$ — понижение напора на момент t в пьезометре, удаленном на расстояние x от контура дренажа; t — продолжительность расчетного периода (от момента «мгновенного» снижения напора на контуре дренажа на величину $S_{\text{к}}$; $\Phi(\lambda)$ — интеграл вероятности (рис. 24), $\lambda = x/(2\sqrt{at})$.

При значении $\lambda < 0{,}8$ коэффициент пьезопроводности для этой схемы может быть рассчитан по формуле:

$$a = \frac{0{,}25\{x/[1-(S_{x,\,t}/S_{\text{к}})]\}^2}{t}. \qquad (107)$$

5.2.5. При наличии в пределах расчетной ленты не менее трех точек наблюдений за изменениями напоров (пьезометров) коэффициент пьезопроводности может быть найден на основе конечно-разностного принципа, согласно которому можно записать следующее балансовое уравнение для расчетного периода времени:

$$T_{1-2}\frac{(H_2-H_1)B_{1-2}}{L_{1-2}} - T_{2-3}\frac{(H_3-H_2)B_{2-3}}{L_{2-3}} =$$

$$= \mu\frac{\Delta H_2}{4\Delta t}(L_{1-2}+L_{2-3})(B_{1-2}+B_{2-3}), \qquad (108)$$

где H_1, H_2, H_3 — напоры в сечениях расчетной ленты, совпадающих с положением пьезометров (рис. 25), на конец шага по времени Δt; L_{1-2}, L_{2-3} — расстояния по оси ленты между расчетными сечениями; B_{1-2}, B_{2-3} — средняя ширина ленты между расчетными сечениями; T_{1-2}, T_{2-3} — проводимость фрагментов пласта (между расчетными сечениями); μ — водоотдача пласта (принимают одинаковой для двух смежных фрагментов ленты); ΔH_2 — изменение напора в среднем из трех расчетных сечений за период времени Δt (от момента $t - \Delta t$ до t).

Выражение (108) можно представить в виде:

$$\psi_1 - \bar{T}\psi_2 = [(L_{1-2}+L_{2-3})(B_{1-2}+B_{2-3})]/4a_{1-2}, \qquad (109)$$

где

$$\psi_1 = \frac{(H_2-H_1)B_{1-2}}{\Delta H_2 L_{1-2}};$$

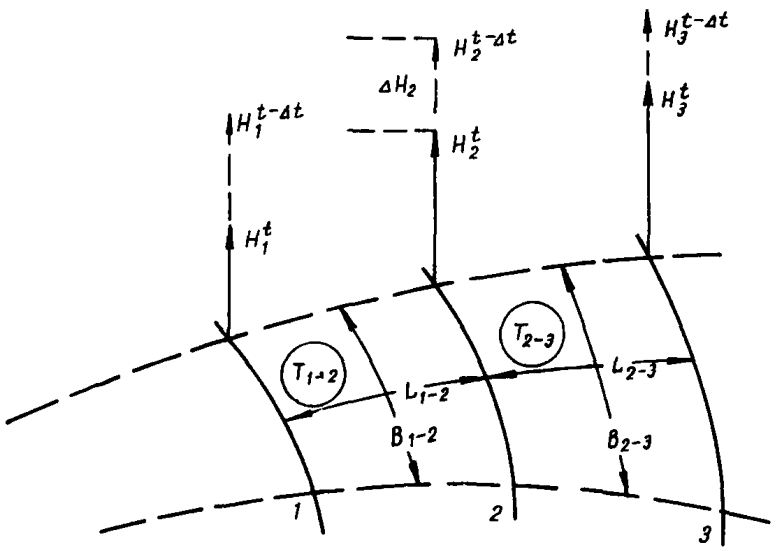


Рис. 25. Схема ленты тока (к расчету емкостных характеристик пласта):

1—3 — расчетные сечения

$$\psi_2 = \frac{(H_3 - H_2) B_{2-3}}{\Delta H_2 L_{2-3}};$$

$$\overline{T} = T_{2-3}/T_{1-2}; \qquad a_{1-2} = T_{1-2}/\mu.$$

Величина $\overline{T}$ и правая часть уравнения (109) являются константами, поэтому формула (109) соответствует уравнению прямой линии. Прямая может быть построена в координатах $\psi_1 - \psi_2$ с использованием нескольких значений напоров, зафиксированных на ряд последовательных моментов времени, которые отличаются на величину Δt. Важно отметить, что прямолинейность графика служит критерием достоверности принятой расчетной схемы [27]. По величине отрезка ψ_1^0, отсекаемого на оси ψ_1 (при $\psi_2 = 0$) можно определить коэффициент пьезопроводности:

$$a_{1-2} = \frac{[0{,}25 (L_{1-2} + L_{2-3})(B_{1-2} + B_{2-3})]}{\psi_1^0}. \qquad (110)$$

Тангенс угла наклона графика равен соотношению проводимостей рассматриваемых фрагментов T_{2-3} / T_{1-2}. Угол наклона, близкий к 45°, свидетельствует об однородности рассматриваемой ленты тока.

Для оценки влияния конечно-разностной аппроксимации на погрешность определяемых параметров целесообразно параллельно вычислить их по уравнению (109), в котором величины H_1, H_2, H_3 соответствуют напорам на начальные моменты расчетных шагов по времени.

5.2.6. При явно выраженном неустановившемся режиме фильтрации в планово-неоднородном водоносном горизонте и наличии наблюдений по нескольким пьезометрам вдоль лент тока переменные значения проводимости T_i и водоотдачи μ_i можно оценивать решением систем конечно-разностных уравнений. Для этого расчетные ленты тока разделяют на n фрагментов, априорно принимаемых однородными. Границы фрагментов задают в соответствии с рекомендациями, приведенными в пп. 4.5, 5.1.1.

Информация о распределении напоров в ленте тока на три момента времени и известная проводимость в одном из n фрагментов ленты (или средний расход на контуре стока на периоды $\Delta t_1 = t_1 - t_2$ или $\Delta t_2 = t_2 - t_3$) позволяют однозначно определить: а) величины проводимости T_i в каждом из остальных $n-1$ фрагментов и б) $n-1$ величин водоотдачи на участках (в блоках) ленты между центрами соседних фрагментов (рис. 26).

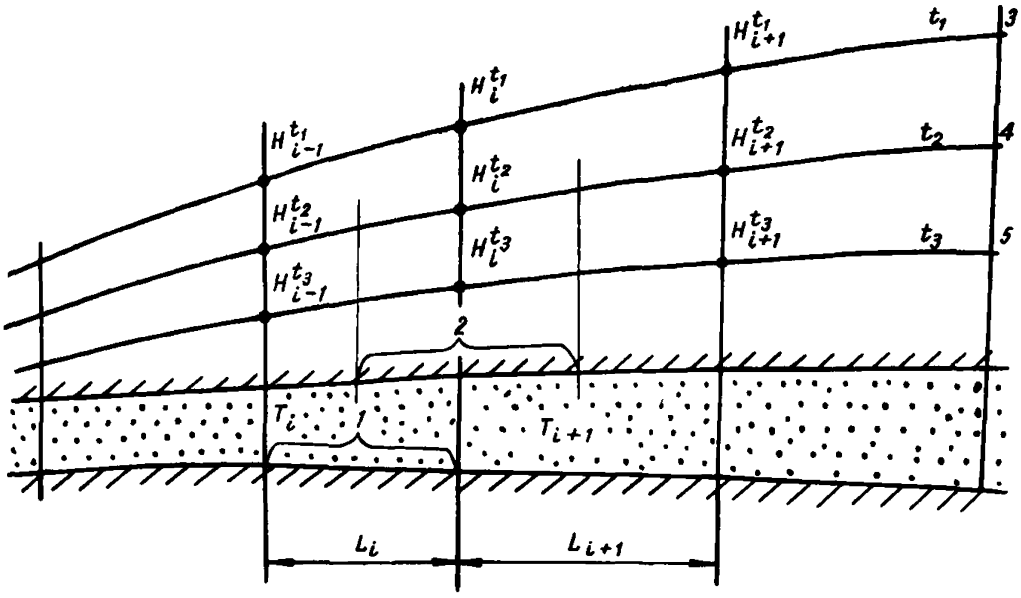


Рис. 26. Схема к расчету кусочно-однородной ленты тока (профиль по средней линии) для оценки проводимости и водоотдачи решением системы уравнений:

1, 2— участки ленты, для которых оцениваются, соответственно, проводимость T_i и водоотдача μ_i, *3, 4, 5*— депрессионные поверхности потока на моменты времени t_1, t_2, t_3

Все $2(n-1)$ неизвестных величин искомых параметров находят решением системы из $2(n-1)$ независимых явно-неявных конечно-разностных уравнений фильтрации. При этом $n-1$ уравнений отражают баланс потока в пределах расчетной ленты тока для периода Δt_1 и имеют вид:

$$T_i C_i \Lambda H_{(i-1)-i}^{\Delta t_1} + T_{i+1} C_{i+1} \Delta H_{(i+1)-i}^{\Delta t_1} = F_i \mu_i / \Delta t_1 \, (H_i^{t_2} - H_i^{t_1}). \qquad (111)$$

Столько же уравнений вида:

$$T_iC_i\Delta H^{\Delta t2}_{(i-1)-i}+T_{i+1}C_{i+1}\Delta H^{\Delta t2}_{(i+1)-i}=F_i\mu_i/\Delta t_2\,(H_i^{t3}-H_i^{t2}) \quad (112)$$

описывают баланс потока для периода Δt_2.

В уравнениях (111) и (112):

$$\Delta H^{\Delta t1}_{(i-1)-i}=0{,}5\,(H^{t1}_{i-1}+H^{t2}_{i-1}-H_i^{t1}-H_i^{t2});$$

$$\Delta H^{\Delta t2}_{(i-1)-i}=0{,}5\,(H^{t2}_{i-1}+H^{t3}_{i-1}-H_i^{t2}-H_i^{t3}); \quad (113)$$

$$C_i=B_i/L_i;\quad F_i=0{,}25\,(L_i+L_{i+1})(B_i+B_{i+1}),$$

где H_i^t и H^t_{i-1} — напоры на границах i-го фрагмента ленты в момент t; F_i — площадь i-го блока ленты с водоотдачей μ_i.

При малом числе фрагментов ($n=3$—4) система уравнений (111)—(112) может быть решена вручную. Если информация по наблюдениям позволяет выделить большее число фрагментов, то переменные значения проводимости и водоотдачи можно оценивать с использованием стандартных программ для решения систем линейных уравнений на ЭЦВМ любого типа.

В аналогичных условиях (см. рис. 26) параметры можно вычислять вручную и для лент с большим числом фрагментов. При этом сначала выделяют участок ленты с двумя соседними фрагментами, в одном из которых известна проводимость. Для выделенного участка составляют систему из двух явно-неявных конечно-разностных уравнений вида (111), (112), описывающих изменение напоров в двух соседних интервалах времени Δt_1 и Δt_2. Решением системы определяют два искомых параметра: проводимость второго фрагмента и водоотдачу в блоке на границе фрагментов. Далее выделяют следующую пару фрагментов, включающую фрагмент с уже вычисленными параметрами, и решение повторяют. Недостатком расчета является неизбежное возрастание погрешностей по мере удаления от фрагментов с известными значениями параметров.

Если в пределах ленты тока имеются данные о напорах только на два момента времени, то решением системы уравнений типа (111) *однозначно можно* вычислить:

а) n—1 значений проводимости при одном заданном в любом фрагменте ленты и известных n 1 значениях водоотдачи;

б) n—1 значений водоотдачи при известных величинах проводимости во всех n фрагментах ленты.

Параметры, полученные для отдельных кусочно-однородных лент тока, в дальнейшем можно уточнять на плановой модели фильтрации (см. п. 5.6) при наличии достаточно надежной информации по наблюдениям за напорами и расходами на контурах дренажа.

5.2.7. Параметры проводимости и водоотдачи в пределах выделенных фильтрационно-неоднородных лент тока целесообразно также рассчитывать на сеточных электрических моделях.

Наиболее доступными и универсальными являются резисторные модели, на которых реализуется известная конечно-разностная схема Либманна [28]. Схема Либманна позволяет рассматривать нестационарный процесс с любого момента времени и может учитывать любой закон изменений условий на границах водоносных пластов. Расчетная лента тока имитируется цепочкой сопротивлений $R_{x,\ i}$, соответствующих геометрической форме и проводимости выделенных фрагментов ленты. В узловые точки цепочки подключают временные сопротивления R_i, каждое из которых соответствует емкостным характеристикам и геометрическим размерам двух смежных фрагментов (см. рис. 25).

Определение проводимости и водоотдачи отдельных фрагментов фильтрационно-неоднородной ленты сводится к подбору электрических сопротивлений модели, величины которых связаны следующими соотношениями:

$$R_{x,\ i} = L_i / T_i B_i \alpha_R; \tag{114}$$

$$R_{x,\ i+1} = L_{i+1} / T_{i+1} B_{i+1} \alpha_R; \tag{115}$$

$$R_i = 4\Delta t \,/\, \mu (L_i + L_{i+1})(B_i + B_{i+1})\,\alpha_R, \tag{116}$$

где L_i, B_i — длина и ширина моделируемых фрагментов; T, μ — проводимость и водоотдача; Δt — шаг по времени; α_R — масштаб сопротивлений.

Соотношение известных напоров H_i и электрических потенциалов на модели U_i определяют по зависимости:

$$U_i = H_i \,/\, \alpha_н, \tag{117}$$

где масштаб напоров $\alpha_н = (H_{max} - H_{min})/(U_{max} - U_{min})$, здесь H_{max} и H_{min} — максимальная и минимальная величины напора, соответствующие максимальной и минимальной величине электрических потенциалов U_{max} и U_{min}.

Фильтрационный расход Q_i и сила тока на модели J_i соответственно связаны соотношением:

$$Q_i = J_i \alpha_н (V_{max} - V_{min})/\alpha_R,$$

где V_{max} и V_{min} — напряжения, соответствующие потенциалам U_{max} и U_{min}.

При воспроизведении на модели расчетного периода величину шага по времени назначают таким образом, чтобы рассматриваемый период был представлен минимум двумя шагами (интервалами). Каждый шаг должен характеризоваться достоверными (не интерполированными по времени) значениями напоров на границах расчетных фрагментов. Это обязательное требование диктуется необходимостью однозначного определения параметров неоднород-

ной ленты тока, которое возможно лишь при выполнении нескольких (не менее двух) шагов по времени.

Сопротивления модели на каждом шаге по времени подбирают при заданных на вершинах временных сопротивлений и на границах модели электрических потенциалах, отвечающих напорам, соответственно, на начальный и последующий (расчетный) моменты времени. Для этого составляют электрическую модель, отвечающую однородному по проводимости и водоотдаче водоносному горизонту. Величины сопротивлений определяют по соотношениям (114)—(117) исходя из ориентировочных представлений о фильтрационных параметрах анализируемого горизонта. В частности, проводимость горизонта может отвечать разведочным данным, а водоотдача соответствовать средней величине, определенной по формуле (102). Первоначально принятые сопротивления целесообразно корректировать от границы дренажа в направлении к внешней границе ленты. Сопротивления цепочки R_x изменяют исходя из соотношения фактических (известных) градиентов напора на каждом моделируемом фрагменте и полученных на модели на конец рассматриваемого временного шага. Временные сопротивления R_t целесообразно корректировать с учетом соотношений фактических и полученных на модели величин снижения напора в течение моделируемого интервала времени (шага по времени). Для окончательного подбора сопротивлений требуется обычно осуществить три—четыре корректировки всей модели на каждом шаге. Подбор сопротивлений заканчивают после получения полного соответствия потенциалов во всех узловых точках модели известным напорам на конец рассматриваемого шага по времени.

После окончания подбора сопротивлений модели следует замерить их абсолютные величины. Согласно соотношениям (114)—(117) коэффициент пьезопроводности каждого фрагмента может быть определен по зависимости:

$$a_i = T_i/\mu = [R_t(L_i + L_{i+1})(B_i + B_{i+1})]/4R_{x,i}B_i\Delta t. \quad (118)$$

Переход к величинам параметров проводимости и водоотдачи возможен, если хотя бы один фрагмент моделируемой системы охарактеризован независимо полученной величиной параметра. Таким «эталонным», наиболее достоверным, значением параметра следует считать проводимость фрагмента, примыкающего к границе дренажа с известным фильтрационным расходом. Проводимость этого фрагмента может быть определена в рамках квазистационарной расчетной схемы по формуле (97). Параметр проводимости первого фрагмента и соответствующая величина электрического сопротивления, подобранная на модели, позволяют определить масштаб сопротивлений α_R (единый для всей модели) по формуле (114).

Последующий расчет фильтрационных параметров всех фрагментов производят по соотношениям (114)—(116).

Однако подобранные параметры модели неоднородной ленты тока на первом шаге по времени не могут гарантировать однозначность решения обратной задачи, поэтому необходимо проанализировать поведение модели с этими параметрами на последующих шагах. Признаком однозначности подбора служит стабильность параметров модели на всех временных шагах. При однородности водоносного пласта по проводимости и водоотдаче для однозначного подбора соответствующих параметров модели достаточно одного шага по времени. Однако при этом возможны погрешности параметра, связанные с грубой дискретностью нестационарного процесса [29].

5.2.8. Электрические модели целесообразно применять для оценки фильтрационных параметров отдельных двумерных участков, наиболее полно охарактеризованных данными об изменениях напора (по группе пьезометров). Такие участки (или все поле фильтрации) можно воспроизводить на двумерных сеточных моделях, параметры которых подбирают, используя приемы, аналогичные выше изложенному. При разбивке поля фильтрации на элементарные (квадратные) участки следует совмещать положение пьезометров с узловыми точками модели. При отсутствии на рассматриваемом поле стоков с известным расходом (горные выработки, дренажные скважины) можно определить только коэффициенты пьезопроводности горизонта. По известным данным о расходах можно определить параметры проводимости и емкостные характеристики дренируемого горизонта.

Возможность независимого определения коэффициентов пьезопроводности по участкам двумерного поля фильтрации позволяет выделить однородные по этому параметру зоны. Целесообразно подбирать коэффициенты пьезопроводности последовательно, начиная от границ дренажа в направлении к периферийным частям модели. При этом следует задавать на внешних границах зон, в которых подбирают сопротивления, потенциалы, соответствующие известным напорам на расчетные моменты времени. Проводимость и водоотдачу этих зон можно определять на плановой модели всего поля фильтрации. Абсолютные величины сопротивлений следует подбирать, сохраняя те же соотношения между ними, которые были получены при независимом определении коэффициентов пьезопроводности по локальным зонам. В отличие от оценки коэффициентов пьезопроводности, подбор проводимости и водоотдачи в рамках единой модели может осуществляться на одном шаге по времени. Масштабирование модели (определение масштаба сопротивлений) следует проводить с учетом расхода и принятого масштаба напоров по формулам типа (117), (128).

5.2.9. Коэффициенты пьезопроводности, проводимости и водоотдачи дренируемых пластов можно определять на электрических моделях (одномерных и плановых), отражающих операционный принцип описания нестационарной фильтрации, при котором в качестве потенциальных функций используют функции изображения

понижений напора [17, 23]. Операционный принцип позволяет наиболее полно использовать всю информацию об изменениях напоров в течение анализируемого периода наблюдений t_{max}.

Функцию изображения понижений напора за расчетный период времени $\bar{S}(x, y, t_р)$ можно рассчитать по формуле:

$$\bar{S}(x, y, t_р) = A_0 S(x, y, o) + \sum_{1}^{n} A_к S(x, y, t_к), \qquad (119)$$

где расчетные моменты $t_к$ и коэффициенты $A_к$ определяют по табл. 24 [23] в зависимости от параметра преобразования $t_р$, который выбирают из условия $t_р < (0{,}15—0{,}2)\, t_{max}$.

Таблица 24

K	0	0,1	2	3	4
$t_к / t_р$	0	0,335	1,128	2,396	4,167
$A_к$	0,091	0,403	0,332	0,138	$3{,}16 \cdot 10^{-2}$

Окончание табл. 24

K	5	6	7	8
$t_к / t_р$	6,487	9,428	13,102	17,696
$A_к$	$3{,}98 \cdot 10^{-3}$	$2{,}64 \cdot 10^{-4}$	$3{,}36 \cdot 10^{-6}$	$1{,}06 \cdot 10^{-7}$

Величины сопротивлении поля модели K_x соответствуют проводимости пласта, а величины так называемых операторных сопротивлений, подключаемых к узловым точкам сетки (или цепочки) модели, определяют из соотношения:

$$R_{t,р} = t_р / (\mu F_{бл} \alpha_R), \qquad (120)$$

где $t_р$ — параметр преобразования; $F_{бл}$ — площадь блока, прилегающего к узловой точке; α_R — масштаб сопротивлений.

Определение коэффициентов пьезопроводности сводится к подбору такого соотношения сопротивлений сетки и операторных сопротивлений, при котором в узловых точках модели фиксируются потенциалы, соответствующие найденным по формуле (119) значениям функций изображения понижений на расчетный момент времени. На вершины операторных сопротивлений при подборе должны быть заданы нулевые потенциалы, а на границы модели — потенциалы, отвечающие функциям изображения соответствующих понижений на границах пласта. Таким образом, подбор параметров модели в этом случае аналогичен подбору сопротивлений при моделировании по схеме Либманна на каждом шаге по времени.

