

И. М. ГЕРШАНОВИЧ

**ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
В СКВАЖИНАХ  
МЕТОДОМ  
РАСХОДОМЕТРИИ**

И. М. ГЕРШАНОВИЧ

# ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ МЕТОДОМ РАСХОДОМЕТРИИ



МОСКВА «НЕДРА» 1981

**Гершанович И. М.** Гидрогеологические исследования в скважинах методом расходометрии М., Недра, 1981. 295 с

В монографии вопросы теории, методики и техники исследований гидрогеологических скважин по методу расходометрии рассматриваются с позиций современных достижений подземной гидродинамики, гидравлики, приборостроения и метрологии. Значительное место отведено проблеме прикладного использования результатов исследования при решении различных инженерных задач на стадии изысканий. Специально рассмотрены основные пути, обеспечивающие экономическую эффективность исследований скважин при рациональном использовании метода расходометрии.

Для научных работников, производственников-гидрогеологов и геофизиков

Табл. 17, ил. 67, список лит. — 159 назв.

Рецензенты:

д-р техн. наук

Ф. М. Боцвер,

канд. техн. наук В. С. Алексеев (ВНИИВодгео)

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Впервые использование дистанционного измерения расхода осевого потока воды по стволу скважины для изучения строения фильтрационного разреза было предложено в 1940 г. Н. А. Огильви. Метод был назван им «скоростной каротаж». Дальнейшее развитие и внедрение метода под названием «расходомертия гидрогеологических скважин» или «расходомертический каротаж» относится к концу 50-х — началу 60-х годов и связано с работами И. М. Гершановича, И. И. Гринбаума, М. С. Ровинского. За истекший период задачи теории и практики расходомертия гидрогеологических скважин решали также В. С. Алексеев, Э. А. Грикевич, А. М. Дерун, Э. Я. Кипко, Э. Д. Кузьменко, А. Д. Курманепко, О. Ю. Лушникова, А. А. Плетнев, И. И. Плотников, И. Г. Сквородников и др.

В данной работе излагаются современные научно-методические основы исследования гидрогеологических скважин с помощью глубинной расходомертии в зоне активного водообмена, где сосредоточены в настоящее время основные объемы поисково-разведочных гидрогеологических работ для хозяйственно-питьевого водоснабжения, мелиоративного строительства и осушения рудных полей. Эти объекты характеризуются существенной неоднородностью фильтрационных разрезов, знание которой в значительной мере определяет достоверность инженерных расчетов и прогнозов

Традиционными, как известно, являются две основные технологические схемы опытно-фильтрационного изучения пространственной изменчивости фильтрационных характеристик неоднородных толщ. Первая из них предусматривает исследование гидродинамического режима одиночных возмущающих скважин, а вторая — реагирующих (наблюдательных) скважин. Обе схемы в конечном счете сводятся к последовательному опробованию разреза так называемыми несовершенными по степени вскрытия скважинами.

При проведении исследований с помощью одиночных возмущающих скважин результаты количественного определения фильтрационных свойств оказываются недостаточно достоверными. Это объясняется существенным несоответствием физических моделей притока к реальным скважинам при возбуждении теоретическими моделями гидродинамически совершенных скважин. Радикальные способы устранения этого несоответствия пока отсутствуют.

При проведении исследований с помощью кустовых откачек достигается большее соответствие между реальными и теоретическими моделями фильтрации в зоне возмущения. Однако реализация такой технологической схемы для изучения вертикальной изменчивости фильтрационных свойств неоднородных водоносных горизонтов приводит к резкому ухудшению технико-экономических показателей изыскания. Поэтому в перспективе ее нельзя считать прогрессивной для этих целей.



Обе технологические схемы не рассчитаны на получение детализированных характеристик фильтрационного разреза и в практике работ используются в основном для сравнительной оценки достаточно мощных интервалов водоносной толщи.

В связи с поисками более эффективных методов изучения неоднородных разрезов в последнее десятилетие активно разрабатываются теория и технология гидродинамических исследований скважины на базе глубинной расходомерии. Опыт практического использования полностью подтвердил правильность избранного направления совершенствования гидрогеологических изысканий. Расходомерия гидрогеологических скважин позволила объединить технологические возможности каротажа с гидромеханическими принципами изучения водонасыщенных сред. Это выдвинуло ее в разряд прямых и функциональных методов каротажа и обеспечило ведущее положение в этом комплексе. На базе метода расходомерии по существу формируется новая технология опытно-фильтрационных работ в одиночных возмущающих и реагирующих скважинах опытных кустов. Она позволяет одновременно и совместно исследовать все водоносные пласты (зоны), вскрытые скважиной. Соответственно технологическая часть исследования предусматривает гидродинамическое возбуждение всего разреза скважины с помощью откачек или нагнетаний и наблюдение за реакцией различных его интервалов, выражающейся в закономерном изменении величин водопритоков или водопоглощений. Эти наблюдения осуществляются с помощью скважинных расходомеров.

Расходометрический каротаж на современном уровне теории и методологии данного вопроса естественно вошел в комплекс опытно-фильтрационных работ, при которых изучение вертикальной изменчивости фильтрационных характеристик является специальной задачей. В этом комплексе он обеспечивает вертикальную развертку фильтрационного разреза.

Следует отметить важное значение возможности использования контрольно-методических функций расходометрического каротажа. Исследования, выполняемые с этой целью, предусматривают повышение надежности других методов (гидродинамических, геофизических), играющих в данном эксперименте ведущую роль. Например, в случае нарушения гидроизоляции колонны центральной или наблюдательной скважины опытного куста, оборудованного на заданный горизонт, по данным расходомерии можно исправить исходные гидродинамические функции (дебит, понижение), исключив влияние помехи.

Перспективным направлением использования контрольно-методических возможностей расходомерии является обоснование методики количественной гидрогеологической интерпретации данных комплексных геофизических исследований пластов в затрубном пространстве или закольматированных в результате применения тяжелых буровых растворов. При гидрохимическом опробовании подземных вод в сложных условиях можно управлять методикой отбора проб и осуществлять пространственную привязку точек от-

бора с объектами опробования. Наконец, данные расходомерии могут быть использованы для объективной оценки эффективности различных конструкций фильтров скважин на воду. В практике известно также немало примеров, когда эффективно реализуются другие возможности расходометрического каротажа как средства технической диагностики скважин на воду.