После подбора параметров модели коэффициенты пьезопроводности отдельных зон определяют по зависимости

$$a_i = R_{t_p i}\Delta x^2 / R_{x,i} t_p, \qquad (121)$$

где Δx — размеры элементарного (квадратного) участка пласта, на которые предварительно разбивают поле фильтрации.

Зная расход на границах, можно масштабировать электрическую модель и перейти к параметрам проводимости и водоотдачи. Следует отметить, что применение операционного метода возможно при линейности фильтрационного процесса — постоянстве параметров ($T = \text{const}$ и $\mu = \text{const}$) и стабильности положения границ поля фильтрации. Фильтрационная неоднородность в окрестностях узловой точки не гарантирует однозначности подбора сопротивлений модели (при неравенстве сопротивлений R_x и R_y плановой модели или сопротивлений $R_{x,i}$ и $R_{x,i+1}$ цепочки). Таким образом, сопротивления $R_{t,p}$ следует подбирать, ориентируясь либо на однородность поля фильтрации по проводимости, либо на известный характер распределения этого параметра по площади.

5.2.10. Анализ результатов моделирования должен быть обязательным элементом решения обратной задачи, некорректность которой обычно является причиной существенных погрешностей определяемых параметров (см. п. 5.6.1). Для обоснования и контроля результатов определения параметров проводимости и водоотдачи необходимо тщательно анализировать геологические и другие материалы.

С этих же позиций необходим анализ возможных погрешностей исходных данных (например, напоров и расходов), а также погрешностей расчетного метода. В частности, использование схемы Либманна при подборе фильтрационных параметров может вносить существенные погрешности в последние за счет дискретности по времени [29].

Для лимитирования погрешности параметра пьезопроводности можно ориентироваться на выполнение следующих условий [25] при выборе продолжительности расчетного периода t:

для полуограниченного пласта:

$$\lambda = x/2\sqrt{at} < 0{,}5,$$

где x — координата внешней границы расчетной зоны;

для пласта, ограниченного непроницаемым контуром:

$$\tau = at/L^2 > 0{,}2,$$

где L — длина пласта.

5.3. Определение интенсивности инфильтрационного питания и проводимости водоносных горизонтов (третий класс расчетных схем)

5.3.1. Средняя интенсивность инфильтрационного питания по площади воронки депрессии дренируемого водоносного горизонта

(не имеющего иных источников питания, кроме инфильтрации) в условиях квазистационарного режима может быть определена по зависимости:

$$\omega_{ср} = \sum_{1}^{n} Q_n / \sum_{1}^{n} F_n, \qquad (122)$$

где Q_n — среднегодовой водоприток в выработку; F_n — площадь воронки депрессии вокруг выработки; n — номер выработки.

Аналогично может быть рассчитана средняя интенсивность инфильтрационного питания водоносного горизонта в пределах выделенной ленты тока.

5.3.2. При сохранении «естественной» интенсивности инфильтрационного питания в условиях нарушенного режима подземных вод проводимость горизонта можно определять с использованием методических приемов, рекомендованных для оценки этого параметра в схемах первого и второго классов. В качестве потенциальных функций в этом случае должна выступать величина понижений, отсчитываемых от «естественных» уровней (см. п. 4.6). «Естественными» уровнями при определении средней (в годовом цикле) интенсивности инфильтрационного питания целесообразно считать среднегодовые положения уровней.

Необходимо заметить, что определение проводимости непосредственно по напорам и расходам потока без учета инфильтрационного питания приводит к существенному завышению этого параметра. При этом максимальная абсолютная погрешность параметра проводимости для схемы одномерного потока, ограниченного внешним непроницаемым контуром (линией водораздела), может быть оценена формулой:

$$\Delta T = \omega L^2 / 2\Delta H, \qquad (123)$$

где $\Delta T = T_р - T_и$; $T_р$ и $T_и$ — рассчитанное и истинное значения проводимости; L — длина потока при перепаде напоров на его границах ΔH; ω — интенсивность инфильтрации.

Для этой же схемы относительные погрешности параметра проводимости, определенного по напору H_x в точке с координатой x, можно рассчитать по зависимости:

$$T_р / T_и = 2L/(2L - x). \qquad (124)$$

5.3.3. По величине инфильтрационного питания ω, определенной по формуле типа (122) исходя из замеренного расхода на контуре дренажа, можно рассчитать проводимость одномерного потока:

$$T = \omega L^2 / 2\Delta H, \qquad (125)$$

где обозначения те же, что и в зависимости (123).

При известных напорах на границах и в промежуточной точке двумерной ленты тока среднюю величину проводимости в пределах последней оценивают по формуле:

$$T = \omega F/[(H_3 - H_2)B_{2-3} / L_{2-3} - (H_2 - H_1)B_{1-2} / L_{1-2}], \quad (126)$$

где $F = 0{,}25(L_{1-2} + L_{2-3})(B_{1-2} + B_{2-3})$; B, L — ширина и длина каждого из смежных фрагментов ленты.

5.3.4. Зная напоры в нескольких точках двумерной ленты, целесообразно для каждой пары смежных фрагментов определять по формуле (126) обобщенную характеристику — отношение ω/T.

Постоянство этой характеристики для всех пар фрагментов может служить признаком однородности расчетной ленты по проводимости и интенсивности инфильтрационного питания. Однако при этом не исключается вариант пропорционального изменения обоих фильтрационных параметров.

5.3.5. Для оценки однородности расчетной ленты по фильтрационным параметрам и определения абсолютных величин этих параметров при известном расходе на контуре дренажа целесообразно провести дополнительный анализ с использованием электрического моделирования:

— по формуле (122) вычисляют интенсивность инфильтрации ω в пределах ленты (при известной величине расхода на контуре дренажа);

— рассчитывают величины инфильтрационных расходов, поступающих по площадям, примыкающим к границам фрагментов:

$$Q^0_\omega = 0{,}25\omega(L_i + L_{i+1})(B_i + B_{i+1}); \quad (127)$$

— для всех фрагментов находят соотношение L_i/B_i и собирают электрическую модель расчетной ленты в виде цепочки сопротивлений $R_{x,\,i}$;

— ко всем узловым точкам цепочки подключают дополнительные сопротивления R^0_ω, соотношение которых обратно пропорционально величинам инфильтрационных расходов Q^0_ω;

— на вершинах сопротивлений R^0_ω подбирают величину напряжения V_0 (единую для всей модели), при которой в узловых точках фиксируются потенциалы, отвечающие известным напорам на границах фрагментов;

— замеряют силу тока $I_д$ на контуре дренажа ленты (должна быть пропорциональна величине фильтрационного расхода $Q_д$), вычисляют масштаб сопротивлений (единый для всей модели):

$$\alpha_R = I_д(H_{max} - H_{min}) / [Q_д(U_{max} - U_{min})(V_0 - V_{min}), \quad (128)$$

где U_{max}, U_{min} — максимальная и минимальная величины электрических потенциалов, соответствующие напорам H_{max} и H_{min}; V_{min} — напряжение, соответствующее величине H_{min};

— проводимость любого фрагмента или всей однородной ленты определяют по формуле (114).

Формальная однозначность подбора параметра проводимости обеспечивается:

— соответствием потенциалов во всех узловых точках известным величинам напоров на границах фрагментов;

— соблюдением независимо полученного соотношения ω/T;

— соответствием суммы токов, подаваемых в каждую узловую точку, величине расхода на контуре дренажа расчетной ленты.

Если при регулировании напряжения V_0 на вершинах сопротивлений R_ω^0 не удается достичь соответствия потенциалов в расчетных узловых точках известным величинам напоров, то анализируемую ленту нельзя считать однородной по фильтрационным параметрам.

5.3.6. Изменчивость проводимости и интенсивности инфильтрационного питания в пределах неоднородной ленты тока может быть оценена подбором соответствующих параметров электрической модели. Однако однозначность такого подбора не гарантируется даже при известном распределении напоров по ленте тока. В общем случае можно рекомендовать рассмотрение двух крайних вариантов, для которых один из неизвестных параметров подбирают при закрепленном постоянном другом. При высокой степени геологической изученности месторождения возможно задание одного из параметров исходя из определенного закона его изменчивости вдоль расчетной ленты.

5.3.7. Необходимо отметить, что определение достоверных величин инфильтрационного питания возможно лишь при выполнении особых требований, предъявляемых к расположению пьезометров [25]:

$$\Delta x = 0{,}2TI/\omega, \qquad (129)$$

где Δx — расстояние между пьезометрами (точками с известными напорами); I — средняя величина градиентов напора на изучаемом участке; T, ω — проводимость и интенсивность инфильтрации.

5.3.8. В условиях неустановившегося режима фильтрации оценка интенсивности инфильтрационного питания осложняется. Как правило, при определении параметров питания здесь следует ориентироваться на модели, однородные по одному из фильтрационных параметров (по проводимости или водоотдаче). В частности, интенсивность инфильтрационного питания может быть определена параллельно с оценкой водоотдачи на электрических моделях при заданной проводимости поля фильтрации (или ленты тока). В этом случае для обеспечения однозначности подбора параметров модели при использовании схемы Либманна необходимо выполнить не менее двух—трех шагов по времени. Проводимость в этом случае должна быть определена независимо — принята по разведочным данным или оценена по участкам, примыкающим к границам дренажа (по зонам квазистационарного режима).

В другом варианте можно определить параметр проводимости и интенсивность инфильтрационного питания при известной величине водоотдачи водоносного горизонта (например, для безнапорного водоносного горизонта, приуроченного к песчаным породам, водоотдача может быть выбрана исходя из табличных значений). Однозначный подбор параметров на электрической модели по схеме Либманна также требует в этом случае выполнения не менее двух шагов по времени.

При оценке дополнительного (по сравнению с «естественным») инфильтрационного питания $\Delta\omega$ целесообразно воспользоваться возможностями операционного метода (см. п. 5.2.9). В этом случае необходимо определить для расчетного периода функции изображений $\overline{S}'$ и $\overline{S}''$, соответствующие двум принятым значениям параметра преобразования t'_p и t''_p. Затем на модели подбирают соответствующие операторные сопротивления $R'_{t,\,p}$ и $R''_{t,\,p}$. При известных величинах фильтрационных расходов в пределах моделируемого поля устанавливают проводимость пласта и масштаб сопротивлений модели α_R. Затем определяют дополнительную инфильтрацию $\Delta\omega$ решением системы:

$$\begin{aligned} R'_{t,p} &= 1/[(\mu/t'_p - \Delta\omega/\overline{S}')\Delta x\Delta y\alpha_R], \\ R''_{t,p} &= 1/[(\mu/t''_p - \Delta\omega/\overline{S}'')\Delta x\Delta y\alpha_R]. \end{aligned} \qquad (130)$$

При совместном проявлении инфильтрации и перетекания также целесообразно воспользоваться операционным методом при условии сохранения «естественной» интенсивности инфильтрации. В этом случае общий порядок моделирования принимают таким же, как и при оценке дополнительного инфильтрационного питания, однако вычисление характеристики перетекания k_0 / m_0 выполняют решением системы:

$$\begin{aligned} R'_{t,p} &= 1/[(\mu/t'_p + k_0/m_0)\Delta x\Delta y\alpha_R], \\ R''_{t,p} &= 1/[(\mu/t''_p + k_0/m_0)\Delta x\Delta y\alpha_R]. \end{aligned} \qquad (131)$$

Интенсивность инфильтрационного питания затем может быть подобрана на модели, реализующей схему Либманна с непосредственным учетом инфильтрации и с использованием в качестве потенциальных функций величин напоров.

5.4. Определение фильтрационных параметров водоносного пласта с перетеканием (четвертый класс расчетных схем)

В условиях нарушенного режима при определяющем влиянии перетекания между водоносными горизонтами фильтрация сравнительно быстро приобретает установившийся характер. Основными фильтрационными характеристиками водоносного горизонта с перетеканием являются проводимость T и параметр k_0/m_0 (k_0,

m_0 — коэффициент фильтрации по нормали к напластованию и мощность разделяющего слоя). При оценке этих параметров принимают предпосылки перетекания, приведенные в п. 4.4.

5.4.1. Для однородного водоносного горизонта проводимость можно оценивать так же, как в п. 5.1.1, выбирая расчетные участки вблизи контура дренирования.

5.4.2. Для неограниченного в плане однородного водоносного горизонта, когда уровни в питающем (более водообильном) горизонте не зависят от перетекания*, параметры рассматриваемого горизонта можно оценивать для следующих типовых схем:

1. *Уровень питающего горизонта горизонтальный* (рис. 27, *а*); *фильтрация в дренируемом горизонте плоскорадиальная.*

При известной проводимости T (см. п. 5.4.1) среднюю величину параметра k_0 / m_0 можно определить по зависимости [31]:

$$2\pi T S_к / Q_{сум} = K_0(r_к \sqrt{\xi}), \qquad (132)$$

где $S_к$ — понижение на контуре дренажа (выработок); $Q_{сум}$ — среднегодовой суммарный водоприток к дренажной системе (выработкам); $K_0(r_к \sqrt{\xi})$ — функция Бесселя второго рода нулевого порядка, определяемая по таблицам [21, 31]; $r_к$ — радиус «большого колодца», к которому приводится дренажная система (выработки); $\xi = k_0 / m_0 T$.

При соотношении $r_к = \sqrt{\xi} < 0{,}05$ зависимость (132) аппроксимируется выражением:

$$2\pi T S_к / Q_{сум} = \ln(1{,}12/r_к \sqrt{\xi}). \qquad (133)$$

Рассматриваемая схема фильтрации характерна для подземной разработки, когда зона водопроводящих трещин над выработками не достигает питающего горизонта и он не дренируется техническими скважинами или стволами. В условиях открытых разработок предположение о сохранении горизонтальности уровня питающего горизонта может быть справедливо только для напорного горизонта в подошве карьера (рис. 27, *а*).

2. *Уровень питающего горизонта переменный в плане* (рис. 27, *б*); *фильтрация в рассматриваемом горизонте плоскорадиальная.*

Параметр ξ можно определить подбором из соотношения [31]:

$$\Delta H_2 / \Delta H_1 = [K_0(r_к \sqrt{\xi})]/[K_0(r_1 \sqrt{\xi})], \qquad (134)$$

где ΔH_1 и ΔH_2 — разности уровней в питающем и дренируемом горизонтах, соответственно, на расстояниях r_1 от центра «большого колодца» и $r_к$ на контуре дренажа.

При подборе параметра ξ целесообразно пользоваться графиком функции $K_0(x) / K_0(y)$ (рис. 28), где $x = r_к \sqrt{\xi}$, $y = r_1 \sqrt{\xi}$.

---

* Такое предположение справедливо при соотношении проводимостей взаимодействующих горизонтов, превышающем 20—40 [30]

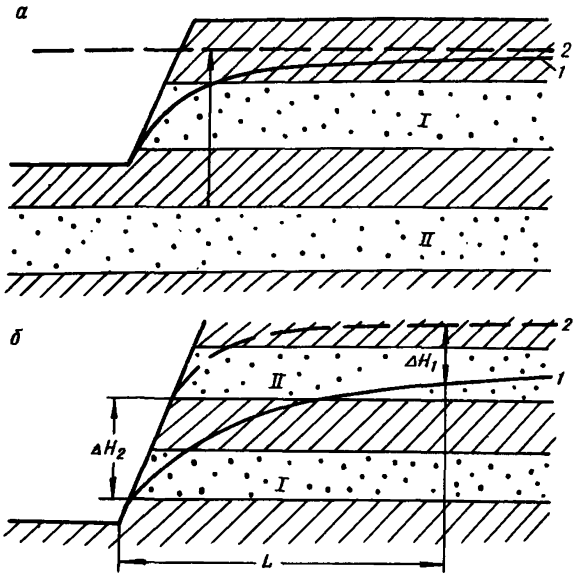


Рис. 27. Схемы к расчету параметров пласта с перетеканием:

1, 2— уровни, соответственно, основного (I) и питающего (II) горизонтов

3. *Уровень питающего горизонта переменный в плане; фильтрация в рассматриваемом горизонте плоскопараллельная.*

Параметр ξ можно определить по формуле [32]:

$$\sqrt{\xi} = (1/L)\ln(\Delta H_2/\Delta H_1), \qquad (135)$$

где ΔH_1 — разность уровней в питающем и основном горизонтах на расстоянии L от контура дренажа.

Проводимость горизонта можно вычислить при известном удельном расходе q на контуре дренажа по формуле [32]:

$$T = q/(\Delta h_п / L + \Delta H_2 \sqrt{\xi}), \qquad (136)$$

где $\Delta h_п$ — разность уровней в питающем горизонте на расстоянии L и на контуре дренажа.

По найденным величинам T и ξ вычисляют параметр k_0 / m_0.

5.4.3. Если уровни в питающем горизонте зависят от перетекания, то вышеприведенные формулы неприменимы. Для оценки параметра k_0 / m_0 в этом случае выполняют моделирование двухслойной толщи [28].

5.4.4. В случае, когда имеются наблюдения для построения карт гидроизогипс питающего и дренируемого горизонтов, среднюю величину параметра k_0/m_0 для площади депрессионной воронки, в пределах которой формируется суммарный водоприток в выработку $Q_{сум}$, можно оценить по формуле:

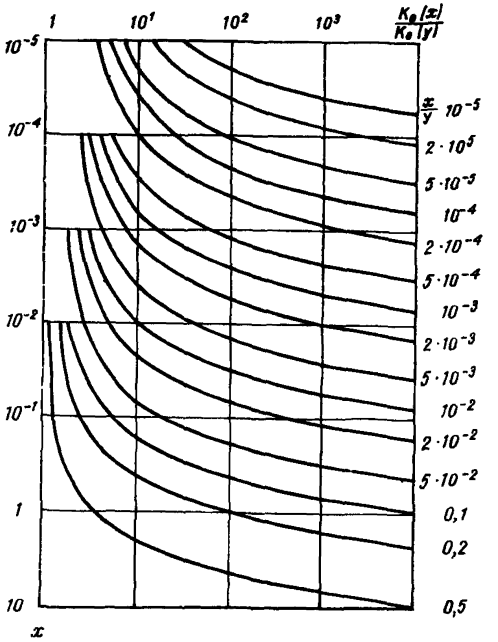


Рис. 28. Графики функции $[K_0(x)]/[K_0(y)]$

$$(k_0 / m_0)_{ср} = Q_{сум} / (\sum_{k=1}^{n} \Delta H_в F_к), \qquad (137)$$

где $\Delta H_в$ — средний перепад напоров между взаимодействующими горизонтами на площади $F_к$ участков, выделенных на карте гидроизогипс.

5.4.5. Если через внешнюю границу исследуемого участка депрессионной воронки поступает некоторый расход $Q_{гр}$, определяемый градиентом потока и проводимостью горизонта на границе, то в зависимости (137) вместо величины $Q_{сум}$ берут разность $(Q_{сум} - Q_{гр})$.

5.4.6. Если имеются наблюдения только на отдельных участках депрессии, то можно оценить среднюю величину параметра $(k_0 / m_0)_{ср.л}$ по отдельным лентам тока с известными расходами $Q_л$ на контуре дренажа. Для этого рассматриваемые ленты разделяют на несколько фрагментов линиями равных напоров. Параметр $(k_0 / m_0)_{ср.л}$ вычисляют по формуле, аналогичной (137), в которой $Q_{сум} = Q_л$, а площадь $F_к = F_t$ определяют по формуле (113).

5.4.7. Наиболее достоверные данные о параметре ξ могут быть получены при интерпретации результатов режимных наблю-

дений методом аналогового моделирования. Потенциалы, отвечающие постоянным уровням в питающем горизонте, подают на вершины дополнительных сопротивлений, подключенных к узловым точкам плановой модели основного пласта. Затем подбирают дополнительные сопротивления до достижения соответствия потенциалов в узловых точках модели фактическим напорам дренируемого водоносного горизонта. Параметр ξ определяют исходя из подобранной величины дополнительного сопротивления по зависимости [28]:

$$\xi = R_x / (R_{доп} F), \tag{138}$$

где R_x — сопротивление пространственной сетки модели основного горизонта; F — площадь элементарного участка сетки.

5.4.8. Для неоднородного в плане водоносного горизонта при существенном влиянии перетекания в формировании водопритоков к выработкам проводимость необходимо определять с учетом интенсивности перетекания по площади депрессионной воронки. Неучет этого фактора может приводить к значительным погрешностям в оценке проводимости, особенно на удаленных от контура стока участках.

Проводимость и параметр k_0 / m_0 неоднородного в плане водоносного горизонта можно оценить по характерным лентам тока. Для этого строят две карты гидроизогипс — дренируемого водоносного горизонта и смежного (питающего). Затем на карте гидроизогипс дренируемого горизонта выделяют расчетные ленты тока с наибольшей информацией о напорах в пределах лент и расходах на контуре дренажа. Ленты разделяют на кусочно-однородные фрагменты линиями равных напоров в соответствии с рекомендациями, изложенными в п. 4.5 (рис. 29).

В рассматриваемых условиях уравнение баланса для i-го фрагмента ленты, однородного по проводимости T_i, имеет вид:

$$T_i N_i = Q_{гр} + \sum^{n} Q_i^{в}, \tag{139}$$

где $N_i = [B_i (H_i - H_{i-1})]/L_i$; H_i, H_{i-1} — напоры на границах i-го фрагмента ленты; L_i, B_i — средние длина и ширина i-го фрагмента ленты; $Q_{гр}$ — расход через внешнюю границу ленты; $\sum_{i}^{n} Q_i^{в}$ — сумма расходов перетекания, проходящих через i-й фрагмент ленты тока.

При этом расход перетекания $Q_i^{в}$, поступающий из смежного горизонта по площади F_i, определяемой по формуле (113), выражается соотношением:

$$Q_i^{в} = (k_0 / m_0)_i A_i, \tag{140}$$

где $(k_0 / m_0)_i$ — параметр, характеризующий интенсивность перетекания по площади F_i; $A_i = \Delta H_в F_i$; $\Delta H_в$ — средний перепад напоров между взаимодействующими водоносными горизонтами по площади F_i.

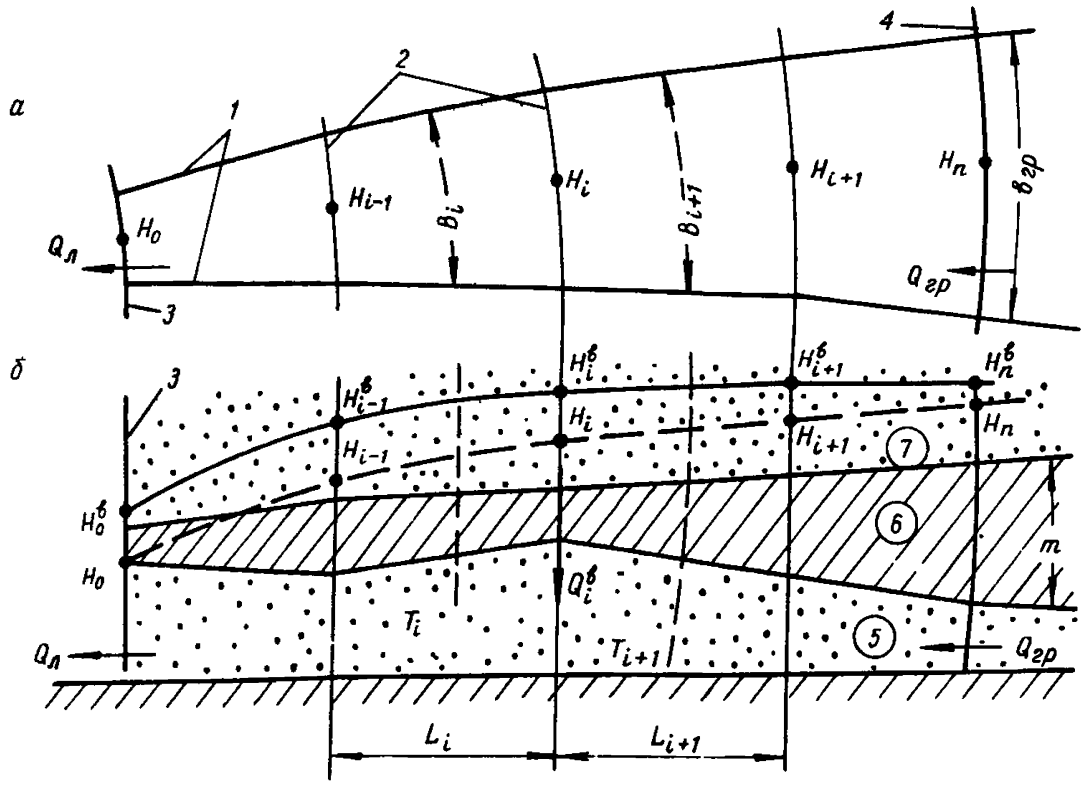


Рис. 29. Схема к расчету кусочно-однородной ленты тока для оценки проводимости и параметра k_0/m_0:

а — план; *б* — профиль; *1*— линия тока; *2*— границы расчетного фрагмента ленты; *3*— контур дренажа; *4*— контур питания; *5*— основной водоносный горизонт; *6*— разделяющая толщина; *7*— питающий водоносный горизонт

Для ленты тока, разделенной на n фрагментов с переменными вдоль ленты величинами проводимости T_i и параметра $(k_0 / m_0)_i$, можно составить систему из n уравнений вида (139):

$$
\begin{aligned}
T_1 N_1 &= Q_{гр} + \sum_{i=1}^{n} (k_0 / m_0)_i A_i; \\
T_2 N_2 &= Q_{гр} + \sum_{i=2}^{n} (k_0 / m_0)_i A_i; \\
&\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \\
T_{n-1} N_{n-1} &= Q_{гр} + \sum_{i=1}^{n} (k_0 / m_0)_i A_i;
\end{aligned}
\qquad (141)
$$

$$
T_n N_n = Q_{гр} + (k_0/m_0)_n A_n.
$$

Еще два уравнения выражают условия на границах ленты:

$$
\begin{aligned}
Q_л &= T_1 N_1; \\
Q_{гр} &= T_n I_{гр} в_{гр},
\end{aligned}
\qquad (146)
$$

где $I_{гр}$ и $в_{гр}$ — градиент напора и ширина ленты тока на ее внешней границе.

Уравнения (141), (142) общим числом $n+2$ могут содержать n неизвестных величин проводимости фрагментов, n неизвестных величин параметра k_0/m_0 и неизвестную величину расхода $Q_{гр}$: всего $2n+1$ неизвестных величин. Однако решение системы из $n+2$ уравнений (141) и (142) позволяет вычислить однозначно только $n+2$ искомых величин из всех указанных. В результате возможны три следующих варианта однозначного вычисления проводимостей и параметра k_0/m_0 по ленте тока:

а) определение n величин проводимостей T_i для каждого фрагмента ленты, среднего значения параметра $(k_0/m_0)_{ср}$ для всей ленты и расхода потока через внешнюю границу ленты $Q_{гр}$;

б) расчет n величин параметра $(k_0/m_0)_i$, средней величины проводимости $T_{ср}$ для всей ленты и расхода $Q_{гр}$;

в) определение любого сочетания искомых величин параметров общим числом не более $n+2$ при условии, что каждая пара соседних фрагментов ленты охарактеризована хотя бы одной известной величиной проводимости или параметра k_0/m_0.

5.4.9. При отсутствии расхода через внешнюю границу ленты ($Q_{гр}=0$) решение систем уравнений (141)—(142) может быть реализовано с помощью простых алгоритмов, если существует возможность принятия предпосылки о постоянстве значений одного из искомых параметров (см. п. 5.4.8, варианты решений *а* и *б*).

Переменные значения проводимости T_i вдоль ленты тока при средней величине параметра k_0/m_0 находят в такой последовательности:

— вычисляют среднее значение параметра $(k_0/m_0)_{ср}$ для всей ленты по формуле, аналогичной (137);

— по значению параметра $(k_0/m_0)_{ср}$ определяют расходы перетекания $Q_i^в$ вдоль ленты тока по зависимости (140);

— рассчитывают проводимости T_i в каждом из выделенных фрагментов ленты по зависимости (139) при расходе $Q_{гр}=0$.

В случае, когда для нескольких соседних лент тока получают близкие величины параметра $(k_0/m_0)_{ср}$, целесообразно вычислить среднее его значение для участка плановой области $(k_0/m_0)_{с\ у}$, включающего несколько расчетных лент тока:

$$(k_0/m_0)_{с.у}=Q_у/\left[\sum_1^m\left(\sum_{i=1}^n A_i\right)\right];\qquad Q_у=\sum_1^m Q_л, \tag{143}$$

где $Q_у$ — водоприток, формирующийся в пределах участка области фильтрации с осредненным параметром $(k_0/m_0)_{с.у}$.

Далее по полученному параметру $(k_0/m_0)_{с.у}$ пересчитывают расходы перетекания $Q_i^в$ и значения проводимости T_i в пределах фрагментов отдельных лент тока.

5.4.10. Переменные значения параметра $(k_0/m_0)_i$ вдоль ленты тока при средней величине проводимости в пределах ленты $T_{ср}$ расчитывают с помощью зависимости (140), в которой:

$$\begin{aligned} Q_i^в &= T_{ср}(N_i-N_{i+1});\\ &\cdots\cdots\cdots\\ Q_n^в &= Q_л-\sum^{n-1} Q_i^в, \end{aligned}\tag{144}$$

При этом расходы перетекания $Q_i^в$ вычисляют от границы дренажа. В качестве средней величины проводимости ленты может быть принято значение T_i фрагмента, прилежащего к контуру дренажа, вычисляемое по соотношению (142) на основании суммарного расхода в пределах ленты $Q_л$.

Если для нескольких соседних лент тока получают близкие величины проводимостей $T_{ср}$, то целесообразно вычислить среднее значение проводимости для участка, включающего несколько расчетных лент тока, по суммарному расходу, формирующемуся в его пределах. По новому среднему значению проводимости пересчитывают значения параметра $(k_0/m_0)_i$ вдоль расчетных лент тока.

5.4.11. Переменные величины проводимости и параметра k_0/m_0 целесообразно оценивать поочередно — при постоянном значении одного из параметров. Это позволяет установить допустимые пределы изменения параметров и оценить в дальнейшем возможные ошибки прогнозов.

5.4.12. Если результаты качественного анализа материалов геологических и геофизических исследований свидетельствуют об аномальных участках по проницаемости пород как основного водоносного горизонта, так и разделяющей толщи, то переменные значения проводимости и параметра k_0/m_0 на этих участках определяют решением систем уравнений (141)—(142).

При большом количестве расчетных лент тока, когда объем вычислений параметров достаточно велик, можно использовать стандартные программы для решения систем уравнений на ЭВМ любого типа.

5.4.13. Проанализированные изолированно ленты тока или отдельные участки поля «склеивают» с учетом различных гипотез физического правдоподобия, построенных на основе анализа материалов геологических, геофизических, гидрогеологических исследований. В плане выделяют более крупные зоны неоднородности по параметрам. Дальнейшее уточнение параметров может осуществляться на плановой модели горизонта (см. пп. 5.6.6—5.6.7).

5.4.14. Для оценки коэффициента фильтрации слабопроницаемых пород k_0, помимо гидродинамических методов, можно использовать гидрогеотермический [33].

Реализация гидрогеотермического метода сводится к замеру температур в кровле $T_к$, на глубине T_z и в подошве $T_п$ слабопроницаемого слоя мощностью m_0 с помощью датчиков температур (терморезисторов). Один из способов установки терморезисторов описан в статье [34].

Для интерпретации данных замеров температур используют зависимость, справедливую для условий одномерного потока в однородной среде при установившемся режиме с учетом конвекции [33]:

$$(T_z - T_к)/(T_п - T_к) = f(\beta,\ z/m_0), \qquad (145)$$

где β — переменная величина, характеризующая степень нелинейности термограммы.

По замеренным температурам $T_к$, T_z и $T_п$ из выражения (145) вычисляют функцию $f(\beta, z/m_0)$. Величину β находят по графику зависимости β от $f(\beta, z/m_0)$ и z/m_0 (рис. 30).

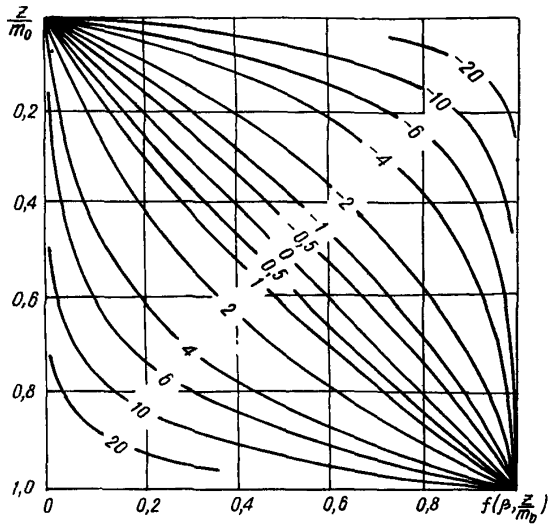


Рис. 30. Графики зависимости переменной β от функции $f(\beta, z/m_0)$ и отношения z/m_0

Скорость вертикальной фильтрации v_z вычисляют по формуле:

$$v_z = \lambda\beta/(c_0\varrho_0 m_0), \qquad (146)$$

где λ — теплопроводность разделяющего слоя, вт/м °С; c_0 — удельная теплоемкость воды ($4{,}19 \cdot 10^3$ Дж/м °С); ϱ_0 — плотность воды (1000 кг/м^3).

Если температуры замеряют через равные интервалы глубин ($\Delta z = \text{const}$), то скорость вертикального перетекания можно определить без графика [35]:

$$v_z = [2\lambda/(\Delta z c_0 \varrho_0)][1 - 2(T_z - T_к)/(T_п - T_к)]. \qquad (147)$$

Коэффициент фильтрации разделяющего слоя k_0 будет равен:

$$k_0 = v_z/I, \qquad (148)$$

где I — градиент напора на исследуемом интервале.

5.5. Особенности оценки параметров в условиях нелинейности фильтрационных процессов

В простейших случаях параметрической нелинейности, когда имеется возможность представить схему в виде квазилинейного аналога путем введения определенных потенциальных функций (см. п. 4.7), коэффициенты фильтрации и емкостных свойств водоносных горизонтов могут быть рассчитаны на основе изложенных выше рекомендаций.

При решении обратных задач в условиях нелинейности фильтрационных процессов необходимо учитывать:

1) в связи с отсутствием критериев квазистационарности при нелинейной изменчивости параметров оценку последних зачастую приходится производить в рамках сложных нестационарных схем (на моделях);

2) при определении параметров проводимости и водоотдачи слоистых водоносных структур не исключается неоднозначность их подбора на моделях. Неоднозначность в этом случае обусловлена *изменчивостью параметров на каждом шаге по времени.*

По данным режимных наблюдений можно уточнить лишь отдельные элементы (параметры) расчетной схемы при закрепленных (известных) прочих. В частности, можно проверить достоверность принятой нелинейной расчетной схемы, содержащей независимо определенные гидрогеологические характеристики (например, известную проницаемость отдельных пластов стратифицированного обводненного комплекса). Если такая проверка показывает существенное несоответствие разведочных данных и известной «истории» водопонижения, то однозначное уточнение параметров зачастую оказывается нереальным.

5.6. Специальные исследования расчетных геофильтрационных схем

5.6.1. Гидрогеологические параметры, определенные по результатам режимных наблюдений, и, в частности, полученные при фрагментарном анализе полей фильтрации, требуют всестороннего анализа, направленного на оценку их качества в рамках расчетной геофильтрационной схемы.

Обратные гидрогеологические задачи по определению параметров являются некорректными, что отражается на некоторых их свойствах [36] и, в конечном итоге, на качестве решения. Например, некорректность проявляется в том, что малым погрешностям в исходных данных (в напорах) соответствуют существенные погрешности определяемых гидрогеологических параметров. Это свойство обратных задач проявляется в различной мере для разных граничных условий и поэтому должно оцениваться применительно к конкретной расчетной схеме.

При анализе качества определяемых гидрогеологических параметров устанавливают:

— представительность (объем и достоверность) исходной информации;

— обоснованность гидрогеологической схематизации при переходе к расчетной схеме;

— надежность вычислительной схематизации для решения обратной задачи в рамках выбранной расчетной схемы.

Анализ качества принятой гидрогеологической схематизации наиболее сложный, он требует творческого подхода (как и сама гидрогеологическая схематизация). Такой анализ не может быть регламентирован четкими формально-математическими построениями. Практически многофакторный анализ качества гидрогеологической схематизации приходится сводить к диапазонной характеристике изменений параметра в зависимости от возможных вариантов расчетных схем и к оценке физического правдоподобия результата.

В силу того, что предметом специальных исследований, как правило, является сложная расчетная схема в целом, основным аппаратом, используемым в этих исследованиях, является математическое моделирование (на АВМ и ЭВМ).

5.6.2. Расчетную схему-модель подвергают калибрации, т. е. устанавливают ее соответствие известной информации о фильтрационном процессе в натурных условиях [17, 27]. Калибрация расчетной схемы предполагает определенным образом организованное сопоставление данных о фактическом развитии процесса с реакцией модели на возбуждение, соответствующее натурному возмущению водоносной системы в целом.

Сопоставление может производиться по выбранным характеристикам фильтрационного потока; обобщенная оценка представительности и качества модели в целом определяется так называемыми калибрационными критериями (или функцией качества модели).

Оптимальность расчетной схемы контролируется минимальной величиной калибрационных критериев.

При определении емкостных свойств водоносных горизонтов, параметров их питания по площади (инфильтрация или перетекание) в качестве представительных характеристик анализируемых полей фильтрации рекомендуется выбирать величины напоров в расчетных точках. Соответствующая функция качества модели в этом случае имеет вид:

$$f_{\kappa,\Delta H} = \sum_{1}^{n} \delta_i (H_i^{\text{н}} - H_i^{\text{м}}), \qquad (149)$$

где δ_i — весовой коэффициент, назначаемый в зависимости от качества исходной информации ($1 \geqslant \delta > 0$); $H_i^{\text{н}}$ и $H_i^{\text{м}}$ — натурные и модельные значения напора в расчетной точке i.

Для более общей оценки схемы функция качества определяется зависимостью:

$$f_{к,\,\Delta H} = \sum_{1}^{n} \delta_i (H_i^{н} - H_i^{м})^2. \qquad (150)$$

Функции качества (149)—(150) можно использовать и при определении проводимости водоносных горизонтов. Однако при этом более представительными характеристиками потока являются величины напорного градиента, которые, наряду с проводящими свойствами пластов, учитывают структуру потока:

$$f_{к,\,\Delta I} = \sum_{1}^{n} \delta_i (I_i^{н} - I_i^{м}), \qquad (151)$$

где $I_i^{н}$, $I_i^{м}$ — значения градиентов напора на участке i между расчетными точками (соответственно в натуре и на модели).

Функции качества (149)—(151) можно условно назвать основными калибрационными критериями.

Для полной калибрации расчетной схемы-модели необходима либо ее проверка по дополнительным калибрационным критериям, либо калибрация модели по критериям интегрального характера. Интегральным критерием может быть:

$$f_{к,\,\Delta Q} = \sum_{1}^{n} \delta_i (Q_{г,i}^{н} - Q_{г,i}^{м}), \qquad (152)$$

где $Q_{г,i}^{н}$, $Q_{г,i}^{м}$ — величина фильтрационных расходов на границе i (соответственно, в натуре и на модели).

Использование критерия (152) одновременно с основными обеспечивает проверку однозначности определения фильтрационных параметров.

5.6.3. Чувствительность расчетной схемы-модели оценивают путем определения так называемых коэффициентов чувствительности α, т. е. отношения величины изменения выбранных характеристик фильтрационного поля в расчетной точке i к зафиксированному изменению фильтрационного параметра в окрестностях этой точки или других точек (n):

$$\alpha_{i,n} = \Delta H_{i,n} / \Delta P_n, \qquad (153)$$

где $\Delta H_{i,n}$ — величина изменения напора в расчетной точке в зависимости от изменения параметров ΔP_n в окрестностях точки n.

Коэффициент чувствительности оценивают на математической модели путем варьирования ее параметрами в определенных расчетных точках (зонах) с фиксацией соответствующих изменений характеристик потока (напоров, градиентов и т. д.). После определения реакции модели на изменение одного из ее параметров

модель возвращают в исходное состояние и оценивают коэффициент чувствительности по другому параметру (в другой расчетной точке или зоне).

Коэффициенты чувствительности позволяют оценить любой параметр расчетной зоны поля фильтрации или схемы в целом и при необходимости улучшить ее за счет корректировки элементов. Коррекция модели может быть выполнена на основе различных методов, эффективность каждого из которых зависит от вида решаемой обратной задачи и качества исходной информации.

5.6.4. Параллельно с оценкой качества исходной расчетной схемы в целом (построенной на основе определения параметров по лентам тока или по данным разведки) на соответствующей модели при известных граничных условиях фиксируют во всех расчетных точках невязки, т. е. индекс помех:

$$\Delta K_{i,\Delta H} = H_i^{н} - H_i^{м}, \qquad (154)$$

где $H_i^{н}$, $H_i^{м}$ — напор в расчетной точке i, соответственно, в натуре и на модели.

При определении проводимости поля фильтрации наряду с индексом помех (154) целесообразно использовать другое его выражение:

$$\Delta K_{i,\Delta I} = I_i^{н} - I_i^{м}, \qquad (155)$$

где $I_i^{н}$, $I_i^{м}$ — градиенты потока на участке i между двумя расчетными точками (в натуре и на модели).

После вычисления индекса помех в пределах рассматриваемого поля фильтрации выделяют однородные по параметру зоны или зоны с близкими величинами индексов помех. Анализируют чувствительность модели в расчетных точках (или в выделенных зонах) по изменению параметров модели в целом или отдельных зон. Определяют соответствующие коэффициенты чувствительности этих элементов модели по формуле (153).

Затем производится предварительный расчет поправок параметров в окрестностях расчетных точек (или в отдельных зонах)

$$\Delta P_i^0 = \Delta K_i / \alpha_{i,i}, \qquad (156)$$

где ΔK_i — индекс помех (по величине напоров или градиентов) в расчетной точке (зоне); $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности модели в этой точке (или зоне).

Предварительный расчет поправок ΔP_i^0 обеспечивает снижение индекса помех в расчетных точках (зонах) за счет изменения параметра в пределах этих зон без учета влияния на индекс помех изменений параметров в соседних зонах.