Основная задача разведочной гидрогеологии состоит в выявлении количественных закономерностей движения подземных вод и обосновании расчетной фильтрационной схемы изучаемого объекта. Опыт использования данных расходомерии для этих целей еще недостаточен. Однако такие возможности несомненны.

В процессе работы автор сотрудничал с Ю. Н. Акуленко, В. М. Дядиченко, В. Н. Колосковой, Э. Д. Кузьменко, В. Ч. Ли, А. А. Плетневым, А. К. Приймачуком, М. С. Ровинским, Ю. М. Тимошенко. Некоторые результаты совместной работы использованы в книге. Автор считает своим долгом выразить им глубокую признательность. В работе над книгой учтены замечания и предложения Л. С. Язвина, В. М. Гольдберга, Н. А. Плотникова, В. А. Барона, В. Б. Боровского, Л. К. Гохберга. Автор искренне благодарит своих коллег.

## ГЛАВА I

# СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

### 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СКВАЖИН С ПОМОЩЬЮ ДИСТАНЦИОННЫХ МЕТОДОВ

Способы изучения различных свойств и характеристик геологических образований, находящихся на значительной глубине и не поддающихся непосредственному наблюдению, непрерывно пополняются различными средствами дистанционных исследований и измерений. Среди них дистанционные исследования в буровых скважинах представляют собой более или менее самостоятельную отрасль геологоразведочных работ, называемую обычно каротажом буровых скважин или просто каротажом. Понятие «каротаж» объединяет все виды измерений, осуществляемых в скважинах с помощью различных приборов и устройств

В общем случае методы и модификации каротажа гидрогеологических скважин можно разделить на три группы в зависимости от физической сущности используемых явлений и процессов, детерминирующих предпосылки для изучения различных гидрогеологических характеристик и показателей пород.

1. Методы каротажа, с помощью которых изучаются физические свойства горных пород и подземных вод. К этой группе, в частности, относятся: модификации каротажа по методу сопротивлений, диэлектрический и индукционный каротаж, метод вызванных потенциалов, модификации радиоактивного каротажа и др.

2. Методы каротажа, с помощью которых изучаются эффекты взаимодействия бурового раствора с горными породами. К этой группе, в частности, относятся: метод собственных потенциалов, модификации каротажа по методу сопротивлений для изучения ближней зоны (микрозондирование, метод двух растворов), метод активированной жидкости, метод искусственного теплового поля, профилометрия, коркометрия и др.

3. Методы каротажа, с помощью которых изучаются фильтрационные процессы в скважинах. К этой группе, в частности, относятся: модификации расходомерии, электролитический каротаж, термокаротаж работающей скважины и др.

Приведенная систематизация охватывает в общем виде основные целевые возможности применения дистанционных исследований в скважинах. При этом учтены изучение природного и приобретенного распределения физических свойств, а также явления, возникающие в результате взаимодействия пород-коллекторов с буровой жидкостью и скважиной.

На основе этой систематизации можно выбрать наиболее целесообразные методы для использования в конкретных условиях, определяемых совокупностью геолого-физических, гидрогеологических и горнотехнологических факторов.

В основу систематизации методов интерпретации данных каротажа при решении различных задач может быть положен принцип использования предпосылок, характеризующихся достигнутым уровнем знаний о зависимости между измеренными показателями и искомыми геологическими или гидрогеологическими характеристиками пород. Использование указанного принципа впервые было предложено С. Г. Комаровым [69] на основании анализа современных возможностей оценки коллекторских свойств пород нефтяных и газовых месторождений по данным геофизических исследований скважин. Расширив и несколько изменив положения, выдвинутые С. Г. Комаровым, ниже предлагается более общая систематизация методов интерпретации данных каротажа при решении различных геологических, гидрогеологических и технических задач исследования гидрогеологических скважин. В соответствии с ней все методы интерпретации (способы перехода от измеренных показателей к искомым характеристикам) можно разделить на три группы.

1. Прямые методы интерпретации соответствуют случаю, когда результат исследования скважины адекватно соответствует искомой характеристике. Примером могут служить: изучение трещиноватости пород по данным фотографирования стенок скважины с помощью скважинного фотоаппарата; определение температуры подземных вод по термокаротажу; выявление мест нарушения целостности колонны труб по данным расходомерии; уточнение конструкции скважины по данным кавернометрии и др. Разработка такого рода методов наиболее перспективна. Однако пока для каротажа гидрогеологических скважин применяется небольшое число подобных методов и потенциальные возможности их создания для широкого круга задач также ограничены.

2. Функциональные методы интерпретации соответствуют случаю, когда результаты исследования скважины связаны с искомой характеристикой функциональными зависимостями, полученными из теоретических соображений или экспериментальных исследований общего характера. Они имеют достаточное теоретическое обоснование для использования, несмотря на необходимость, в ряде случаев корректирования исходных зависимостей применительно к конкретным геологическим, гидрогеологическим и геолого-техническим условиям. Примером может служить метод оценки коэффициента фильтрации пород по данным расходомерии, скорости фильтрации подземных вод по данным резистивиметрии, пористости пород по данным акустического каротажа, минерализации пластовых вод по данным повторных ПС и др.

3. Эмпирические методы интерпретации. В результате теоретических изысканий в области основ многих методов каротажа (электрических, радиоактивных) получены функциональные зави-

симости между различными измеряемыми показателями и искомыми характеристиками пород. Для этого, как правило, реальная среда заменялась идеализированными моделями, в которых упрощались не только структурные элементы, но также и физические, химические процессы, протекающие в породе в естественных условиях или возбуждаемые при осуществлении соответствующих измерений (электрических, ядерных и др.). Реализовать полученные зависимости на практике часто либо невозможно, либо для этого требуется осуществление большого количества вспомогательных измерений, что существенно усложняет методику работ. Поэтому теоретические предпосылки используются в основном для обоснования принципиальной возможности решения задач по данным соответствующих измерений в скважинах, а практические приемы интерпретации осуществляют путем установления эмпирических зависимостей между измеренными показателями и искомыми характеристиками пород в конкретных условиях. Кроме того, в эту группу входят методы интерпретации, возможность использования которых установлена сопоставлением данных каротажа с результатами анализа керна и опробования скважин в конкретных условиях, руководствуясь соображениями общего характера или частным опытом работ.