После определения величины ΔP_i^0 рассчитывают уточненные поправки параметров ΔP_i, обеспечивающих снижение величины индекса помех во всех расчетных точках (зонах):

$$\Delta P_i = \lambda[(\Delta K_i - \sum^{n} \Delta P_n^0 \alpha_{i,n})/\alpha_{i,i}], \qquad (157)$$

λ — коэффициент, ограничивающий изменение параметров модели (для аналогового моделирования может быть принят равным 0,1—0,2); ΔK_i — индекс помех в расчетной точке i (в зоне i); ΔP_n^0 — предварительно рассчитанная поправка параметра в точке n (в зоне n); $\alpha_{i,n}$ — коэффициент чувствительности расчетной точки i (зоны i) по изменению параметра n; $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности расчетной точки i (зоны i) по изменению параметра в окрестностях этой точки (зоны).

Затем осуществляют коррекцию модели — одновременно во всех зонах изменяют параметры на величину уточненной поправки.

Далее производят калибрацию скорректированной модели по основному и дополнительному критериям, затем осуществляют (при необходимости) следующий цикл коррекции согласно предлагаемому алгоритму. Циклические операции выполняют до тех тор, пока модель не будет соответствовать установленному заранее минимальному уровню калибрационных критериев.

5.6.5. Обратную задачу можно решать, выполняя серию исследующих поисков удачного направления изменения параметров с целью минимизации функции качества [37]. При решении задачи на АВМ имеется возможность анализировать результаты на каждом этапе моделирования и, в случае неудачного поиска, сразу изменять величину приращения параметра. Кроме того, моделирование позволяет проводить исследующий поиск избирательно, начиная с наиболее чувствительных зон (см. п. 5.6.3) и исключая из процесса подбора нечувствительные участки поля. В связи с этим упрощенный алгоритм подбора, например, переменных в плане значений параметров неоднородного водоносного горизонта реализуется в такой последовательности [38]:

— вычисляют исходное значение основного калибрационного критерия (функции качества $f_к$) по одной из формул (149)—(151);

— оценивают чувствительность модели к искомому параметру (см. п. 5.6.3) и выделяют чувствительные зоны, с которых начинается коррекция значений параметра;

— в наиболее чувствительных зонах модели изменяют поочередно каждое значение искомого параметра P на выбранную величину приращения $\pm\Delta P$ так, чтобы функция качества уменьшалась;

— если изменение очередной переменной не улучшает функцию качества, то переменную оставляют без изменения на данном приближении;

— если в конце очередного приближения, после изменения всех переменных значений искомого параметра, функция качества уменьшилась, то ее новое значение учитывают при калибрации модели на следующем приближении;

— поиск заканчивается, если на очередном шаге (приближении) требуемое изменение каждого переменного значения искомого параметра оказывается меньше некоторой наперед заданной величины, которая определяется технической точностью задания параметра. На аналоговой модели эта величина определяется точностью выставления электрических сопротивлений.

На каждом приближении качество решения проверяют по второму дополнительному калибрационному критерию вида (152).

Эффективное использование метода проб и ошибок возможно при хорошей исходной модели. Для этого необходимо предварительно определять параметры на основе тщательного анализа карты гидроизогипс (см. п. 4.5).

5.6.6. Изложенный алгоритм может использоваться и для отыскания нескольких параметров (например, проводимости, перетекания и водоотдачи). В частности, в условиях неоднородного водоносного горизонта с перетеканием решение обратной задачи сводится к решению ряда прямых задач с последовательной коррекцией на каждом приближении исходных значений проводимости и параметра k_0/m_0, изменяющихся в плане. Для систематизации операций подбора рекомендуется следующий общий подход к коррекции параметров:

— оценивают качество исходной кусочно-однородной модели, построенной на основании предварительной оценки параметров по лентам тока (см. пп. 5.4.10—5.4.15), по основному калибрационному критерию вида (150).

— оценивают чувствительность модели к искомым параметрам (см. п. 5.6.3) и выбирают главный параметр подбора [39]. Для рассматриваемой схемы на значительной площади области фильтрации модель обычно более чувствительна к параметру k_0/m_0, который здесь является главным. На участках, расположенных вблизи границ дренажа (горных выработок), главным параметром чаще всего является проводимость горизонта;

— согласовывают уровни в опорных точках на модели и в натуре путем коррекции только одного главного параметра подбора в процессе решения ряда прямых задач в соответствии с пп. 5.6.4 и 5.6.5; при этом функция качества должна уменьшаться;

— оценивают качество модели по дополнительному калибрационному критерию (152). При расхождении расходов на выделенных участках контура дренажа в натуре $Q_i^н$ и на модели $Q_i^м$ вычисляют коэффициент $p = Q_i^н/Q_i^м$;

— в пределах потока, обеспечивающего расход $Q_i^м$, величины параметров T_n и k_0/m_0 умножают на коэффициент p;

— проводят новую оценку качества модели по основному калибрационному критерию в целом для данного шага. Если функция качества требует дальнейшего уменьшения, то проводят следующий этап коррекции главного параметра и т. д.

5.6.7. Окончательно скорректированная тем или иным способом оптимальная модель может быть проанализирована с позиций оценки возможных погрешностей определения гидрогеологических параметров в рамках выбранной расчетной схемы. С этой целью, исходя из коэффициентов чувствительности скорректированной модели, вычисляют абсолютные погрешности конкретного параметра в окрестностях расчетных точек (зон):

$$\Delta P_{i,N} = (\Delta N_{\text{н}} + \Delta N_{\text{в}})/\alpha_{i,i}, \qquad (158)$$

где $\Delta N_{\text{н}}$ — абсолютная погрешность определения характеристики фильтрационного потока в натуре (напора, градиента); $\Delta N_{\text{в}}$ — абсолютная погрешность вычислительного алгоритма (моделирования), применяемого при анализе поля фильтрации; $\alpha_{i,i}$ — коэффициент чувствительности в расчетной точке скорректированной модели (по выбранной характеристике потока).

Возможные погрешности определения характеристик потока в натуре оценивают некоторым диапазоном погрешностей разного знака. Такой диапазонной оценке подлежат прежде всего метрологические погрешности (замеры расходов и уровней), а также погрешности интерполяции напоров при построении карты гидроизопьез и лент тока. Погрешности вычислительной схематизации могут быть определены однозначно при оценке точности моделирования рассматриваемой схемы [29].

Полученные оценки погрешностей параметров отдельных зон модели могут быть использованы для определения качества прогноза в рамках близкой расчетной схемы, а также для планирования дополнительного объема наблюдений и рациональной организации наблюдательной сети.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предлагаемые рекомендации по определению гидрогеологических параметров составлены с учетом специфики гидрогеологических условий угольных месторождений, приуроченных к слоистым водоносным комплексам, и ориентированы на использование при оценке условий строительства и эксплуатации шахт и карьеров.

2. Для интерпретации результатов опытных опробований слоистых водоносных комплексов рекомендуется использовать метод эталонных кривых, отражающих типовые условия фильтрации.

3. Для анализа и интерпретации особо сложных схем опробования слоистых комплексов целесообразно использовать специализированную программу численного моделирования опытных откачек.

4. Интерпретация результатов наблюдений за развитием техногенного режима подземных вод в период строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий предполагает обработку различной по качеству исходной информации. При ограниченных объемах исходных данных рекомендуются аналитические методы оценки гидрогеологических параметров. Для интерпретации доброкачественной и обширной информации целесообразно использовать предлагаемые приемы математического моделирования.

5. Рекомендации по определению гидрогеологических параметров предназначены:

— для организаций, ведущих проектирование и эксплуатацию систем осушения полей шахт и карьеров, разработку природоохранных мероприятий;

— для геологических служб угледобывающих предприятий, осуществляющих наблюдения за режимом подземных вод;

— для разведочных организаций, проводящих опытно-фильтрационные работы на угольных и сланцевых месторождениях

ПРИМЕР РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ НЕОДНОРОДНОГО ПЛАСТА МЕТОДОМ ТИПОВЫХ КРИВЫХ

Расчет параметров для трехзонной одномерной области, разбитой на 10 блоков с заданным понижением напоров S на границе ($x=0$, $S=100$ м), проведен по данным решения на ЭВМ SSLF-001 полученным Л. Л. Бокий и Ф. П. Стрельским [9] (табл. 25, 26)

Таблица 25

Понижения уровней $S(t, x)$, м

Время t, сут	Понижения уровней в пьезометрах 0—10, расположенных на расстоянии x (м) от границы дренажа в зонах										
	1				2			3			
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	0	50	150	250	350	450	550	650	750	850	900
100	100	47,6	8,7	1,1	0,96	0,21	0,14	0,04	0,01	0,01	0,01
200	100	64,7	20,8	4,84	2,21	1,60	1,19	0,48	0,13	0,04	0,04
300	100	72,3	30,6	9,9	5,39	4,25	3,42	1,74	0,62	0,25	0,25
400	100	76,6	37,9	16,2	9,23	7,65	6,43	3,77	1,65	0,84	0,83
500	100	79,3	43,5	20,1	13,2	11,35	9,8	6,32	3,21	1,90	1,89
600	100	81,2	48,0	24,7	17,2	15,1	13,3	9,2	5,21	3,44	3,43
700	100	82,8	51,6	28,8	21,0	18,7	16,8	12,2	7,56	5,40	5,40
800	100	84,0	54,7	32,5	24,5	22,2	20,2	15,3	10,2	7,7	7,70
900	100	85,0	57,3	35,9	27,9	25,6	23,5	18,4	12,9	10,2	10,2
1000	100	85,9	59,7	39,0	31,0	28,7	26,6	21,4	15,8	13,0	13,0

Таблица 26

Параметры зон неоднородности

Номер зоны	Расстояние до границ зоны, м	T, м²/сут	μ	a, м²/сут	K_e
I	0—300	10	0,25	40	1
II	300—600	50	0,05	1000	1,58
III	600—900	10	0,1	100	∞
IV	900—∞	0	0	∞	

Результаты обработки графиков $S(t, x')$ методом типовой кривой $erfc(x^2)$ приведены в табл. 27 и на рис. 31.

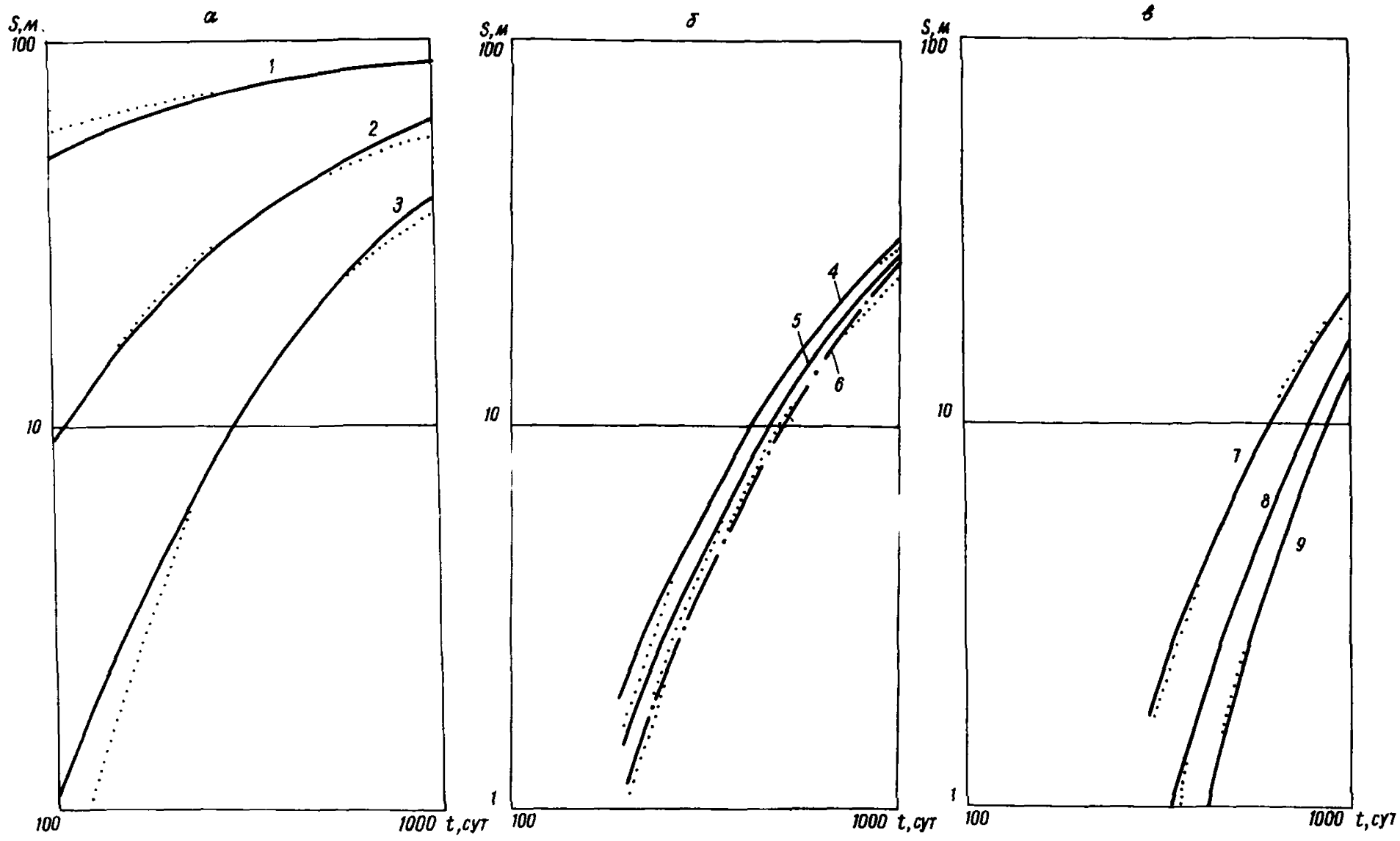


Рис. 31. Графики временного прослеживания (сплошные линии), соответственно, в зонах 1 (*а*), 2 (*б*), 3 (*в*), совмещенные с типовой кривой $erfcx^2$ (пунктир):

1—9— номера пьезометров

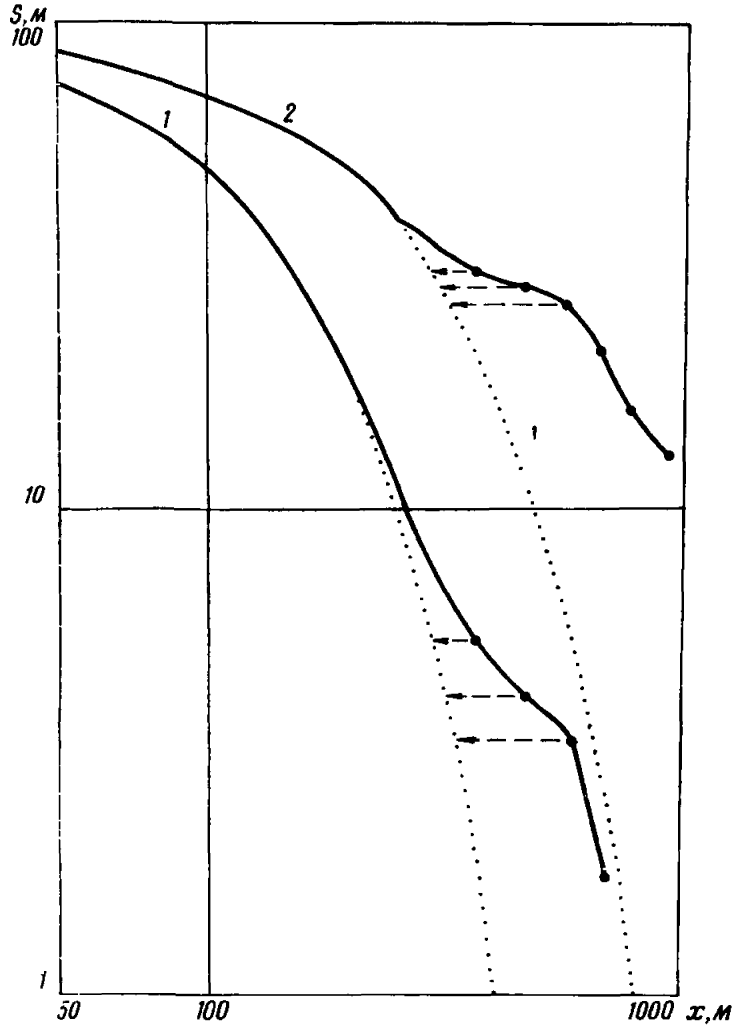


Рис. 32. Графики площадного прослеживания при откачке в трехзонной области:

1 — 300 сут, *2* — 1000 сут; • • • • • • — типовая кривая *ierfcx*

Итоговые погрешности параметров объясняются, главным образом, отсутствием данных о понижении уровней в начальный момент откачки, что при коэффициенте гидравлической активности первой и второй зон равном $k_{z1-2}=1$, и одновременно при малой водоотдаче второй зоны затруднило получение достоверных графиков «откликов» в этих зонах. «Отклик» в первой зоне составил за период откачки 1—5% от всего понижения, во второй зоне (с самого начала прослеживания) — более 20%.

В течение всей откачки фиксируется нестационарный режим фильтрации (табл. 28), что исключает использование соотношений средних градиентов для оценки проводимостей зон.

Таблица 28

Градиенты потока, м/100 м

t, сут	Градиенты потока между пьезометрами 0—10 в зонах							
	1			2		3		
	0—1	1—2	2—3	4—5	5—6	7—8	8—9	9—10
300	56,6	41,7	20,7	1,14	0,83	1,12	0,37	0,0
500	42,6	35,8	23,4	1,85	1,55	3,11	1,31	0,01
1000	29,8	26,2	21,4	2,3	2,1	5,6	2,8	0,0

При использовании данных площадного прослеживания $S(t', x)$ достоверно определены (рис. 32) параметры первой зоны ($a=40$ м^2/сут); с погрешностью — пьезопроводность второй зоны ($a=1600$ м^2/сут) и параметры третьей зоны ($T=8$ м^2/сут, $a=200$ м^2/сут). При расчете параметров третьей зоны использована оценка коэффициента гидравлической активности $k_{z2-3}=1{,}6$, полученная по графику временного прослеживания по скважине 7.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИМИТАЦИИ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ СЛОИСТЫХ СИСТЕМ

Эталонирование специализированной программы при моделировании типовых гидродинамических схем

Точность решения и техническая эффективность созданной программы «SATIR» проанализированы на примере схемы опробования трехслойной системы в условиях равенства водоотдачи и проводимости хорошо проницаемых слоев с учетом сжимаемости слабопроницаемых отложений при выполнении предпосылок перетекания Мятиева —Гиринского. Как известно, точное решение этой задачи получено для трех предельных гидродинамических схем, характеризующих рассматриваемую систему в различные периоды развития нестационарного режима:

напорного изолированного пласта (схема Тейса);

напорного пласта, перекрытого мощной («неограниченной» по мощности) пачкой слабопроницаемых отложений, дренируемых при упругой их водоотдаче (схема Хантуша);

единого водоносного комплекса при синхронном снижении напоров в водоносных пластах и слабопроницаемом разделяющем прослое.

Указанные предельные схемы использовали для проверки качества результатов численного моделирования. На численных моделях изменяли соответствующие параметры элементов поля фильтрации для реализации рассматриваемых типовых схем. Учитывая целевое назначение специализированной программы, эталонирование решений тестовых задач проводили по конечному их результату, т. е. сопоставляли заданные априори параметры водоносного комплекса с вычисленными по функциям напоров, полученных на модели.

Сопоставление параметров, приведенных в табл. 29, свидетельствует об эффективности программы: максимальные погрешности оценки параметров не превышали 5%, причем время расчета одного варианта задачи при таком качестве конечного результата составляло примерно 7 мин процессора ЕС-1022.

Оценка погрешностей вычислительной схематизации при интерпретации результатов пьезометрии относительного водоупора

Для анализа процессов фильтрации в стратифицированных водоносных толщах целесообразно использовать специализированную

Таблица 29

Схема	Характеристика	Параметр, заложенный в модель	Параметр, полученный расчетом по результатам моделирования
Напорный изолированный пласт	Проводимость пласта, из которого проводится откачка, $м^2$/сут	15	15,07
	Пьезопроводность, $м^2$/сут	10^5	$9{,}98 \cdot 10^4$
Напорный пласт, перекрытый мощной пачкой слабопроницаемых отложений	Коэффициент пьезопроводности слабопроницаемых отложений, $м^2$/сут	100	99,8
	Коэффициент фильтрации этих отложений, м/сут	0,1	0,103
Синхронное снижение напоров в двух взаимодействующих пластах и разделяющем их водоупоре	Суммарная проводимость, $м^2$/сут	30	31
	Параметр перетекания, м	19,4	19,1

программу «SATIR» (см. п. 2.4). Программа позволяет провести оценку различных факторов, которые осложняют расчетную схему и поэтому ограничивают применение аналитических методов для определения фильтрационных параметров водоносных пластов и разделяющих их относительных водоупоров. Информацию о емкостных свойствах разделяющего водоупора можно получить при анализе поведения уровней в основном горизонте. Однако эти оценки зачастую оказываются проблематичными в силу малой чувствительности водоносного пласта на изменение пьезопроводности водоупора (как элемента расчетной схемы водоносного комплекса). Между тем независимая оценка этого параметра при опробовании слоистых комплексов возможна по результатам непосредственного наблюдения за снижением напоров в пределах водоупора. С этой целью рекомендуется использовать датчики гидростатического давления, установленные в слабопроницаемых прослоях опробуемого комплекса.