В основе эмпирических методов интерпретации лежат корреляционные парные или многомерные зависимости. Обычно они могут в различных районах значительно различаться, поскольку в каждом отдельном случае существование связи и ее вид могут определяться различным сочетанием факторов (природных и технических). Использование методов этой группы возможно лишь в случае, когда по предварительным данным удастся получить надежные корреляционные зависимости.

К эмпирическим методам относятся метод определения литологических характеристик пород по комплексным каротажным исследованиям, метод оценки общей минерализации пластовых вод по электрическому сопротивлению пород, метод оценки глинистости пород по данным гамма-каротажа и др.

Группа эмпирических методов является наиболее обширной. Однако результаты использования во многих случаях являются недостаточно точными или спорными.

Из приведенной систематизации методов интерпретации данных каротажа очевидно, что прямые и функциональные методы являются более прогрессивными. Они характеризуются наибольшей надежностью и могут быть оперативно использованы практически с начала работ на месторождении или участке.

## **2. СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ СКВАЖИН В НЕОДНОРОДНЫХ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ РАЗРЕЗАХ ГОРНЫХ ПОРОД НА БАЗЕ ГЛУБИННОЙ РАСХОДОМЕТРИИ**

Исследования скважин с помощью глубинных измерителей расхода жидкости к концу 50-х годов начали успешно применяться в геологоразведочных и нефтепромысловых работах в СССР и

США. Об этом свидетельствуют патентные материалы и публикации об отечественных достижениях [1, 28, 46, 93, 113, 114, 117] и зарубежных разработках [97, 122, 146, 155, 156, 159]. Основное направление разработок и использования метода на ранних этапах касалось возможности выявления интервалов поглощения промысловой жидкости при бурении скважин и контроля качества вскрытия продуктивных горизонтов.

Конец 50-х — начало 60-х годов у нас в стране и за рубежом характеризуется резким возрастанием интереса к развитию и производственному использованию гидродинамических методов исследования скважин на базе глубинных измерений дебитов (расходомерии).

В нефтепромысловой отрасли это было связано с переходом к разработке многопластовых нефтеносных залежей и внедрением прогрессивных методов добычи нефти с поддержанием пластового давления и использованием вытесняющих агентов.

В гидрогеологической отрасли резко возрос объем поисковых и разведочных работ на подземные воды с целью обеспечения крупных городов, промышленных и сельскохозяйственных объектов гарантированными эксплуатационными запасами. Такие работы осуществляются в различных природных геологических и гидрогеологических условиях. Гидродинамические исследования скважин на базе глубинной расходомерии были направлены на получение информации с целью:

а) повышения достоверности расчетных гидродинамических схем разведываемых месторождений на основе более полного изучения пространственной изменчивости фильтрационных свойств водоносных горизонтов в зоне активного водообмена;

б) выбора оптимальных режимов эксплуатации скважин на воду на основе объективных данных об эффективной мощности эксплуатируемого горизонта;

в) более полного учета источников и условий формирования естественных ресурсов и эксплуатационных запасов подземных вод в сложных гидрогеологических условиях;

г) управления поисковыми и разведочными работами для выбора проектных глубин бурения скважин и интервалов опробования разреза и др.

Выделим основные проблемы современной технологии гидродинамических исследований скважин на базе глубинной расходомерии.

I. Теория фильтрации жидкости в неоднородной геологической системе как основа для постановки исследования и создания методики послойных гидродинамических расчетов.

II. Гидромеханика водопритока в скважину с произвольно распределенными по глубине гидравлическими характеристиками как основа создания методики рафинирования результатов исследования реальных скважин путем выделения функции скин-эффекта

III. Техника и метрология глубинной расходомерии как основа реализации исследования.

Обсудим кратко состояние этих проблем.

I. Задачи теории фильтрации жидкости к скважине на современном этапе применения метода в нефтепромысловых исследованиях рассматриваются на основе уравнения теплопроводности в плоскорадиальной постановке. Гидродинамический режим пласта в общем виде описывается интегралом Дюамеля при различных начальных и граничных условиях его работы [77, 78, 86, 127, 128]. По принципу индукции этот вывод распространен на работу многопластовой системы, вскрытой совершенной скважиной, и используется в качестве основы для раздельных расчетов гидродинамических параметров пластов на базе глубинных измерений дебитов.

В приводимых ниже описаниях исследований проблемы притока из неоднородной среды мы посчитали уместным прибегнуть к более общей гидродинамической схематизации фильтрационных разрезов. В соответствии с ней все многообразие природных фильтрационных разрезов представлено в виде двух моделей: разрезы, состоящие из отдельных гидравлически изолированных друг от друга квазиоднородных пластов (макропотoki первого порядка), и разрезы, состоящие из однородных слоев различной проницаемости, свободно контактирующие друг с другом (макропотoki второго порядка). На современном этапе рассмотрения фильтрационных задач для этих двух моделей поток также считается плоско-радиальным. Эта условность является вынужденной. Она обосновывается, во-первых, невозможностью учета перетекания в обратных задачах расходомерии на основе имеющихся экспериментальных данных, и, во-вторых, принципами оценки гидродинамического несовершенства скважины дискретно для каждого слоя (предполагая однородность каждого из них и изолированность от остальных).

Решения для названных моделей выполнены при условии их вскрытия гидродинамически совершенной скважиной и скважиной с распределенными по ее глубине гидравлическими сопротивлениями, обусловленными скин-эффектом. В итоге получено, что гидродинамический режим различных элементов возбуждаемой водоносной системы в общем виде также описывается интегралом Дюамеля. Однако по существу важно, что постановка задачи и ее решение близко соответствуют современным возможностям обобщаемой технологии опытно-фильтрационного исследования и объектам исследования.