Интерпретацию результатов пьезометрии относительного водоупора целесообразно проводить с использованием программы «SATIR». Эта программа может быть применена, в частности, для имитации откачки из двухслойной системы, представленной водоносным пластом, перекрытым относительным водоупором мощностью m_0. Результаты моделирования этой системы целесообразно использовать для оценки погрешностей аналитических решений по определению коэффициента пьезопроводности a_0 относительного «водоупора».

Рассматриваемая схема-модель откачки описывается следующей системой уравнений:

$$\mu^* \frac{\partial S_r}{\partial t} = T \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \frac{\partial S_r}{\partial r}\right) + k_0 \frac{\partial S_z}{\partial z}\Big|_{z=0}$$

$$\frac{1}{a_0} \frac{\partial S_z}{\partial t} = \frac{\partial^2 S_z}{\partial z^2}, \qquad (159)$$

где μ^*, T — водоотдача и проводимость водоносного пласта; S_r — понижение напора в расчетной точке пласта с координатой r на расчетный момент времени t; S_z — понижение напора на этот же момент времени в относительном водоупоре в точке с координатой z, отсчитываемой от кровли водоносного пласта; k_0, a_0 — коэффициенты фильтрации и пьезопроводности относительного водоупора

Для значений времени, удовлетворяющих критерию $t \leqslant 0{,}1(m_0^2/a_0)$, который ограничивает влияние конечной мощности водоупора m_0, решение системы (159) получено М. Хантушем в следующем виде:

$$S_r = Q/4\pi T \; W^* \; (U; r/B);$$

$$S_z = Q/4\pi T \; W^* \; (U; \; r/B; \; \bar{z}) \qquad (160)$$

при

$$W^*(U; r/B; \bar{z}) = \int_U^\infty \frac{e^{-y}}{y} erfc \frac{\sqrt{U}(r/B + \bar{z}y)}{\sqrt{y(y-U)}} dy,$$

где $U = r^2/4a^*t$); $B^2 = 4T\beta^*/(\beta_0 k_0)$; $a^* = T/\mu^*$; $\beta^* = \mu^*/m$ (m — мощность водоносного пласта); $\beta_0 = k_0/a_0$; $\bar{z} = (z/r)\sqrt{a^*/a_0}$.

Оценки коэффициента пьезопроводности слабопроницаемых отложений возможны при анализе семейства кривых S_z/S_r как функции от безразмерных параметров $a_0 t/z^2$ и a^*t/r^2, полученных по уравнению (160). Однако при $a^*t/r^2 > 10^2$ кривые чувствительны даже к незначительным изменениям параметра пьезопроводности a^* водоносного пласта, что в целом снижает эффективность определения параметров водоупора a_0.

Коэффициент пьезопроводности a_0 водоупора может быть оценен по приближенной зависимости, полученной И. С. Пашковским:

$$S_z = S_r erfc(0{,}8z/\sqrt{a_0 t}). \qquad (161)$$

При возможности принятия предпосылки о «мгновенном» снижении напора S_r на кровле водоносного пласта коэффициент пьезопроводности может быть рассчитан по зависимости, отвечающей схеме плоскопараллельного потока в водоупоре:

$$S_z = S_r erfc(z/2\sqrt{a_0 t}). \qquad (162)$$

Зависимости (161), (162) пригодны для условий, когда на понижения напоров в водоупоре не влияет его верхняя граница. В противном случае результаты пьезометрии относительного водоупора необходимо интерпретировать с учетом этой границы.

Расчет при влиянии непроницаемой верхней границы водоупорного пласта следует проводить по формуле:

$$S_z = S_r [1 - T(z/m_0', \tau)], \qquad (163)$$

где $T(z/m_0, \tau)$ — табулированная функция [21].

Приближенные аналитические зависимости (161)—(163), применяемые для оценки параметров слабопроницаемых отложений, основаны на ряде допущений, которые можно рассматривать как элементы вычислительной схематизации системы дифференциальных уравнений (159). Для анализа погрешностей, возникающих за счет таких допущений, в качестве эталона рассмотрена математическая модель, соответствующая системе дифференциальных уравнений (159) и реализованная с помощью программы «SATIR» (рис. 33). Особенность этой модели — реализация уравнения (159) путем задания нулевого коэффициента фильтрации водоупора в горизонтальном направлении ($k_{ox} = 0$), что полностью имитирует одномерность потока. Для эталонной модели заданы следующие характеристики:

мощность водоносного пласта $m = 15$ м, его коэффициент фильтрации $K = 1$ м/сут, упругоемкость $\beta^* = 10^{-5}$ 1/м;

мощность относительного водоупора $m_0 = 20$ м, его коэффициенты фильтрации в вертикальном и горизонтальном направлениях $k'_{oz} = 10^{-3}$ м/сут, $k'_{ox} = 0$; упругоемкость $\beta_0 = 10^{-4}$ 1/м;

откачка с дебитом 103 м^3/сут проводится из скважины, оборудованной на всю мощность водоносного пласта.

Полученные на модели понижения напоров использовали для расчета коэффициента пьезопроводности водоупора по аналитическим зависимостям (161)—(163). Результаты расчета свидетельствуют о том, что в условиях, когда слабопроницаемый водоупор дренируется как неограниченный по мощности пласт ($\tau < 0{,}1$, где $\tau = a_0 t/m_0^2$), по формуле (161) получают завышенное значение коэффициента пьезопроводности водоупора a_0 по сравнению с фактической величиной, заданной на модели. При этом погрешности возрастают по мере удаления расчетных точек от кровли пласта ($z/m_0 > 0{,}1$). Для точек, расположенных вблизи кровли водоносного пласта ($z/m_0 < 0{,}1$), расчет по формуле (161) удовлетворительный (относительные погрешности параметра не превышают 10%).

Иная закономерность наблюдается при расчете коэффициента пьезопроводности по зависимости, отвечающей схеме плоскопараллельного полуограниченного потока в водоупоре при «мгновенном» снижении напора на границе дренажа — кровле водоносного пласта.

При соотношении $z/m_0 > 0{,}1$ использование зависимости (162) может привести к занижению коэффициента пьезопроводности, в противном случае величины расчетного и фактического коэффициентов пьезопроводности близки (относительная погрешность расчета порядка 10%). При использовании зависимости (163), учитывающей влияние непроницаемого контура (кровли водоупора) на поздних этапах откачки ($\tau > 0{,}1$), получают удовлетворительные результаты (погрешности в определении параметра не превышают величины 10—20%).

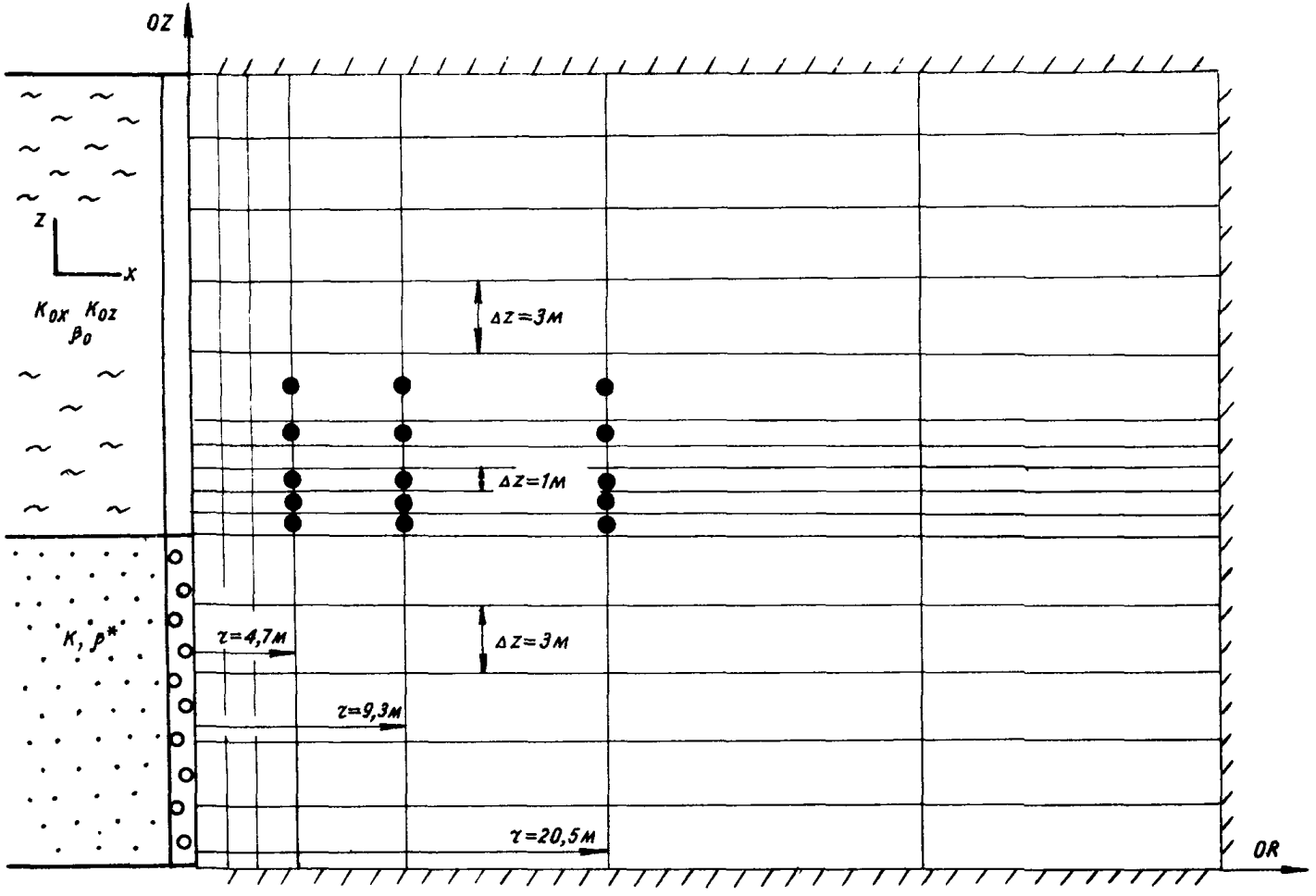


Рис. 33. Схема-модель к задаче о пьезометрии водоупора

Оценку правомерности предпосылки об одномерности потока в водоупоре применительно к различным условиям (в которых пренебрежение горизонтальной составляющей скорости фильтрации в слабопроницаемых отложениях может приводить к погрешностям параметра) следует проводить с использованием программы «SATIR». С этой целью следует рассмотреть две модели двухслойного комплекса: а) изотропный водоупор ($k'_{ox} = k'_{oz}$) и б) анизотропный водоупор ($k'_{ox}/k'_{oz} = 10$); прочие параметры этих моделей целесообразно принимать такими же, как для эталонной схемы-модели с $k'_{ox} = 0$.

При рассмотрении структуры потока в изотропном и анизотропном водоупорах на один и тот же момент времени во втором случае предпосылка об одномерности потока по вертикали приводит к минимальным погрешностям, что объясняется возможностью активного перераспределения напоров вдоль напластования анизотропного водоупора. Однако для изотропного и, в большей степени, анизотропного водоупора характерна постоянная «перестройка» структуры потока во времени и по пространству. При этом в реальных водоупорах фиксируют две зоны:

а) зона «заниженных» по сравнению с эталонной моделью понижений напоров в относительном водоупоре, вблизи возмущающей скважины;

б) зона «завышенных» понижений напора. Размеры второй зоны значительно больше, чем первой, в то время как абсолютные значения разности понижений напоров (по сравнению с эталонной моделью) в этой зоне значительно ниже, чем в первой. Поэтому расчетные параметры, полученные при интерпретации понижений в изотропном и анизотропном водоупорах по схеме одномерного потока, могут изменяться в зависимости от времени и местоположения точки замера напора.

Сопоставление понижений, полученных на эталонной модели ($k'_{ox} = 0$) и на модели изотропного и анизотропного водоупора, позволяет сделать вывод о том, что схематизация двумерного потока в водоупоре одномерным приводит к систематическому снижению во времени полученных величин коэффициента пьезопроводности изотропного и, в особенности, анизотропного водоупора. Перестройка структуры потока в водоупоре практически не сказывается на характере изменений напоров в водоносном пласте. Следовательно, предпосылка Мятиева—Гиринского может быть принята для оценки параметров водоупора по понижениям напоров непосредственно в водоносном пласте, в то же время она неприемлема при определении параметров по результатам пьезометрии водоупора.

Таким образом, использование специализированной программы позволяет обоснованно планировать опытно-фильтрационные работы, регламентировать пьезометрические исследования водоупоров и проводить интерпретацию их результатов, что в совокупности обеспечивает повышение надежности определения параметров водоносных комплексов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Бэр Я., Заславски А., Ирмей С.** *Физико-математические основы фильтрации* воды/Пер. с англ. В. В. Данилова, А. А.. Шарбатяна; Под ред. В. Н. Кунина, Ф. М. Бочевера. — М.: Мир, 1971. — 451 с.

2. **Тейс Ч.** Соотношение между понижениями и дебитом скважин при откачке из безнапорного водоносного горизонта/Пер. с англ. Н. А. Нимюр // Сообщения Американского Геофизического Союза — 1935. № 16. — С. 519—524.

3. Jacob C. E. Notes on determining permeability by pumping tests under water table conditions // U. S. Geol. Survey, Water Supply Paper. — 1963, 1536—1. — 21 p.

4. **Боревский Б. В., Самсонов Б. Г., Язвин Л. С.** Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Недра, 1979. — 326 с.

5. **Хантуш М.** Гидравлика скважин: Успехи гидравлических наук/Пер. с англ., т. 1, 1964. — 125 с.

6. **Янке Е., Эмде Ф.** Таблицы функций с формулами и кривыми/Пер. с нем. Л. И. Седова и Г. В. Толстой. — М. — Л.: 1948. — 420 с.

7. **Лыков А. В.** Теория теплопроводности. — М.: Высшая школа, 1969.— 600 с.

8. **Ньюмен Ш.** Анализ данных откачек в безнапорных анизотропных водоносных горизонтах/Пер. с англ. Н. И. Авокиньлем // Исследования водных ресурсов, т. 11. — М.: 1975, № 2, — С. 329—343.

9. **Боким Л. Л., Стрельский Ф. П.** О точности определения фильтрационных параметров неоднородных водоносных горизонтов по результатам режимных наблюдений на шахтных полях // Геологические и геофизические методы изучения условий разработки угольных месторождений: Сб. науч. тр. — Л.: ВНИМИ, 1984. — С. 3—8.

10. **Левич В. Г.** Курс теоретической физики: 2-е изд., перераб.: Учеб. пособие для физико-технич. вузов и фак. — М.: Наука, 1969. — С. 348—352.

11. **Рюмин А. Н., Петрова И. Б., Миронов А. С.** Изучение некоторых вопросов охраны подземных вод при разведке Орловского месторождения // Тр. ЛГИ, т. 91. 1982. — С. 89—96.

12. **Максимов В. А.** О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде //ПМТФ, 1962, № 3. — С. 162—168.

13. **Рюмин А. Н.** Определение проводимости зоны разлома по данным откачки // Разведка и охрана недр, 1982, № 8. — С. 48—51.

14. **Пилатовский Д. П.** Основы гидромеханики тонкого пласта. — М.: 1976. — 155 с.

15. **Бабушкин В. Д., Плотников И. И., Чуйко В. М.** *Методы изучения фильтрационных свойств неоднородных пород.* — М.: — Недра, 1974. — 208 с.

16. **Мотц Л. Н.** Прогноз изменения понижений уровней в безнапорном и напорном горизонтах // Экспресс-информация, вып. 8, серия гидрогеология и инженерная геология. — М., 1982. — С. 21—32.

17. **Мироненко В. А., Шестаков В. М.** Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. — М.: Недра, 1978 — 325 с.

18. **Мироненко В. А.** *Динамика подземных вод: Учеб. для вузов.* — М.: Недра, 1983. — 357 с.

19. **Указания по определению** условий безопасной выемки угля под водными объектами и их охране. — Л.: ВНИМИ, 1977. — 56 с.

20. **Правила охраны** сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных разработок на угольных месторождениях. — М.: Недра, 1981. — 288 с.

21. **Справочное руководство** *гидрогеолога.* — В 2-х *томах.* — Л.: Недра, 1979. — 512 с.

22. **Бочевер Ф. М., Гармонов Н. В., Лебедев А. В., Шестаков В. М.** Основы гидрогеологических расчетов. — 2-е изд. — М.: Недра, 1969. — 368 с.

23. **Гидрогеологические исследования** в горном деле/В. А. Мироненко, Ю. А. Норватов, Л. И. Сердюков и др.; Под ред. В. А. Мироненко. — М.: Недра, 1976. — 352 с.

24. **Норватов Ю. А.** *Принципы решения обратных гидрогеологических задач* при изучении условий осушения полей шахт и разрезов // Геофизические и

геологические исследования угольных пластов и вмещающих пород на шахтах и разрезах: Сб. науч. тр. — Л.: ВНИМИ, 1981. — С. 46—50.

25. **Норватов Ю. А.** Исследование гидрогеологических условий месторождений полезных ископаемых методами аналогового моделирования. Автореф. дис. ... д-ра геол.-мин. наук. — Л.: ЛГИ, 1982. — 45 с.

26. **Биндеман Н. Н., Язвин Л. С.** Оценка эксплуатационных запасов подземных вод. — М.: Недра, 1970. — 216 с.

27. **Шестаков В. М.** Методика интерпретации опытно-фильтрационных наблюдений. — М.: Изд-во МГУ; 1982. — 52 с.

28. **Жернов И. Е., Шестаков В. М.** Моделирование фильтрации подземных вод. — М.: Недра, 1971. — 226 с.

29. **Норватов Ю. А.** Методика определения погрешностей гидрогеологических прогнозов // Геологические и геофизические исследования на угольных месторождениях: Сб. науч. тр. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 15—20.

30. **Руководство по дренированию** карьерных полей. Разд. III, IV. — Л.: ВНИМИ, 1968. — 212 с.

31. **Методические указания** по определению гидрогеологических параметров при разведке и освоении угольных месторождений. — Л.: ВНИМИ, 1974. — 139 с.

32. **Требования** к гидрогеологическим исследованиям на месторождениях, осваиваемых открытым способом: Руководство по дренированию карьерных полей. Разд. V и VI. — Л.: ВНИМИ. 1970. — 173 с.

33. **Фролов Н. М.** Геотермические методы исследований в гидрогеологии. — М.: Недра, 1979. — 250 с.

34. **Бокий Л. Л., Стрельский Ф. П., Леваньков Б. И.** Применение термометрии для прогноза водопритоков в шахты // Шахтное строительство. — 1983. — № 3. — С. 8—10.

35. **Лялько В. И., Митник М. М.** Оценка величины вертикального перетока подземных вод и коэффициентов фильтрации слабопроницаемых пород с помощью геотермических методов // Применение геофизических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях: Материалы конференций, семинаров, совещаний. — М.: ВИЭМС, 1970. — С. 45—49.

36. **Тихонов А. Н., Арсенин В. Я.** Методы решения некорректных задач. — М.: Наука, 1974. — 223 с.

37. **Химмельблау Д.** Прикладное нелинейное программирование/Пер. с англ. И. М. Быховской, Б. Т. Вавилова; Под ред. М. Л. Быховского. — М.: Мир, 1975. — 534 с.

38. **Бокий Л. Л., Стрельский Ф. П.** К вопросу о решении обратных задач фильтрации // Геологические и геофизические исследования на угольных месторождениях: Сб. науч. тр. — Л.: ВНИМИ, 1980. — С. 21—25.