Решению обратных задач теории фильтрации в многопластовых системах на базе глубинных измерений дебитов и давлений посвящено большое число разработок, ориентированных на использование при различных вариантах исследования нефтяных и нагнетательных скважин [16, 24, 26, 129]. Эти наиболее ранние разработки активизировали научные поиски с аналогичными целями в сфере гидрогеологического производства. В основе большей части способов интерпретации данных гидродинамических исследований совместно испытываемых пластов в нефтяных и нагнетательных

скважинах используется аппроксимация экспериментальных функций дебита и давления достаточно простыми расчетными математическими выражениями. Они получены на основе решения уравнения теплопроводности при различных вариантах задания начальных и граничных условий, соответствующих методическому варианту исследования. Многие из предложенных расчетных формул могут быть применены также для анализа данных гидродинамических исследований гидрогеологических скважин на базе глубинной расходомерии при соответствующих им схемах работы скважины и пластов. Из числа наиболее общих и удачных решений можно выделить способ обработки данных гидродинамических исследований, предложенный в работе [86].

Большая часть современных методов исследования эксплуатационных и нагнетательных скважин нефтяных месторождений в многопластовых системах основана на совместном анализе функции давления и продолжающегося притока после их остановки. Для исследования гидрогеологических скважин в большинстве случаев они малоперспективны. Объясняется это небольшими величинами понижений при откачках из разведочных скважин и соответственно небольшими величинами продолжающегося притока по сравнению с дебитом работающей скважины. Таким образом, функции продолжающегося притока оказываются в пределах погрешности измерения. Поэтому в основных методических вариантах исследования скважин в гидрогеологической отрасли используется возбуждение системы откачкой. Применительно к этим условиям была разработана обратная задача. С этой целью использован прием аппроксимации экспериментальных функций дебита и давления системой линейных уравнений для дискретных моментов времени с начала возбуждения. Матрица коэффициентов в таких уравнениях определяет реакцию пласта (понижения) на приложенное единичное возбуждение. Полученное решение в известном смысле является универсальным для различных режимов задания возбуждения и методических схем исследования. Удобно также, что в итоге получают преобразованную функцию давления, описываемую уравнением Тейса, способ решения и анализа которого является традиционным при гидрогеологических исследованиях скважин.

Несмотря на отмеченные выше различия в методах интерпретации экспериментальных данных, правомерно считать, что разработки обратных задач гидродинамических исследований нефтяных и гидрогеологических скважин в научном плане рационально взаимодополняются, а в практическом — отвечают специфике тех отраслей, для которых они разработаны.

II. Требование соответствия оцениваемых гидродинамических параметров пластов истинным параметрам стимулировало дальнейшее совершенствование гидромеханической теории водопритока и методики интерпретации, учитывающих несовершенство реальных скважин, вскрывающих неоднородную по фильтрационным свойствам толщу. Несовершенство реальных скважин, как извест-



но, определяется величиной скин-эффекта, равной сумме гидравлических сопротивлений прискважинной зоны.

Изучением влияния скин-эффекта на точность гидродинамических расчетов исследователи занимались давно. Теоретически и экспериментально показана необходимость его оценки и учета [102]. Разрабатываются также различные технологические приемы опытно-фильтрационных исследований водоносных горизонтов, позволяющие существенно снизить или исключить его влияние. Такова, например, методика исследования водоносных горизонтов с помощью наблюдательных скважин [17, 18, 83]. Осуществляются разработки различных эмпирических приемов оценки сопротивления фильтров на основании сведений о конструкции скважины и ее дебите [102]. Предлагается учитывать влияние скин-эффекта на величину эффективного радиуса скважины путем введения эмпирически установленных поправочных коэффициентов, выявленных в результате гидродинамических исследований на участке [74]. Известны теоретические исследования гидродинамического режима для модели однородного пласта с кольцевой зоной вокруг скважины, на основании которых выявлены условия, когда влияние скин-эффекта не сказывается на результатах оценки его параметров [26].

В связи с разработкой методологии расходометрического исследования многопластовых систем повысился интерес к проблеме скин-эффекта, так как в данном случае его необходимо рассматривать как функцию глубины скважины. Для учета доли потерь напора в стволе скважины в связи с трением и другими факторами, влияющими на величину забойного давления, воздействующего на пласт, разрабатываются различные конструкции глубинных манометров \*. Вопрос о способах оценки сопротивления призабойной зоны по существу остается нерешенным. При этом задача состоит в разработке способов его оценки *in situ* в процессе производства гидродинамических исследований, аналитического представления его в параметрах работающей скважины и учета в качестве функционального члена уравнений, описывающих гидродинамический режим оцениваемых пластов неоднородной системы.

Исследованию влияния сопротивления прискважинной зоны (в частности, фильтров) на распределение притоков по ее длине посвящен ряд работ [25, 47, 99, 154]. Эти разработки выполнялись в основном для определения оптимальных условий работы водозаборных скважин и получения критериев сравнительной эффективности различных конструкций водоприемной части. В основе получения гидромеханического решения функции водопритока использовано уравнение Мещерского для движения с переменной массой. Этот путь оказался весьма плодотворным, так как позво-

---

\* Разработка глубинных манометров в СССР ведется пока исключительно для использования при исследовании эксплуатационных и нагнетательных скважин на промыслах с соответствующими этим условиям пределами измерения, чувствительностью и точностью.

лил достаточно наглядно представить механику работы фильтров. Однако в рассмотренных моделях работающих фильтров принималось, что давление в зафильтровом пространстве является величиной постоянной, не зависящей от глубины. Такое условие обычно принимается в расчетах гидротехнических сооружений, водопроводных сетей и др., где уравнение Мещерского используется достаточно широко.

Применительно к работе фильтров буровых скважин, плотно контактирующих с фильтрующей средой, подобная схематизация является достаточно грубой, так как она игнорирует факт формирования существенно трехмерного потока в близфильтровой зоне и нарушает условие неразрывности потока на границе фильтр — порода. Поэтому полученные решения для оценки сопротивления фильтра на основе рассмотрения такой физической модели оказываются пригодными только для сравнительной характеристики эффективности фильтров разных конструкций в одной породе, что и предусматривалось отмеченными выше работами. Особенно удобными для этой цели оказались расчетные формулы, предложенные в работе [47].

Однако несмотря на узкоприкладной характер этих работ, они сыграли важную роль в дальнейшем развитии теории расходомерии и разработке более совершенных методических приемов анализа экспериментальных данных для изучения поинтервальной проницаемости неоднородных разрезов. Это нашло отражение в работах ряда исследователей [3, 4, 54], пытавшихся применить положения работы [47] к анализу притока в реальных скважинах. Однако эти попытки успеха не имели; причиной неудачи явилось формальное применение предложенных решений для указанной физической модели к условиям работы реальной скважины. Различными оказались и цели исследования. В последнем случае они предусматривали оценку сопротивления фильтра в условиях его контакта с реальной средой. Используемые формулы фактически не учитывают фильтрующую среду.

Таким образом, задача состояла в необходимости более полного обоснования физической модели фильтрации воды через фильтр, получения для нее решения прямой задачи и разработки методики решения обратной задачи на основе анализа экспериментальной функции водопритока. Представляется, что такой путь является наиболее перспективным, так как он создает основу для функционального решения проблемы скин-эффекта. Решение этой задачи для физической модели, более соответствующей реальности, приводится ниже. На основе оценок скин-эффекта получены формулы для поинтервальных расчетов фильтрационных параметров неоднородных водоносных горизонтов, свободных от влияния призабойной зоны. Полученные решения прямой задачи и расчетные формулы также являются приближенными. Теперь поставлена задача экспериментального обоснования точности полученных расчетных формул и формализации процесса интерпретации расходограмм для использования ЦВМ. Полученный алгоритм решения

обратной задачи позволяет осуществить это достаточно просто.

III. Основой обсуждаемой технологии опытно-фильтрационных исследований многопластовых систем является применение глубинных измерителей расхода потока жидкости по стволу скважины. При разработке конструкций глубинных измерителей и их метрологии наиболее четко проявилась направленность в связи с областью применения. В частности, для использования в нефтепромысловых исследованиях определилось два направления разработок: для эксплуатационных и нагнетательных скважин. Различие между ними диктовалось характером работы пластов (приточных или поглощающих) и направлением потока жидкости по стволу скважины. Приборы, чувствительные к восходящему потоку жидкости, получили название дебитометров, приборы, чувствительные к нисходящему потоку жидкости, — расходомеров. В соответствии с названием приборов-измерителей объемной скорости потока жидкости по стволу возникли названия методов исследования: дебитометрия и расходометрия. Создаются также приборы, одинаково чувствительные к восходящему и нисходящему потокам жидкости, получившие название дебитометров — расходомеров.

Гидрогеологические скважины в отличие от эксплуатационных и нагнетательных скважин на нефтепромыслах часто характеризуются наличием спонтанных перетоков воды различного направления. Нередки случаи, особенно в горизонтах трещинно-карстовых пород, когда одновременно в разных интервалах скважины наблюдается переток воды в противоположных направлениях. Наличие подобного характера взаимодействия водоносных пластов как в неработающих, так и в работающих и реагирующих скважинах исключило возможность использования приборов одностороннего действия, а также потребовало большей определенности в названии самого вида исследования. Поскольку предметом исследования являются функции объемного расхода жидкости по глубине скважины при различных вариантах возбуждения системы, в этой отрасли геологоразведочных работ метод получил название расходометрии скважины, отражая тем самым первооснову исходной информации. Направление потока жидкости по стволу учитывается в знаке вектор-функции расхода, что обеспечивает унификацию написания расчетных формул.

Конструктивные решения измерителей расхода жидкости по стволу скважины характеризуются очень большим разнообразием. Достаточно полные сведения о приборах, применявшихся на нефтепромыслах в разное время, приведены в работах [93, 94, 95]. Для исследования гидрогеологических скважин также был осуществлен ряд разработок [40, 43, 56, 57]. Важным, однако, является различие не конструктивных решений измерительной аппаратуры, а метрологических требований к этому виду измерений в двух сопоставленных отраслях проведения исследований. Эти требования определяются условиями работы приборов, диапазоном измеряемых величин, а также воздействием измерительного устройства на измеряемую среду. Например, для условий исследова-

ния нефтепромысловых скважин влияние на ход гидродинамического процесса такого фактора, как гидравлические потери на измерительном устройстве при имеющих место величинах градиента давления и расхода потока, во многих случаях можно считать несущественным и использовать в конструкции различные пакерующие элементы. В связи с оценкой скин-эффекта по форме расходограммы стал существенным вопрос о выборе режима измерений с заданной предельной погрешностью и обеспечении условия нейтральности измерительного устройства по отношению к функции распределения водопритока. Это потребовало функциональной разработки метрологии глубинных расходомеров. В число задач метрологического обоснования вошло определение инструментальных и методических погрешностей беспакерных расходомеров, выбор режимов измерения для получения результата с обусловленной погрешностью, выбор типоразмера и конструкции расходомера для обеспечения нейтральности измерительного устройства по отношению к объекту измерения.

Отдельные вопросы метрологии скважинных измерений с помощью расходомеров без пакера рассматривались в ряде работ [53, 89]. Однако эти разработки носили фрагментарный характер и не учитывали главного: расходомер как измерительное средство является составной частью общей измерительной системы и потому его метрологические параметры должны рассматриваться и обосновываться в связи с параметрами исследуемого явления и мерой воздействия на это явление. Руководствуясь вышеизложенными положениями, нами были проведены соответствующие исследования. По совокупности рассмотренных взаимосвязанных задач они, видимо, могут быть использованы в качестве основы для метрологического обоснования различных конструкций расходомеров, предназначенных для гидродинамических исследований.