39. **Гавич И. К.** Теория и практика применения моделирования в гидрогеологии. — М.: Недра, 1980. — 358 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение 3

1. Особенности техногенного режима подземных вод при эксплуатации угольных (сланцевых) месторождений и классификация основных гидродинамических схем 6

1.1. Специфика техногенного режима подземных вод . . . 6

1.2. Классификация расчетных гидродинамических схем . . 7

2. Методические рекомендации по интерпретации результатов кустовых откачек 10

2.1. Постановка задачи 10

2.2. Принципы интерпретации откачек методом типовых кривых 12

2.3. Основные гидродинамические схемы, используемые при интерпретации откачек 14

2.4. Использование численного моделирования для планирования опытных откачек и интерпретации их результатов 40

3. Методические рекомендации по интерпретации результатов опытно-эксплуатационного водопонижения 44

3.1. Постановка задачи 44

3.2. Основные схемы плановой неоднородности водоносных комплексов 45

3.3. Основные схемы многоярусных толщ 52

4. Гидрогеологическая схематизация при анализе материалов наблюдений за режимом подземных вод на стадии строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий 55

4.1. Схематизация развития фильтрационных процессов во времени 55

4.2. Схематизация условий на границах области фильтрации 55

4.3. Схематизация профильной неоднородности дренируемых комплексов 60

4.4. Схематизация плановой неоднородности 60

4.5. Схематизация структуры фильтрационных потоков 60

4.6. Схематизация условий питания водоносных горизонтов по площади 64

4.7. Схематизация нелинейных фильтрационных процессов 65

5. Указания по определению фильтрационных характеристик и параметров питания водоносных горизонтов по результатам режимных наблюдений 67

5.1. Определение параметров проводимости водоносных горизонтов в условиях установившегося режима фильтрации (первый класс расчетных схем) 67

5.2. Определение емкостных характеристик и проводимости горизонтов в условиях нестационарного режима фильтрации (второй класс расчетных схем) 70

5.3. Определение интенсивности инфильтрационного питания и проводимости водоносных горизонтов (третий класс расчетных схем) 80

5.4. Определение фильтрационных параметров водоносного пласта с перетеканием (четвертый класс расчетных схем) 84
5.5. Особенности оценки параметров в условиях нелинейности фильтрационных процессов 93
5.6. Специальные исследования расчетных геофильтрационных схем 93
Заключение 100
Приложение 1. Пример расчета параметров неоднородного пласта методом типовых кривых 101
Приложение 2. Анализ результатов численных экспериментов по имитации опытно-фильтрационных опробований слоистых систем 105
Приложение 3. Графики типовых кривых . . . . . (вкладка)
Литература 111

Составители

д-р геол.-мин. наук *Ю. А. Норватов* (введение, разделы 1, 4, 5, заключение); канд. геол.-мин. наук *А. Н. Рюмин* (разделы 2, 3, прил. 1, 3); канд. геол.-мин наук *Л. Л. Бокий* (5.2.6; 5.4; 5.6.5; 5.6.6); канд. геол.-мин. наук *Ф. П. Стрельский* (5.2.6; 5.4.10); инж. *И. Б. Петрова* (2.4, прил. 2)

Редактор *В Д. Вакуленко*
Художественный редактор *Н. С. Чистякова*
Технический редактор *М. А. Тарасенко*
Корректор *Ю Б. Есельсон*

Сдано в набор 14 07 86 г. Подписано к печати 31 12.86 г М20932
Формат бумаги 60×90/16 Объем 7,125 п. л + вкладка Уч.-изд л 7
Заказ 60 Тираж 500 Цена 50 к
Печатный цех ВНИМИ

УДК 556.332

Рекомендации по методике определения гидрогеологических параметров для прогноза условий строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий. Л., 1986. — 116 с. (М-во угольной пром-сти СССР. ВНИИ горн. геомех. и маркшейд. дела)

МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ, ОПЫТНЫЕ ОТКАЧКИ, РЕЖИМНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ, АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Изложены рекомендации по определению гидрогеологических параметров по результатам опытно-фильтрационных работ и режимных наблюдений на месторождениях полезных ископаемых. Систематизированы аналитические зависимости для оценки параметров, сформулированы рекомендации по применению электрических моделей и электронно-вычислительных машин для интерпретации исходной гидрогеологической информации. Изложены указания по оценке погрешностей при определении фильтрационных параметров по результатам наблюдений за режимом подземных вод. Предназначены для проектных и разведочных организаций, а также для геологических служб шахт и карьеров.

Ил. 33, табл. 29, библиогр. 39.

Приложение 3

(к Рекомендациям по методике определения гидрогеологических параметров
для прогноза условий строительства и эксплуатации угледобывающих предприятий)

ГРАФИКИ ТИПОВЫХ КРИВЫХ

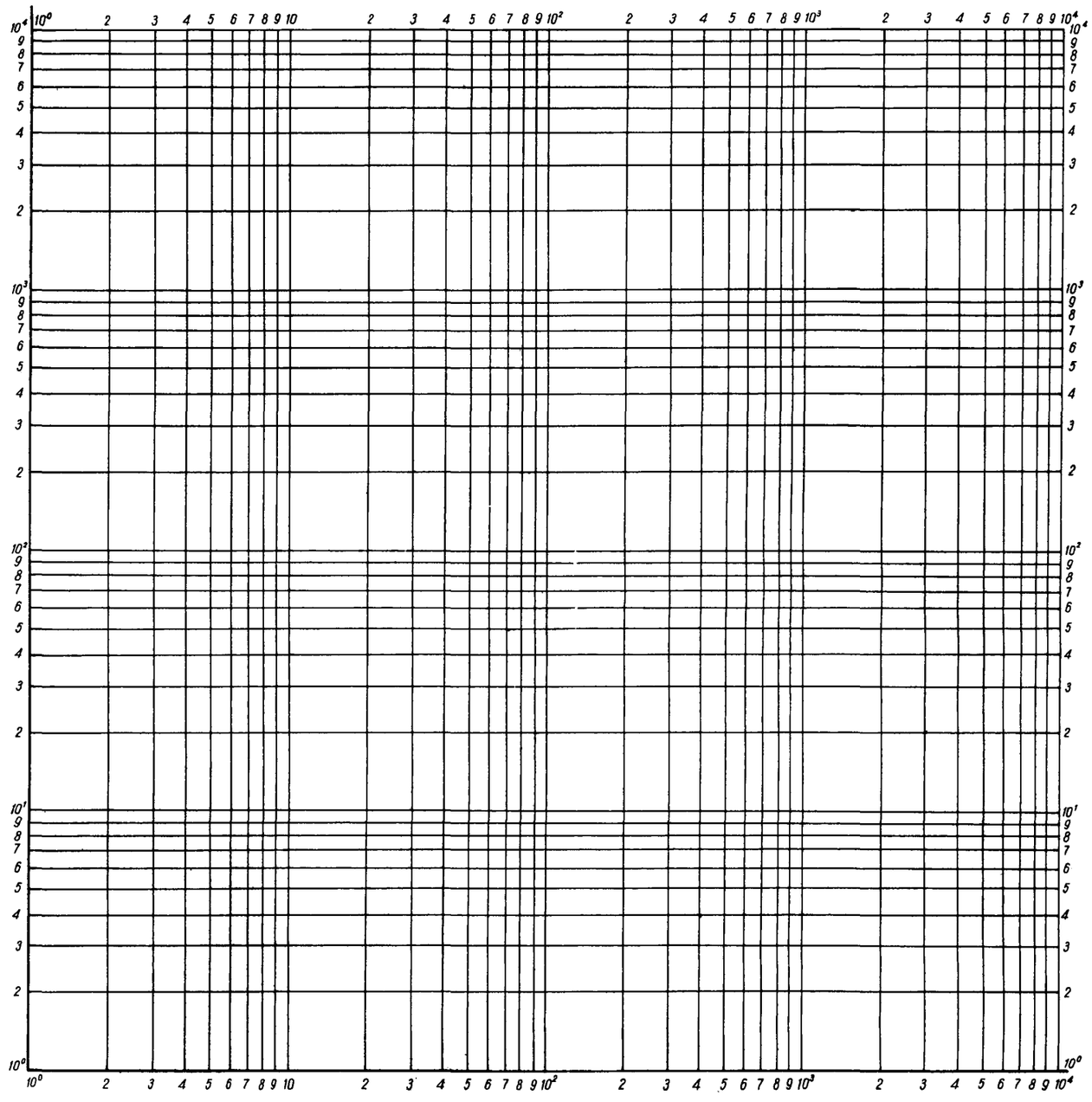


Рис. 1. Бумага билогарифмическая

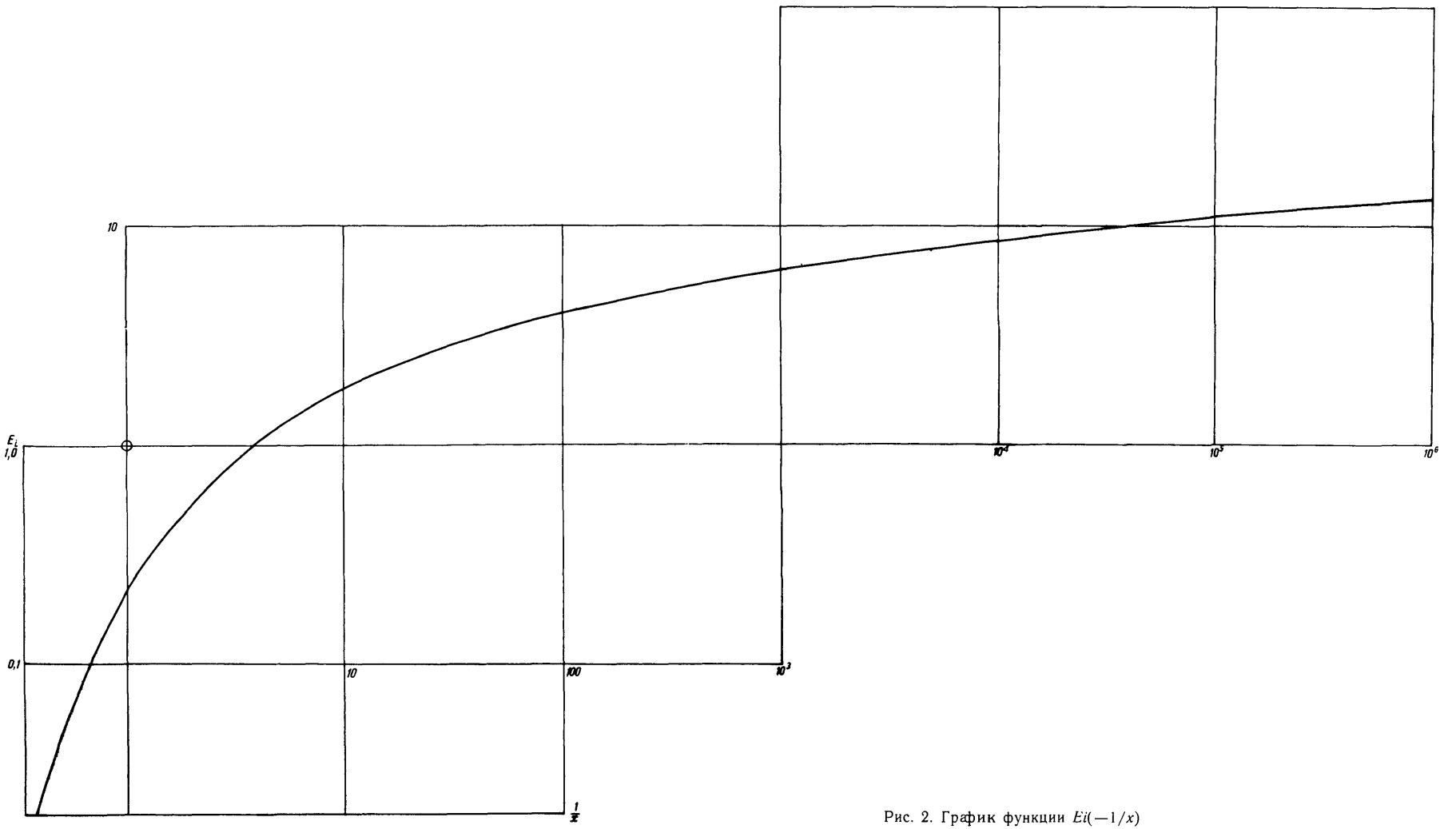


Рис. 2. График функции $Ei(-1/x)$

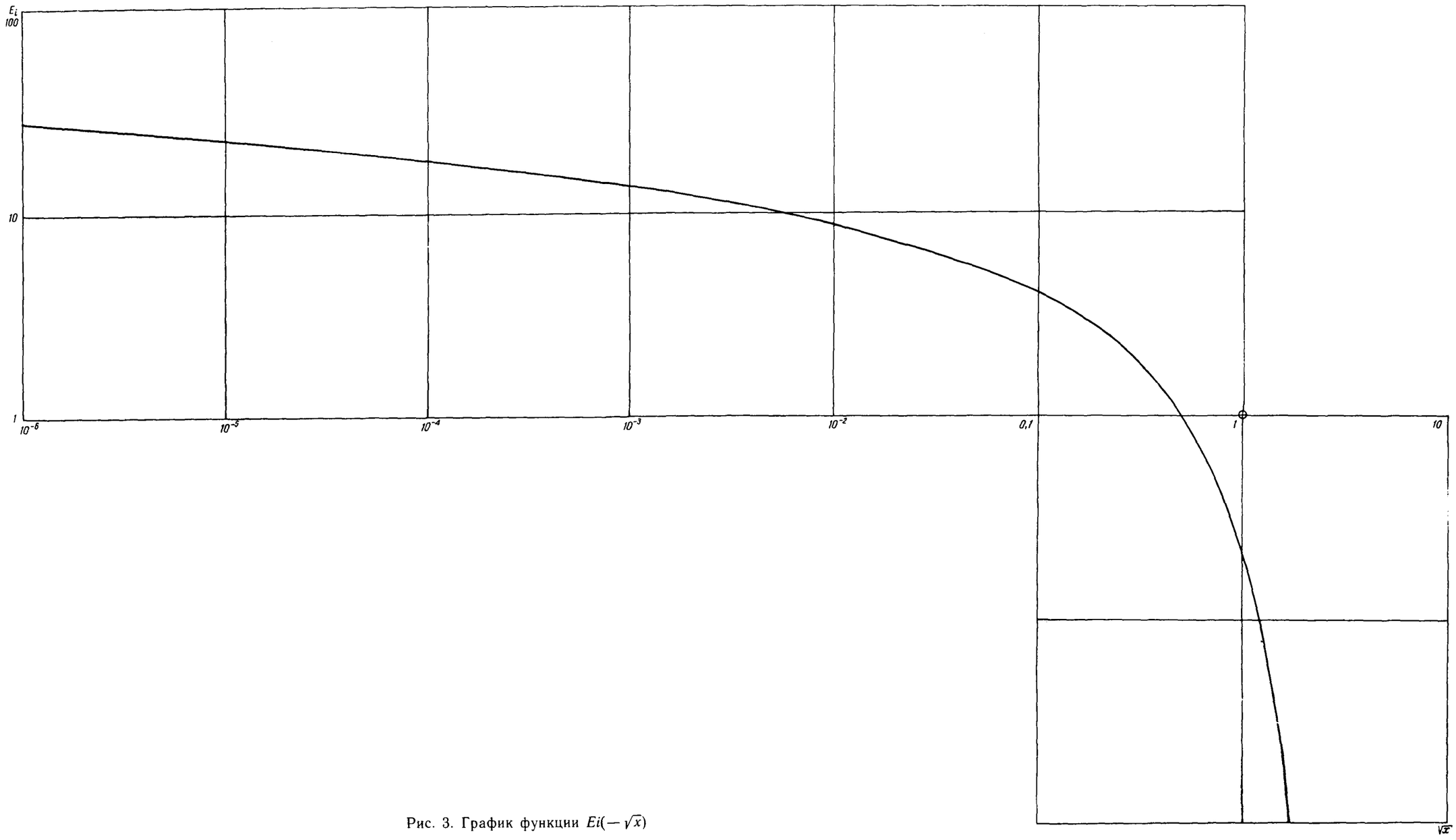
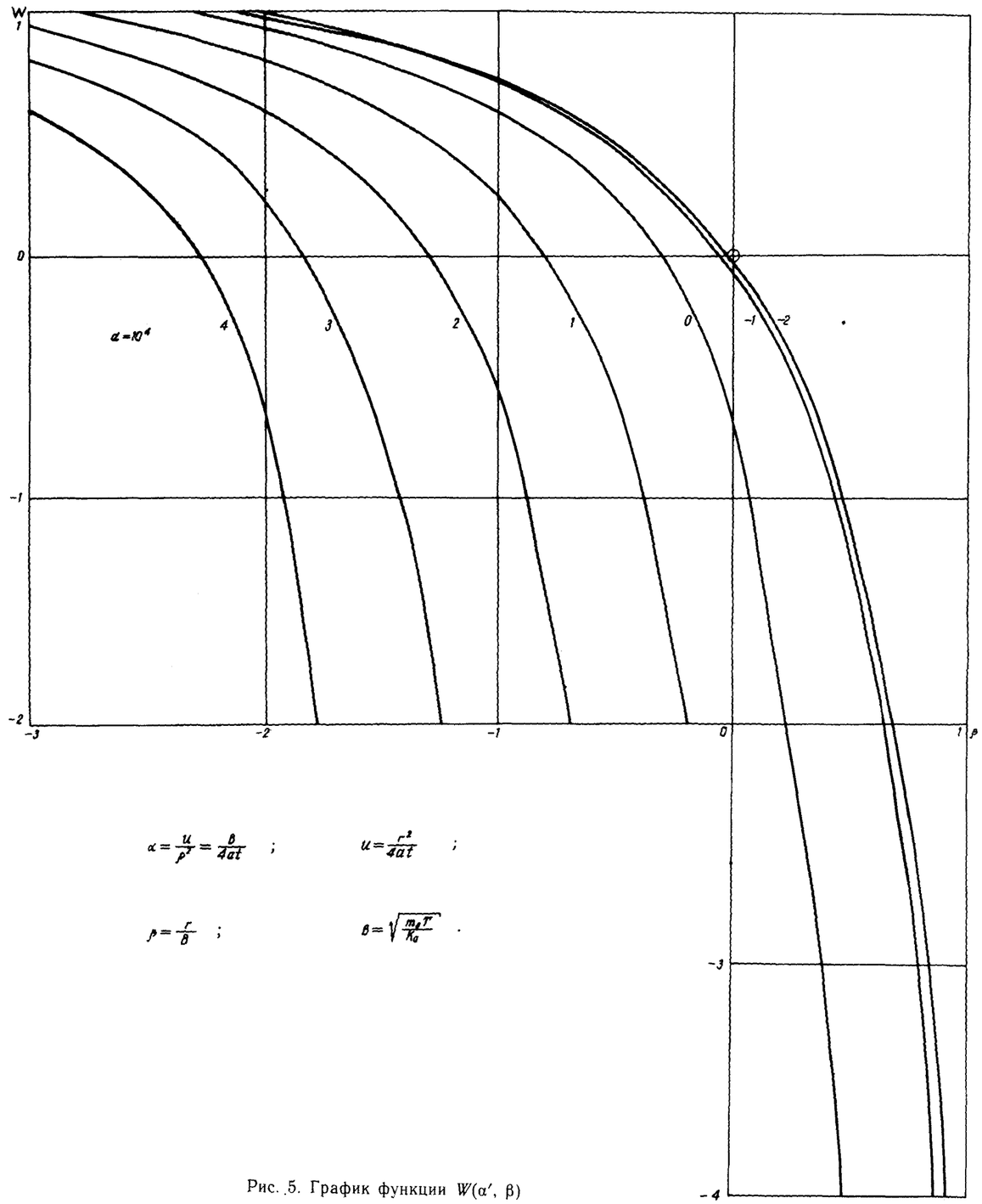


Рис. 3. График функции $Ei(-\sqrt{x})$



$$\alpha = \frac{u}{\rho^2} = \frac{\theta}{4at} \quad ; \qquad u = \frac{r^2}{4at} \quad ;$$

$$\rho = \frac{r}{\theta} \quad ; \qquad \theta = \sqrt{\frac{m_e r}{K_a}} \quad .$$