Рассмотренные проблемы не исчерпывают содержания и перспектив расходометрии. Важным разделом использования метода является его рациональное комплексирование с другими видами исследований гидрогеологических скважин в различных природных и технологических условиях. В частности, комплексирование расходометрии с методами электро- и радиоактивного каротажа открывает возможность исследования разрезов скважин, имеющих конструкцию, несовершенную по степени вскрытия водоносных пластов, и с существенными осложнениями в призабойной зоне. В этом комплексе результаты расходометрии по части пластопересечений могут быть использованы в качестве опорных для обоснования методики качественной и количественной интерпретации данных других методов, относящихся к эмпирическим. На основе интерпретации результатов этих методов проводится оценка закрытых или закольматированных пластов. В этом направлении исследования только начинаются.

В последние годы данные расходометрии эффективно используются при обосновании фильтрационных схем месторождений и определении некоторых расчетных параметров [39, 54, 61].

## ВЫВОДЫ

1. Перспективы увеличения эффективности каротажа гидрогеологических скважин связаны с дальнейшим развитием прямых и функциональных методов, к которым, в частности, относится метод расходомеррии.

2. Расходометрический каротаж является частью комплексных исследований в скважинах. Он предназначен для дифференциации фильтрационных разрезов, а также для осуществления контрольно-методических функций при комплексных гидрогеологических и геофизических работах.

3. Теоретической основой расходометрического каротажа являются закономерности фильтрации подземных вод в горных породах. На современном этапе принимается схема плоскорадиальной фильтрации в слоистых разрезах, полностью открытых в скважине при осуществлении гидродинамических исследований. Задачей теоретического обоснования расходомеррии является выявление основных закономерностей формирования гидродинамического режима пластов в связи с их совместным возбуждением.

4. Одновременное исследование различных слоев выдвинуло необходимость дифференцированной оценки гидродинамического несовершенства скважин. Задачей исследования является дальнейшее усовершенствование гидромеханической теории водопритока. Перспективным направлением является применение законов движения переменной массы к формированию функции водопритока.

5. Метрологическое обоснование расходометрических исследований включает системное рассмотрение внутренних и внешних погрешностей, степени гидравлического воздействия измерительного устройства на изучаемый процесс, а также приемов управления ими. Соблюдение метрологических требований является неотъемлемой частью методики работ.

## ГЛАВА II

# ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ СОВЕРШЕННОЙ СКВАЖИНЫ, ЗАЛОЖЕННОЙ В НЕОДНОРОДНОЙ ВОДОНАСЫЩЕННОЙ СРЕДЕ

### 1. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ НЕРАБОТАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Использование расходомерии для исследования сложных водоносных систем требует рассмотрения характера протекания гидродинамического процесса во взаимодействующих пластах в результате соединения их скважиной. Первоочередной задачей здесь является исследование процесса формирования режима перетока и равновесного уровня воды в скважине после вскрытия водоносной системы, что имеет конкретное объяснение.

Предполагается, что при существующих методах исследования скважин и пластов, использующих гидродинамическое возбуждение, начальный режим (до возбуждения) соответствует установившемуся. То же принимается при исследовании методом расходомерии, т. е. считается, что возмущение пластов, вызванное соединением их при бурении, достигает установившегося состояния. Поэтому перед исследованием скважин, вскрывших сложную водоносную систему с различными приведенными напорами в различных макропотоках, возникает вопрос: как скоро после вскрытия водоносной системы можно считать законченным процесс установления перетекания воды по скважине с точностью, достаточной для применения гидродинамических решений, использующих в начальных условиях установившийся режим. Иными словами, необходимо изучить, как быстро устанавливается дебит перетока и уровень гидродинамического равновесия в появившемся окне между водоносными пластами.

Рассмотрим эту задачу в упрощенной постановке применительно к макропотокам первого порядка. Предположим, что гидродинамически совершенная скважина с радиусом  $r_0$  мгновенно вскрывает систему из двух водоносных пластов, разделенных непроницаемым слоем, с первоначальными статическими уровнями соответственно  $H_1$  и  $H_2$ . После вскрытия этих пластов начинается процесс перетекания воды по скважине в направлении выравнивания напоров. Очевидно, что интенсивность этого процесса является функцией времени. Требуется определить понижение уровня

---

\* Для автоматического учета этого этапа работы скважины можно было бы воспользоваться решением [76, 152] для водопритоков в совершенную скважину из системы двух водоносных пластов, разделенных непроницаемым слоем, в котором учтено наложение возмущения, вызванного соединением этих пластов при бурении. Однако возможность практического использования этого решения ограничивается принятой моделью строения водоносного комплекса и заданной схемой работы скважины.

$S_{01}(r, t)$  и  $S_{02}(r, t)$  в каждом пласте в любой точке  $r$  в любой момент времени  $t$  после вскрытия системы, а также функцию дебита перетекания между соединенными пластами. Далее нужно исследовать условия, при которых с необходимой точностью можно считать процесс формирования равновесного уровня и дебита

перетока установившимся. Схема взаимодействия двух пластов в неработающей скважине показана на рис. 1.

Снижение давления (понижение) в каждом пласте должно удовлетворять уравнению теплопроводности, которое при осевой симметрии в цилиндрической системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S_{0j}(r, t)}{\partial r} \right) = \\ = \frac{1}{a_j} \frac{\partial S_{0j}(r, t)}{\partial t}, \quad (\text{II.1}) \end{aligned}$$

где  $j=1,2$ ;

$S_{0j}(r, t) = h_{0j}(r, t) - H_j$  — понижение уровня;  $a_j = (km)_j / \mu_j^*$  — коэффициент пьезопроводности;  $(km)_j$  и  $\mu_j^*$  — водопроницаемость и водоотдача соответствующего пласта;  $h_0(r, t)$  — функция динамического уровня для напорного пласта. В качестве плоскости сравнения для отсчета глубин уровней принята поверхность земли

Решение уравнения (II.1) будем искать при следующих начальных и граничных условиях:

при  $t=0$

$$\left. \begin{aligned} r = r_0, \quad Q_{01} = Q_{02} = 0; \\ r_0 \leq r \leq \infty, \quad S_{01} = S_{02} = 0, \quad H_1 - H_2 = C = \text{const} \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.2})$$

при  $t > 0$

$$\left. \begin{aligned} r = r_0, \quad S_{01} - S_{02} = -C = \text{const}, \quad (km)_1 \frac{\partial S_{01}}{\partial r} + (km)_2 \frac{\partial S_{02}}{\partial r} = 0, \\ r = \infty, \quad \frac{\partial S_{01}}{\partial r} = \frac{\partial S_{02}}{\partial r} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.3})^*$$

Индекс «0» при  $S$  и  $Q$  обозначает условия взаимодействия пластов в неработающей скважине. Если  $r=r_0$ , то  $h_{01}(r_0, t) = h_{02}(r_0, t)$ , что соответствует функции равнодействующего уровня воды в скважине.