Рис. 5. График функции $W(\alpha', \beta)$

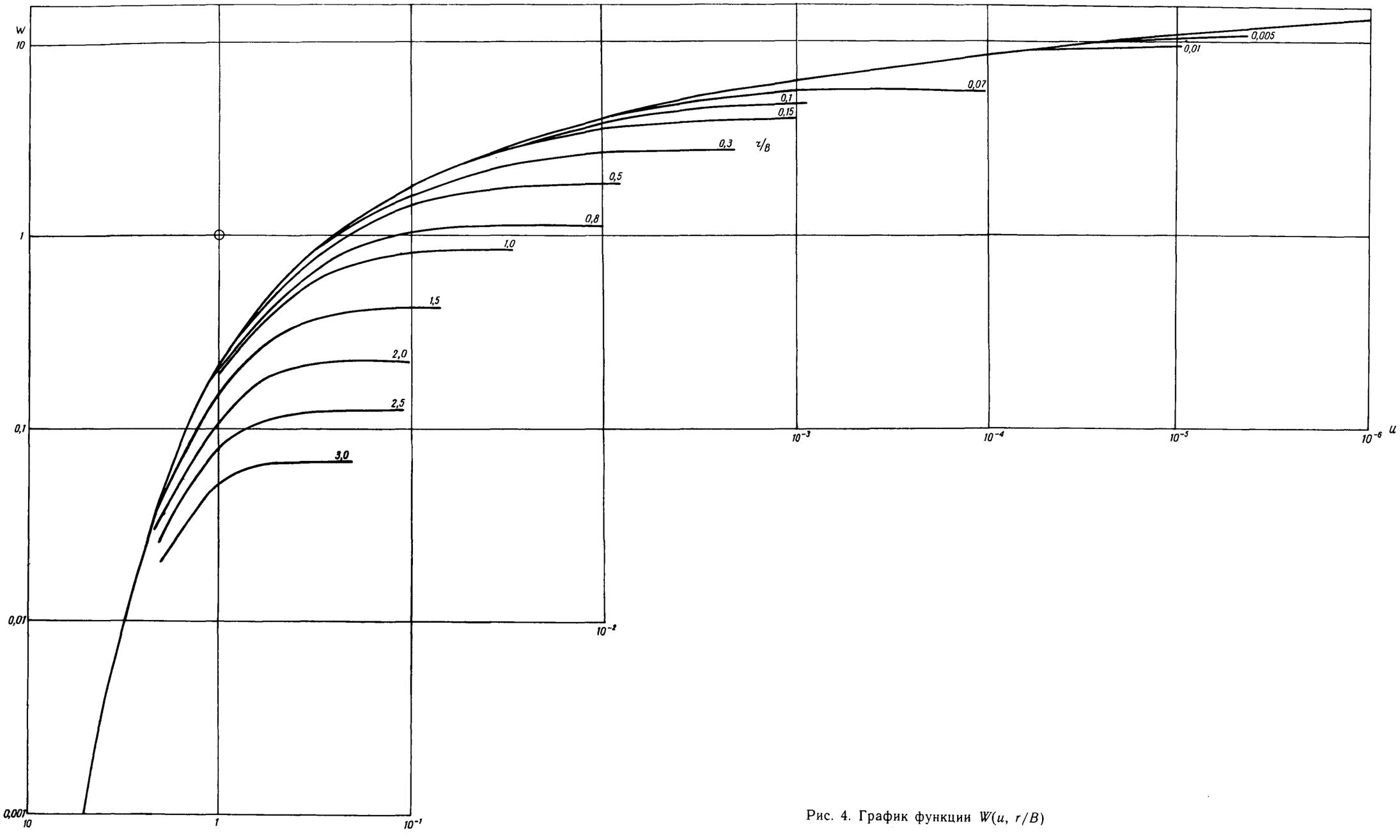


Рис. 4. График функции $W(u, r/B)$

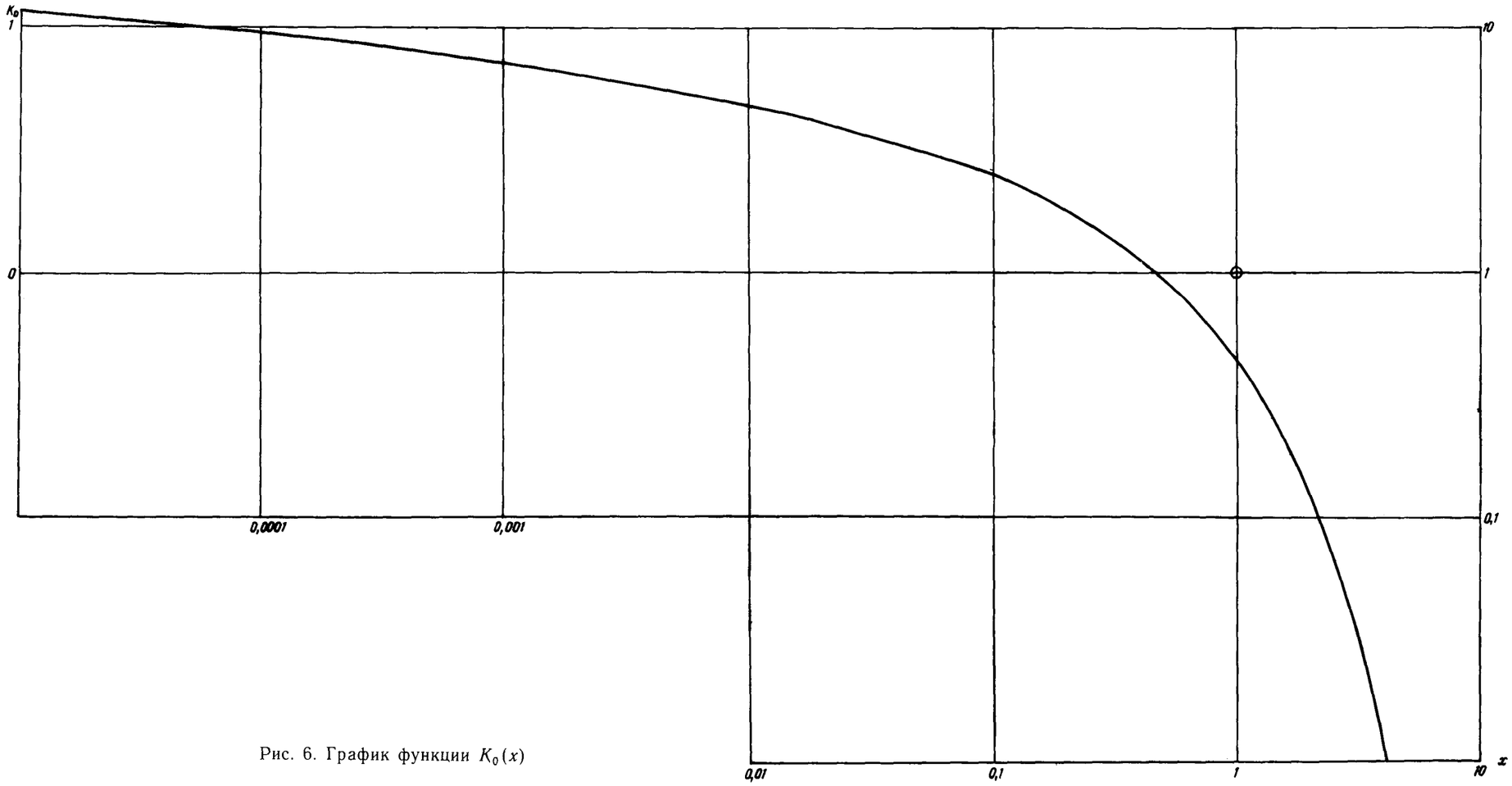
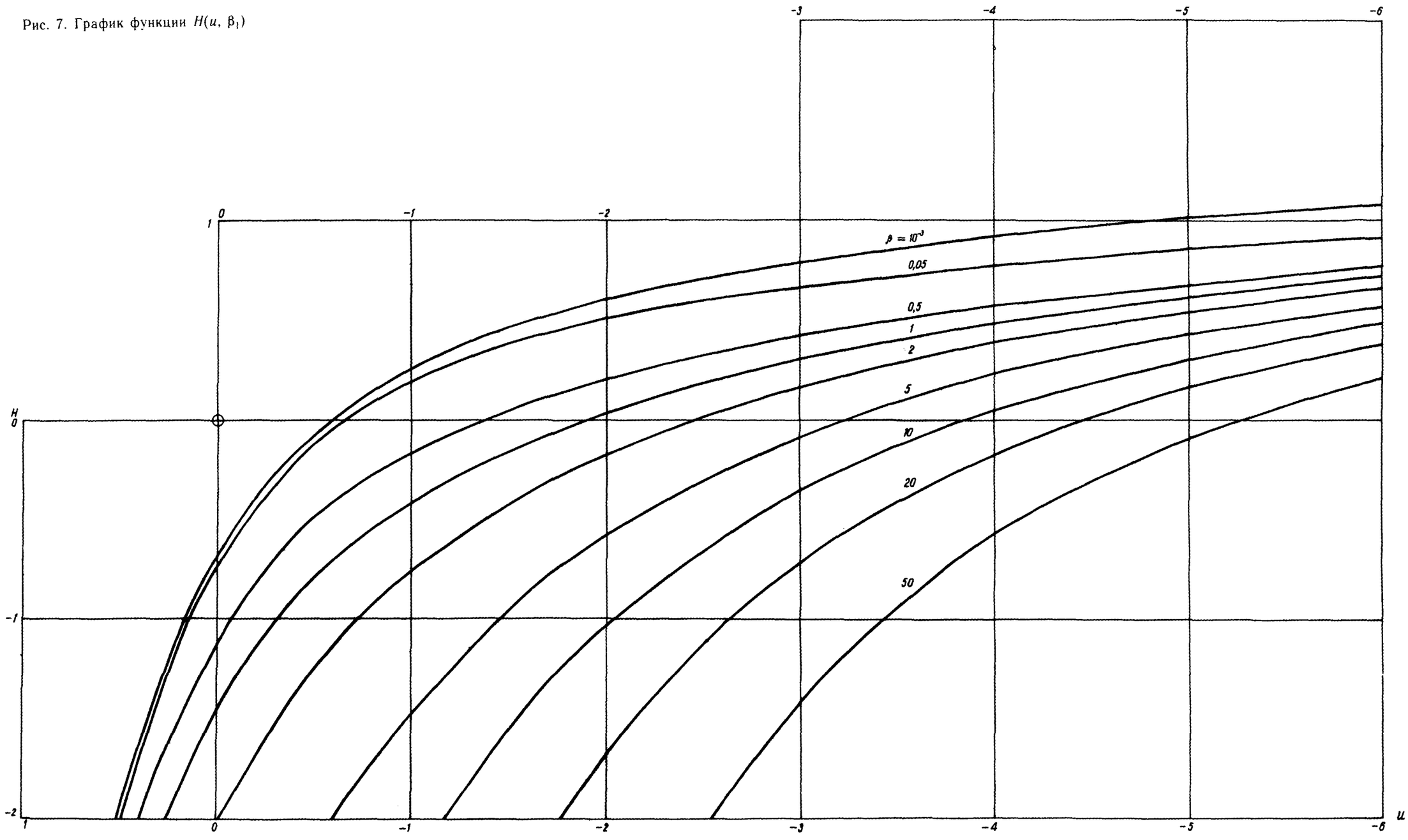
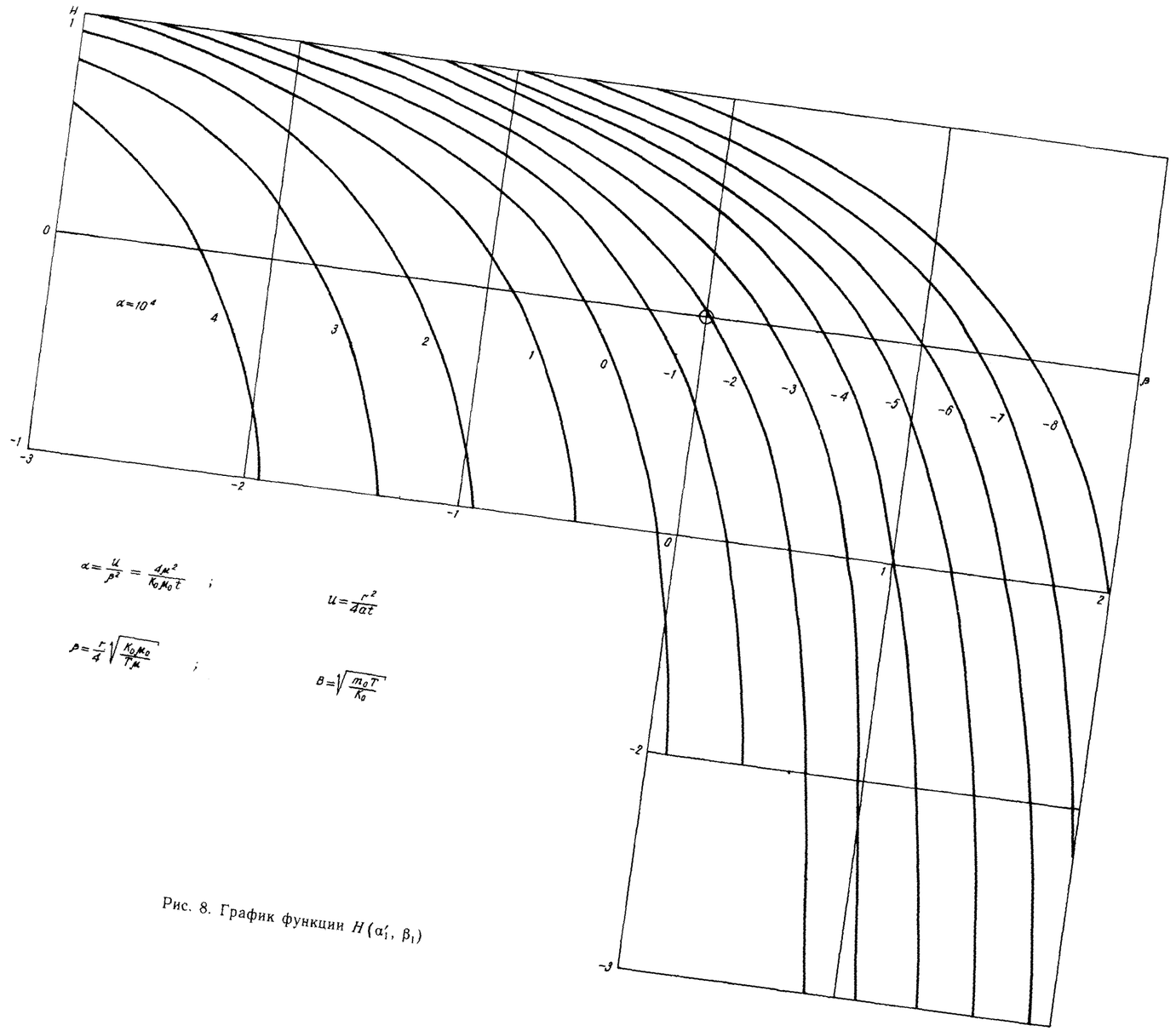


Рис. 6. График функции $K_0(x)$

Рис. 7. График функции $H(u, \beta_1)$





$$\alpha = \frac{u}{\rho^2} = \frac{4\mu^2}{K_0 \mu_0 t} \quad ; \qquad u = \frac{r^2}{4at}$$

$$\rho = \frac{r}{4}\sqrt{\frac{K_0 \mu_0}{T\mu}} \quad ; \qquad B = \sqrt[4]{\frac{m_0 T}{K_0}}$$

Рис. 8. График функции $H(\alpha_1, \beta_1)$

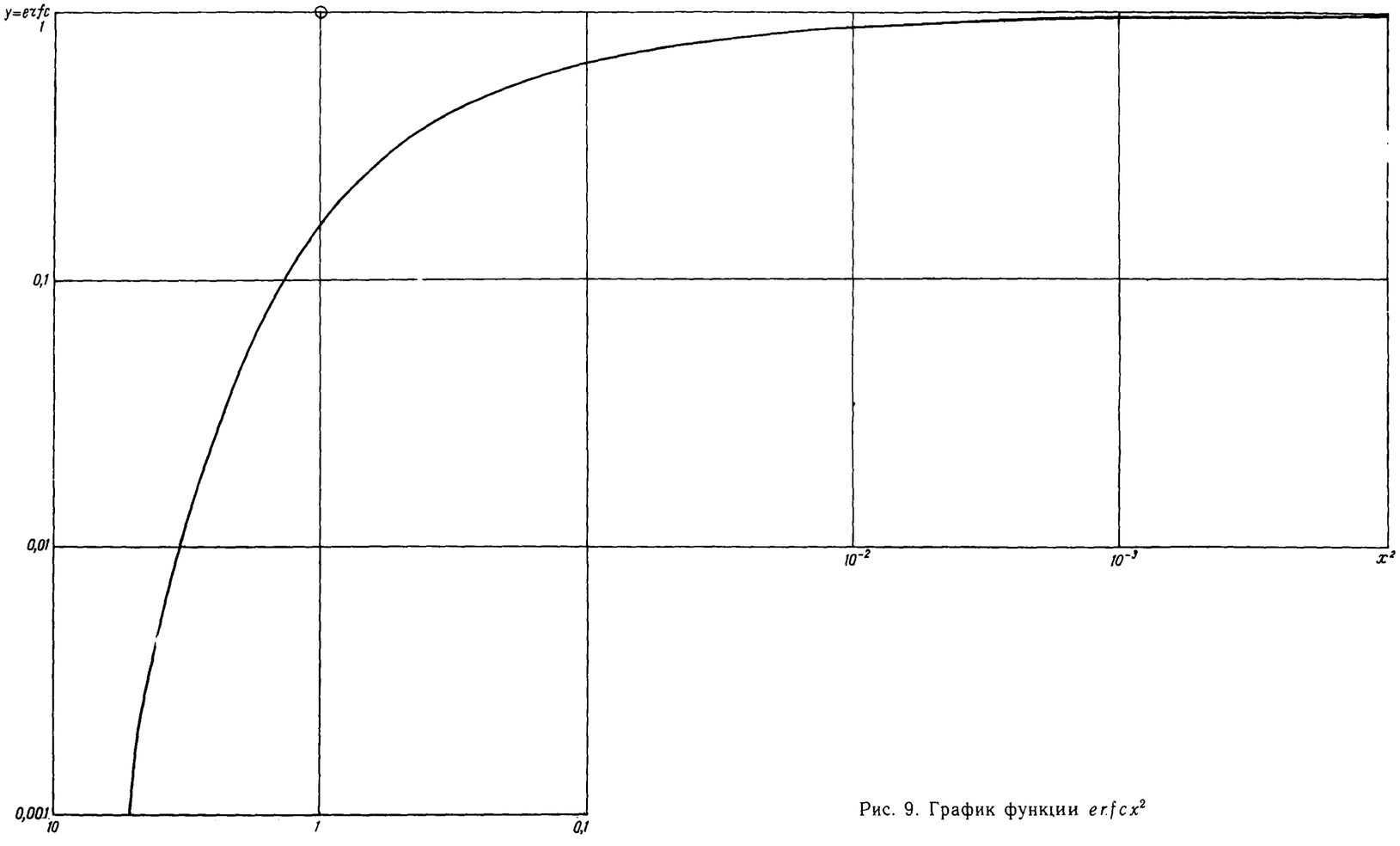


Рис. 9. График функции $erfc\,x^2$

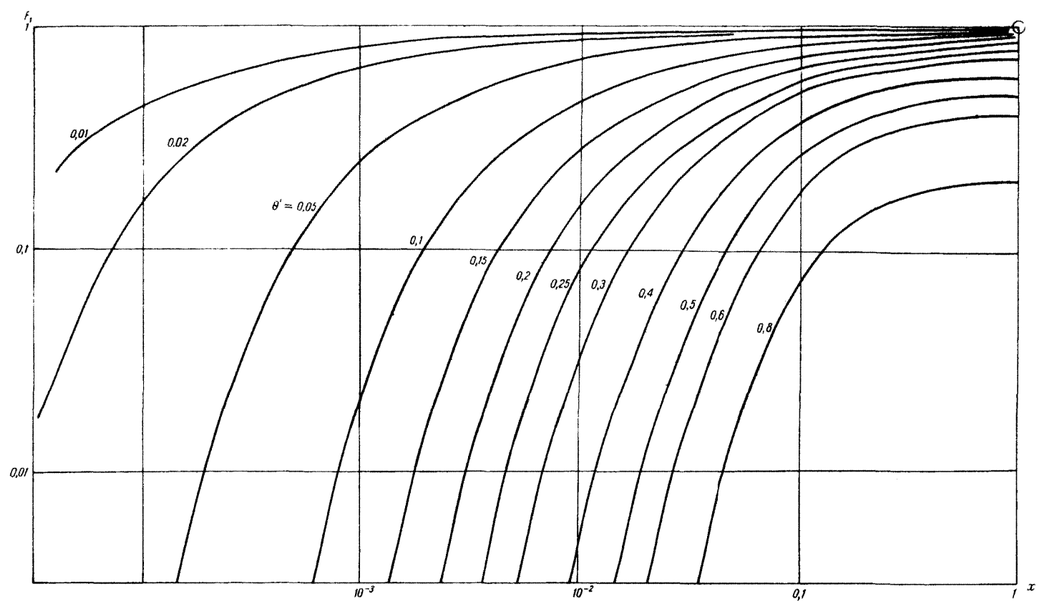


Рис. 10. График функции $F_1(x, \theta')$

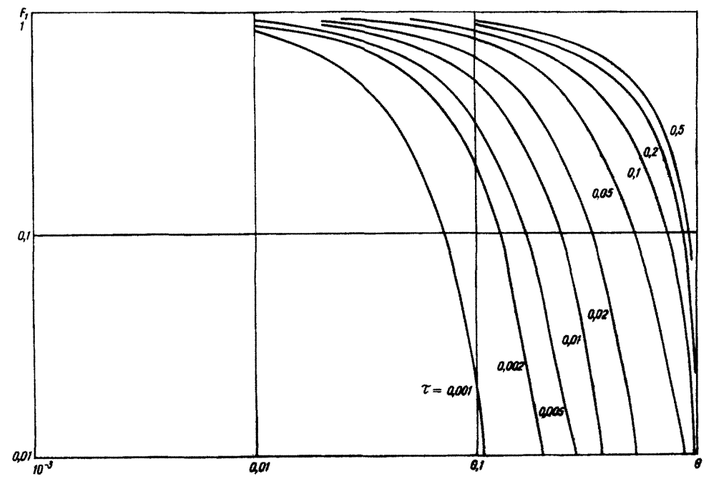


Рис. 11. График функции $F_1(\tau_1', \theta)$

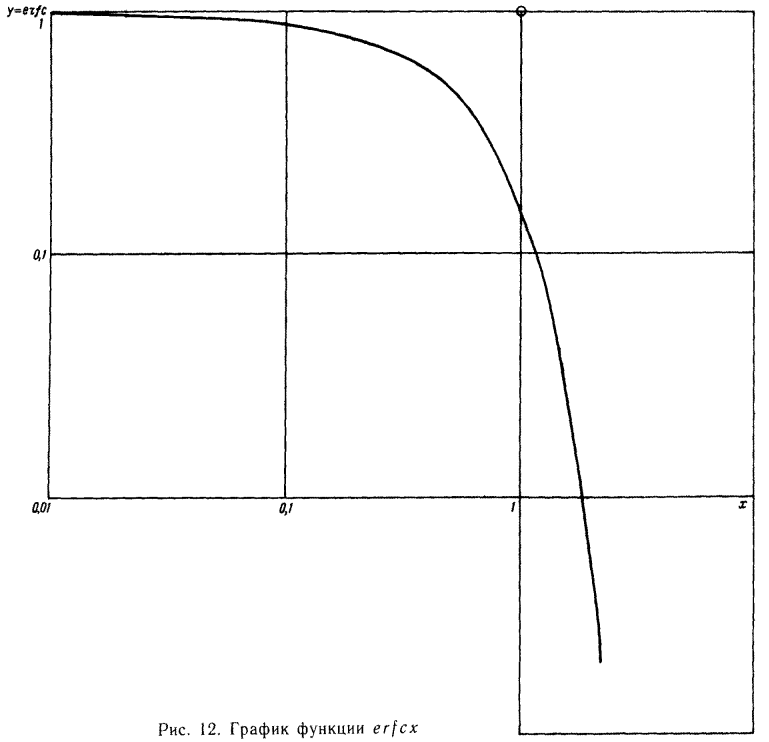


Рис. 12. График функции $erfcx$

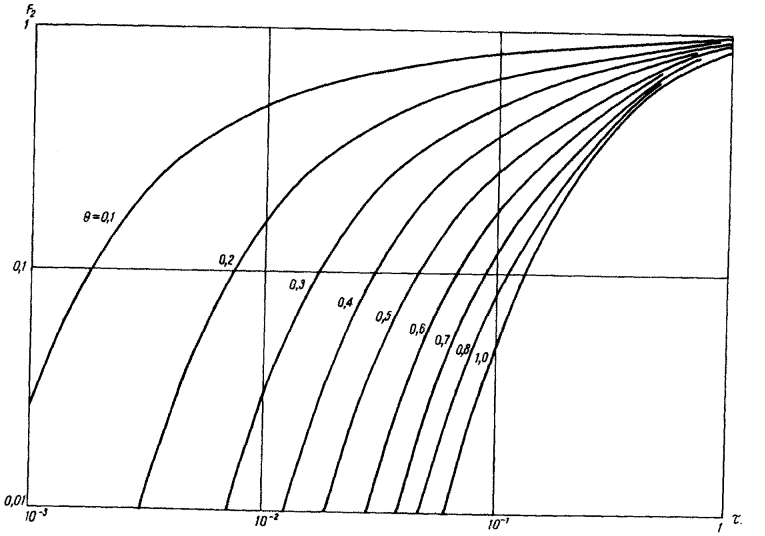


Рис. 13. График функции $F_2(\theta', \tau)$

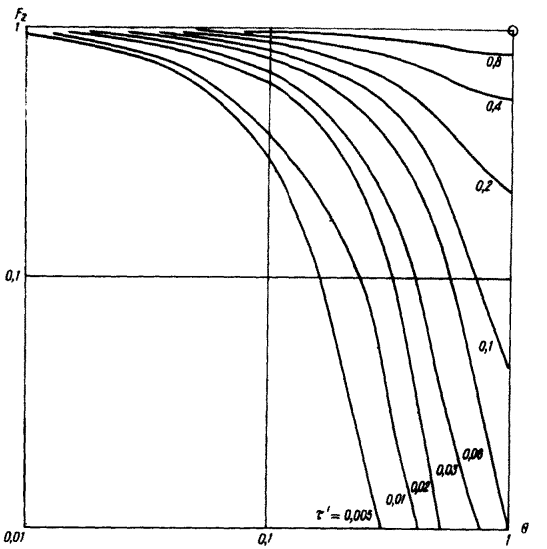


Рис. 14. График функции $F_2(\tau', \theta)$

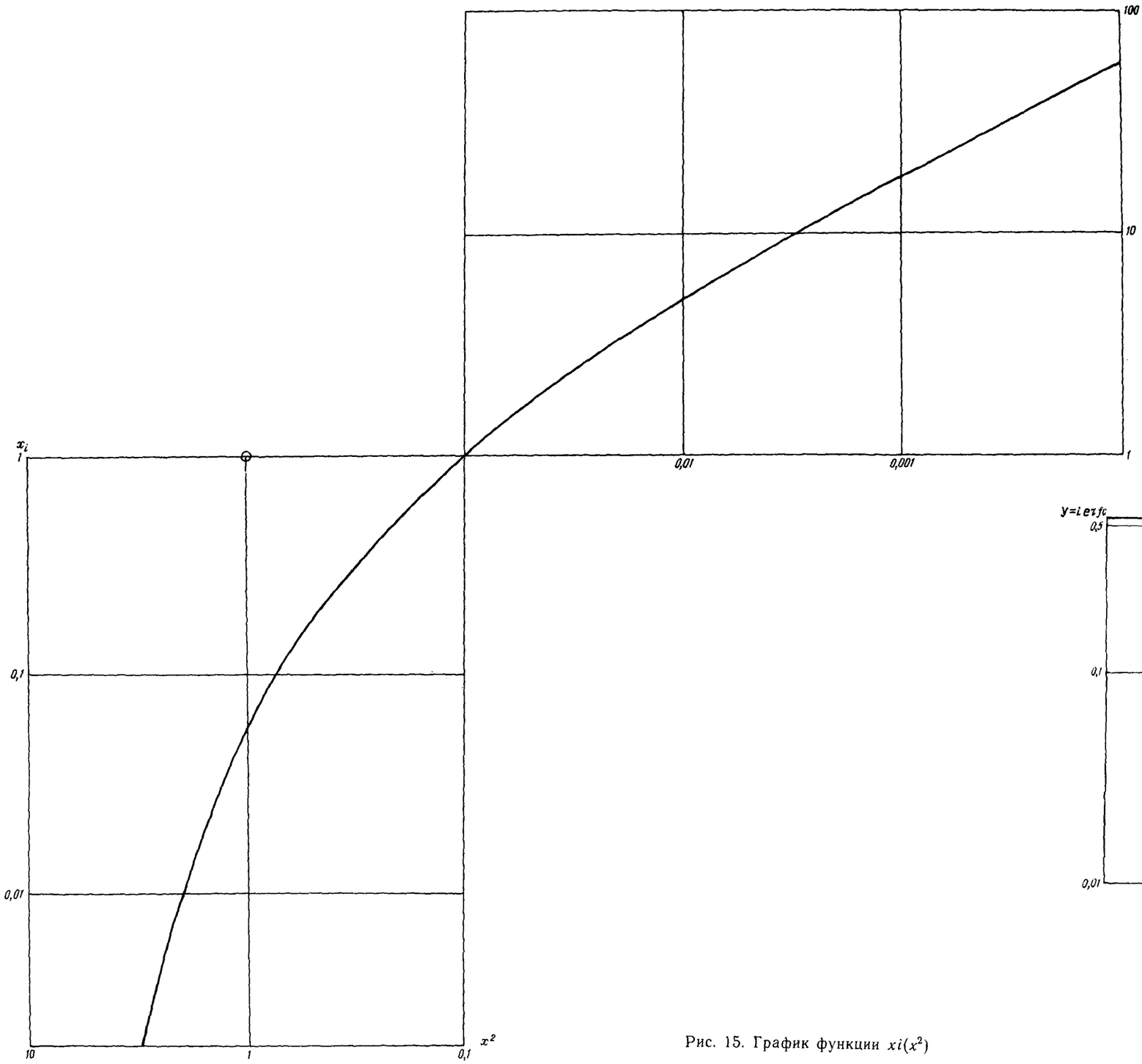


Рис. 15. График функции $xi(x^2)$

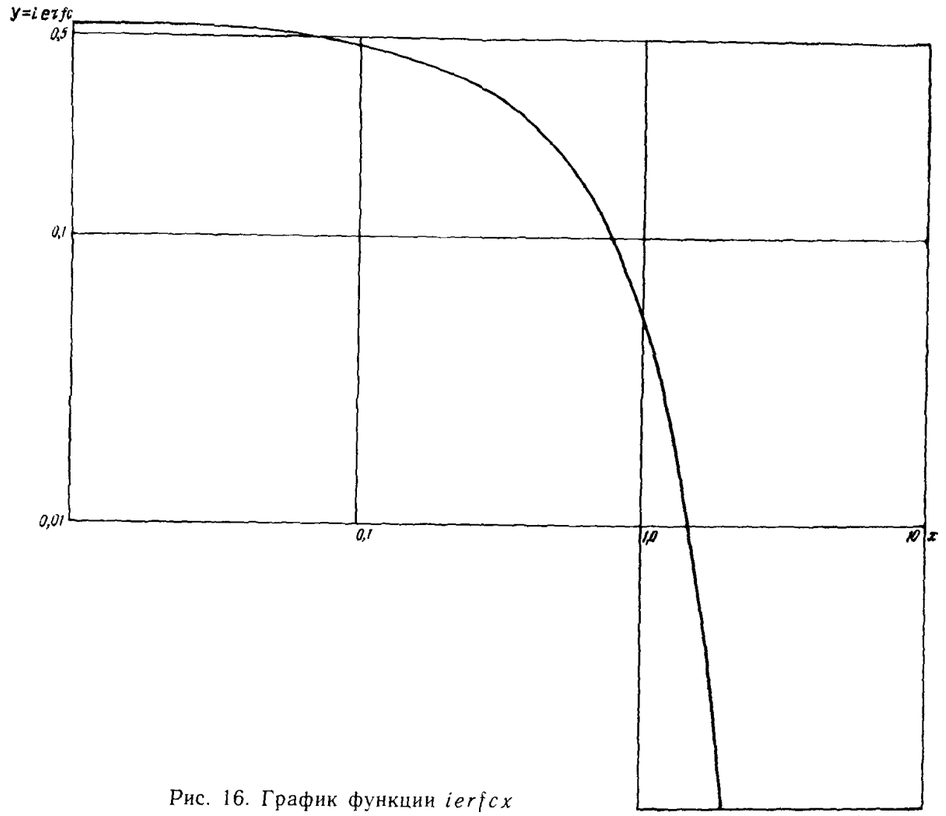


Рис. 16. График функции $ierfcx$

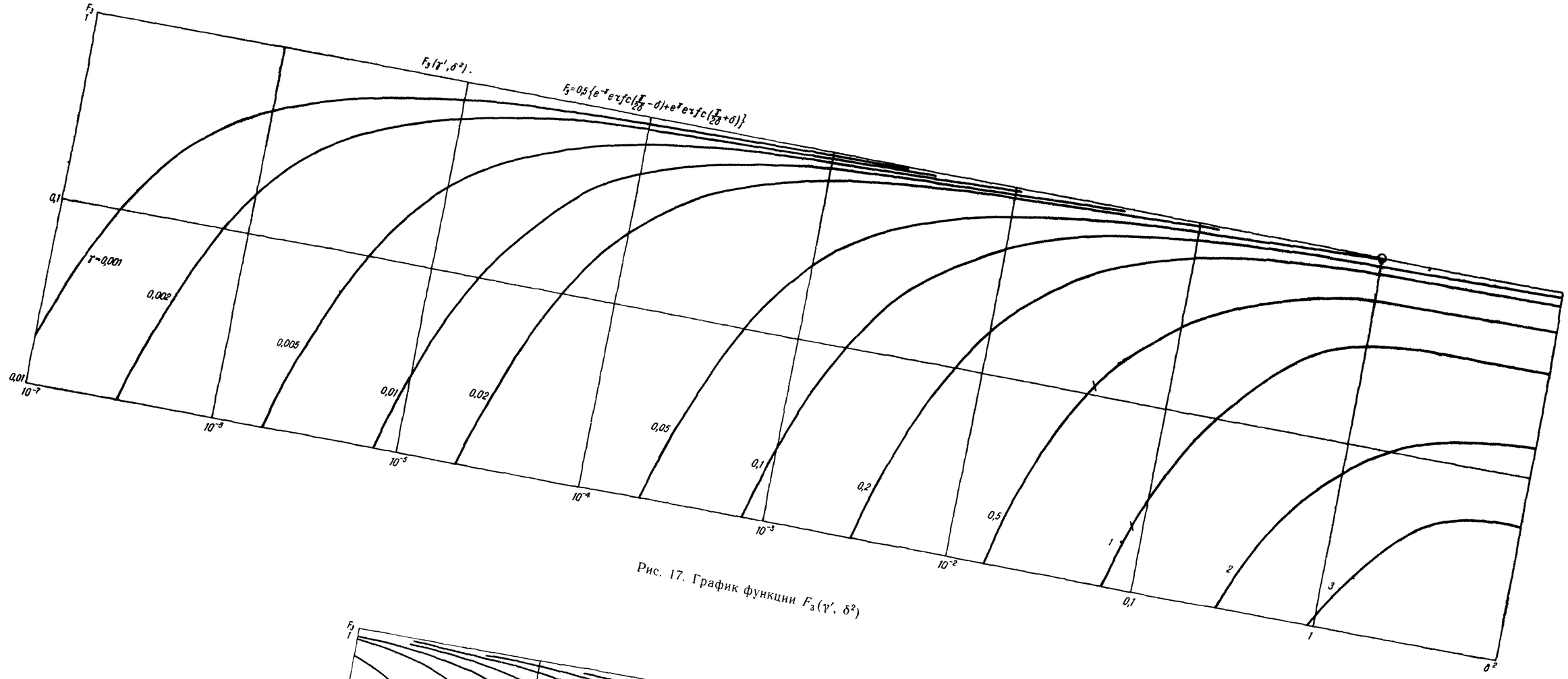


Рис. 17. График функции $F_3(\gamma', \delta^2)$

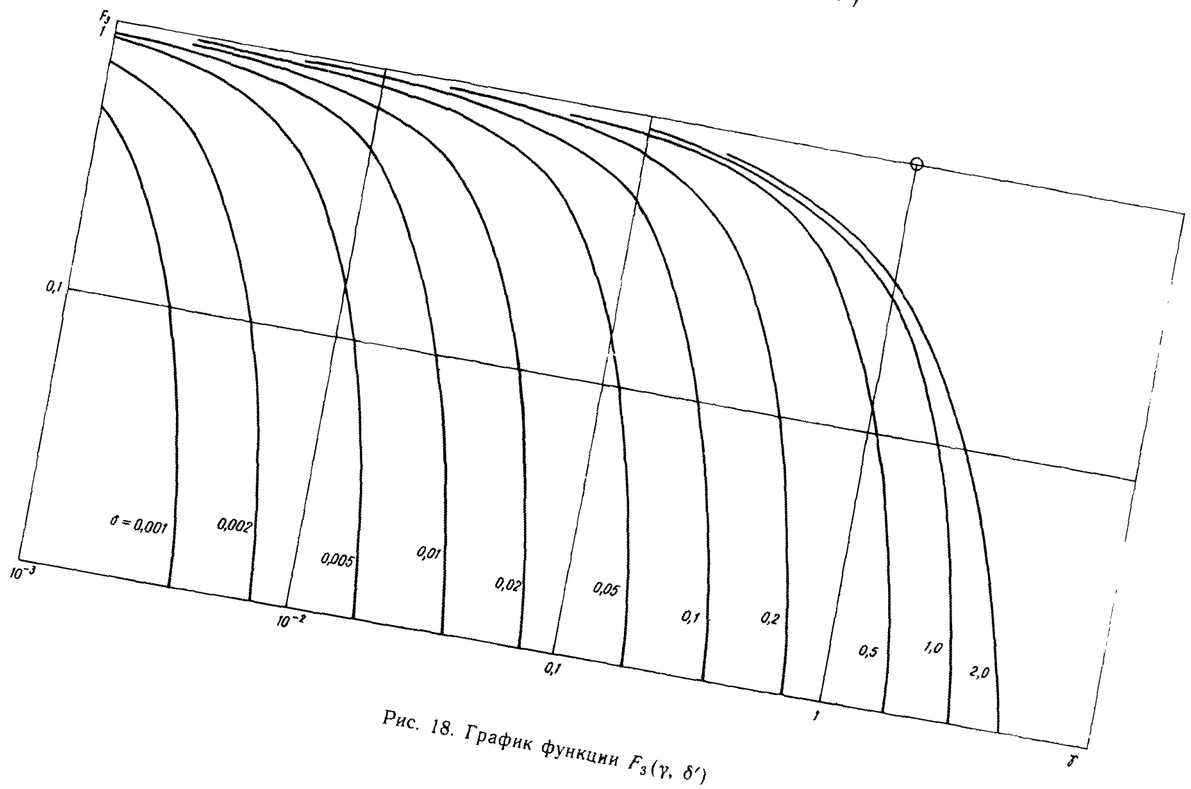


Рис. 18. График функции $F_3(\gamma, \delta')$

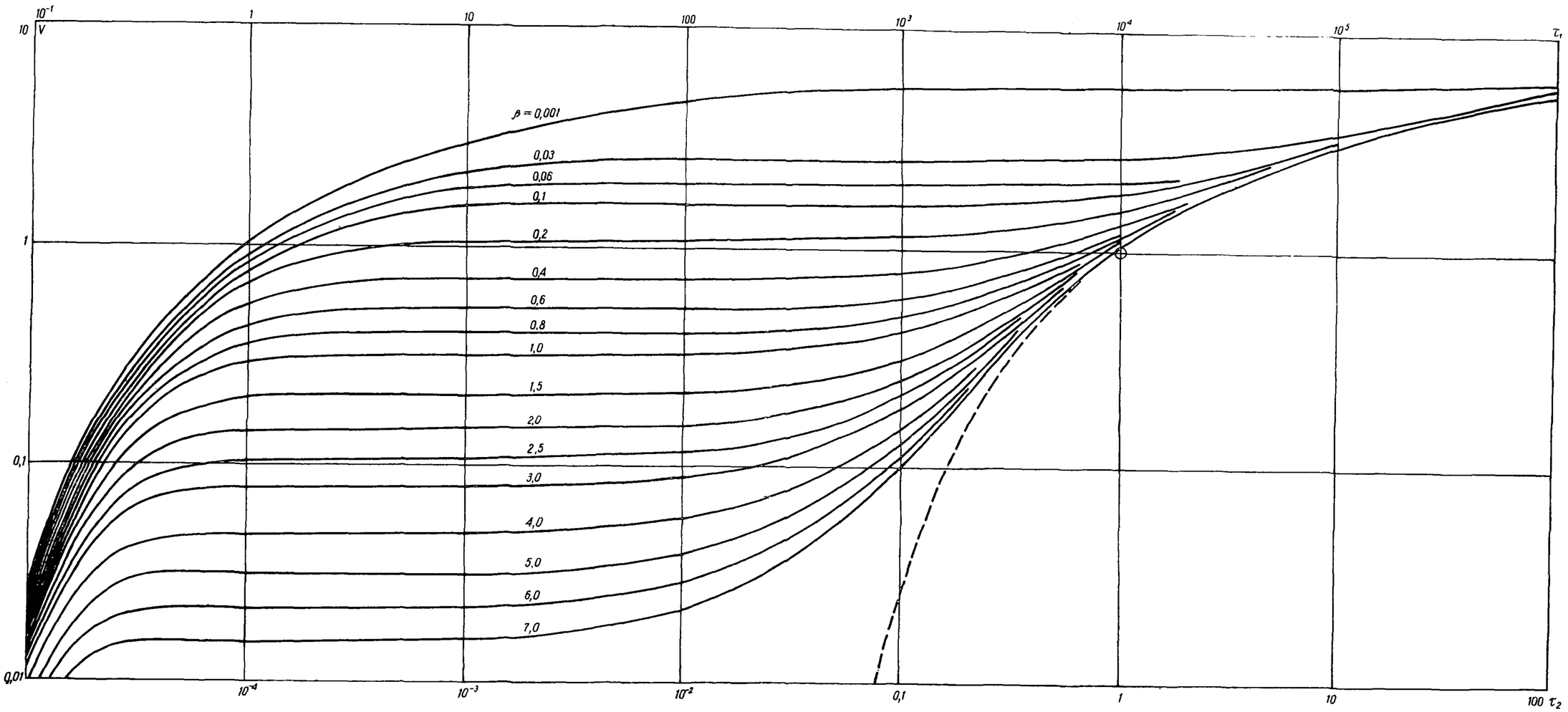


Рис. 19. График функции $V(\tau_1, \tau_2, \beta)$

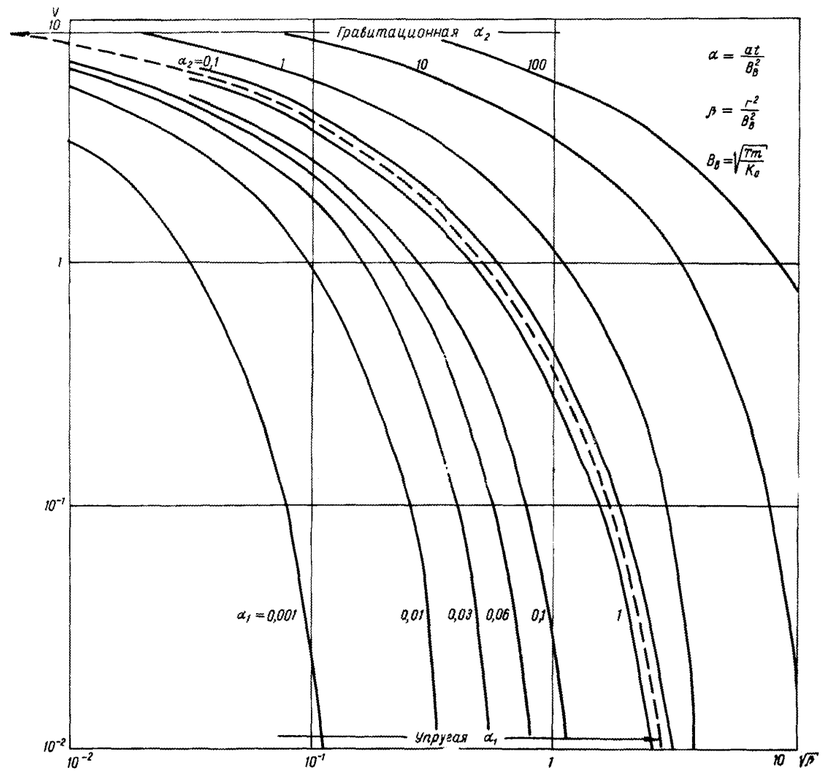


Рис. 20. График функции $V(\alpha', \sqrt{\beta})$

gost.e-ecolog.ru