Условие (II.3) предполагает также пренебрежение объемом скважины

Для решения уравнения (II.1) перейдем от функции  $S_{0j}(r, t)$  к ее интегральному преобразованию по Лапласу [58]

$$\bar{S}_{0j} = \int_0^{\infty} S_{0j}(r, t) e^{-pt} dt, \quad (\text{II.4})$$

где  $\bar{S}_{0j}$  — изображение оригинала  $S_{0j}(r, t)$ ;  $p$  — параметр преобразования.

Умножая (II.1) на  $e^{-pt}$  и интегрируя, получим, что  $\bar{S}_{0j}(r, p)$  должно удовлетворять уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \bar{S}_{0j}(r, p)}{\partial r} \right) = \frac{p}{a_j} \bar{S}_{0j}(r, p). \quad (\text{II.5})$$

Решение уравнения (II.5) в области изображений дается в виде [24, 84]

$$\bar{S}_{0j} = A_j I_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right) + B_j K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right), \quad (\text{II.6})$$

где  $A_j$  и  $B_j$  — постоянные коэффициенты относительно  $r$ ;  $I_0$  и  $K_0$  — модифицированные функции Бесселя соответственно первого и второго рода от мнимого аргумента нулевого порядка.

Чтобы удовлетворить условие  $\frac{\partial S_{01}}{\partial r} = \frac{\partial S_{02}}{\partial r} = 0$  на границе  $r = \infty$ , необходимо принять  $A = 0$ , так как при  $r = \infty$  функции  $I_0(\sigma)$  и  $\frac{\partial I_0(\sigma)}{\partial \sigma}$  стремятся к бесконечности. Тогда уравнение (II.6) соответственно для первого и второго пластов перепишется в виде

$$\bar{S}_{0j} = B_j K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right). \quad (\text{II.7})$$

Дебит взаимодействующих пластов для  $r = r_0$  при  $t > 0$  определяется выражением

$$2\pi (km)_j r_0 \frac{\partial S_{0j}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -Q_{0j}, \quad (\text{II.8})$$

где  $Q_{0j}$  — функция дебита перетекания воды по скважине из одного пласта в другой,  $Q_{0j} = Q_{0j}(r_0, t)$ . В зависимости от характера работы пласта  $Q_{0j}$  может иметь знак плюс (приток) или минус (поглощение).

Выражение (II.8) в изображениях имеет вид

$$2\pi (km)_j r_0 \frac{\partial \bar{S}_{0j}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -\bar{Q}_{0j}, \quad (\text{II.9})$$

где  $\bar{Q}_{0j}$  — изображение оригинала  $Q_{0j}(r_0, t)$ .

С учетом (II.7) получим соответственно для каждого пласта при  $r = r_0$



$$2\pi (km)_j r_0 \frac{\partial \bar{S}_{0j}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = -2\pi (km)_j r_0 B_j \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right) = -\bar{Q}_{0j}. \quad (\text{II.10})$$

Откуда

$$B_j = \frac{\bar{Q}_{0j}}{2\pi (km)_j r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}, \quad (\text{II.11})$$

где  $K_1$  — обозначение модифицированной функции Бесселя второго рода от мнимого аргумента первого порядка.

Таким образом, решение (II.7) в изображениях будет иметь вид

$$\bar{S}_{0j} = \frac{\bar{Q}_{0j} K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}{2\pi (km)_j r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}. \quad (\text{II.12})$$

Решение рассматриваемой задачи предусматривает прежде всего методические цели. Поэтому полученное выражение можно упростить, используя асимптотическое представление функции  $K_1$  для малых значений аргумента, как это обычно осуществляется в решениях фильтрационных задач такого типа [23, 26, 143]. На этом основании принимаем

$$K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right) \simeq \frac{1}{r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}}}. \quad (\text{II.13})$$

С учетом этого

$$\bar{S}_{0j} \simeq \frac{\bar{Q}_{0j} K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}{2\pi (km)_j}. \quad (\text{II.14})$$

Переход от изображения  $\bar{S}_{0j}$  к оригиналу  $S_{0j}(r, t)$  в уравнении (II.14), осуществленный по табличным соотношениям [59, 64, 75], приводит к известному уравнению для линейного источника [23, 126]

$$S_{0j}(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t Q_{0j}(r_0, \tau) \frac{e^{-\frac{r^2}{4a_j(t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau. \quad (\text{II.15})$$

Обозначим

$$\frac{e^{-\frac{r^2}{4a_j(t-\tau)}}}{t-\tau} = w_j(r, t-\tau), \quad (\text{II.16})$$

$$\int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4a_j(t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau = \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4a_j t} \right) \right]. \quad (\text{II.17})$$

В результате приходим к описанию функции  $S_{0j}(r, t)$  в виде интеграла Дюамеля

$$S_{0j}(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \omega_j(r, t-\tau) Q_{0j}(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.18})$$

В общем случае ядро  $\omega_j(r, t-\tau)$  зависит от геометрии пласта и условий на его границах. В случае однородного безграничного пласта без учета объема скважины оно выражается в виде (II.16).

Интеграл  $\int_0^t \omega_j(r, t-\tau) d\tau$ , в виде (II.17), представляет собой «отклик» в изменении напора при возбуждении пласта с пикообразным единичным дебитом\*.

Полученное уравнение устанавливает связь между дебитом и понижением уровня для каждого пласта, однако не дает еще ответа на поставленный вопрос, поскольку в нем не раскрыто содержание функции  $Q_{0j}$ . Поэтому вернемся к уравнениям (II.7). Запишем частные производные по  $r$

$$\frac{\partial \bar{S}_{0j}}{\partial r} = -B_j \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right). \quad (\text{II.19})$$

Коэффициенты  $B_j$  найдем из граничных условий (II.3), записанных для изображений

$$\left. \begin{aligned} B_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - B_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) &= -\frac{C}{p}; \\ (km)_1 B_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) + (km)_2 B_2 \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.20})$$

После подстановки полученных величин в уравнения (II.7) будем иметь

$$\bar{S}_{01} = \frac{-\frac{C}{p} (km)_2 \sqrt{\frac{1}{a_2}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{(km)_2 \sqrt{\frac{1}{a_2}} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_1 \times} \times \sqrt{\frac{1}{a_1}} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \quad \left| \right.$$

\* Уравнение (II.18) справедливо и для случая  $n > 2$  пластов в системе. В этом нетрудно убедиться из рассмотрения использованных начальных и граничных условий.

$$\bar{S}_{02} = \frac{\frac{C}{p} (km)_1 \sqrt{\frac{1}{a_1}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right)}{(km)_2 \sqrt{\frac{1}{a_2}} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_1 \sqrt{\frac{1}{a_1}} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)} \quad (II.21)$$

Воспользовавшись приближенным выражением функции  $K_1$  в виде (II.13) при малых значениях аргумента и осуществив ряд алгебраических преобразований, приходим к следующим выражениям для  $\bar{S}_{01}$  и  $\bar{S}_{02}$ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{01} &= - \frac{(km)_2 CK_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{KM p K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)}; \\ \bar{S}_{02} &= \frac{(km)_1 CK_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right)}{KM p K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)}, \end{aligned} \right\} \quad (II.22)$$

где

$$\theta = \frac{(km)_1}{(km)_2}, \quad \lambda = \sqrt{\frac{a_1}{a_2}}, \quad KM = (km)_1 + (km)_2.$$

Задача нахождения оригинала типа (II.22) решена в работе [23]. Воспользовавшись этим, получаем уравнения для функции понижения во взаимодействующих пластах:

$$\left. \begin{aligned} S_{01}(r, t) &= - \frac{(km)_2 (H_1 - H_2)}{KM} R_{\text{II}}; \\ S_{02}(r, t) &= \frac{(km)_1 (H_1 - H_2)}{KM} R_{\text{II}}, \end{aligned} \right\} \quad (II.23)$$

где

$$R_{\text{II}} = 1 + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} e^{-\alpha_j^2 t} \frac{J_0(\alpha_j) N_0(\bar{r}_{0j}^* \alpha_j) - N_0(\alpha_j) J_0(\bar{r}_{0j}^* \alpha_j)}{J_0^2(\alpha_j) + N_0^2(\alpha_j)} \cdot \frac{d\alpha_j}{\alpha_j}.$$

Функция  $R_{\text{II}}$  подробно протабулирована и приведена в работах [23, 151]:

$$\alpha_1 = \frac{r^2}{4a_1 t}; \quad \alpha_2 = \frac{r^2}{4a_2 t};$$

$$\begin{aligned} f_{01} &= \frac{a_1 t}{r_{01}^{*2}}; & f_{02} &= \frac{a_2 t}{r_{02}^{*2}}; \\ r_{01}^* &= r_0 \lambda^{\theta/1+\theta}; & r_{02}^* &= r_0 \lambda^{-1/1+\theta}; \\ \bar{r}_{01}^* &= \frac{r}{r_{01}^*}; & \bar{r}_{02}^* &= \frac{r}{r_{02}^*}; \end{aligned}$$

$J_0, N_0$  — функции Бесселя первого и второго рода от действительного аргумента нулевого порядка.

Определение функции дебита, изменяющегося во времени, осуществим из условий (II.8) и (II.23), записанных для каждого пласта

$$\left. \begin{aligned} Q_{01}(r_0, t) &= 2\pi (km)_1 (km)_2 r_0 \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{п1}}{\partial r} \Big|_{r=r_0}; \\ Q_{02}(r_0, t) &= -2\pi (km)_1 (km)_2 r_0 \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{п2}}{\partial r} \Big|_{r=r_0}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.24})$$

где

$$\frac{\partial R_{пj}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = R_{пj}^* = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty e^{-\alpha_j^2 f_{0j}} \frac{N_0(\alpha_j) J_j\left(\frac{\alpha_j}{\lambda_j}\right) - J_0(\alpha_j) N_0\left(\frac{\alpha_j}{\lambda_j}\right)}{r_{0j}^* [J_0^2(\alpha_j) + N_0^2(\alpha_j)]} d\alpha_j.$$

Здесь  $\lambda_j$  — сокращенные обозначения, соответствующие:  $\lambda_1 = \lambda^{\theta/1+\theta}$ ,  $\lambda_2 = \lambda^{-1/1+\theta}$ .

Выражение (II.24) является достаточно точным решением функции перетока по скважине между двумя соединенными пластами. Однако в связи со сложностью функции  $R_{пj}^*$ , видимо, имеет смысл ввести некоторые ограничения, при которых ее можно привести к виду, имеющему аналоги в специальной литературе по гидродинамике. Например, задача существенно упростится и будет приведена к известным решениям в случае, если можно осуществить замену  $Q_{0j}(r_0, t) \approx Q_{0j}(r_0^*, t)$ . Физически это условие предполагает возможным пренебречь частью упругой водоотдачи пластов в интервале  $\Delta r = r_0^* - r_0$ . Очевидно, что постановка такого вопроса будет более оправдана при рассмотрении процесса при больших значениях времени, когда режим фильтрации может считаться квазистационарным. Соглашаясь априори с таким отношением от заданных граничных условий (II.3), из (II.24) получим\*

$$\begin{aligned} Q_{01}(r_0, t) &= 2\pi (km)_1 (km)_2 r_0 \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{п1}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \approx \\ &\approx 2\pi (km)_1 (km)_2 r_0^* \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{п1}}{\partial r} \Big|_{r=r_{01}^*} = \end{aligned}$$

\* Ниже выполнена оценка погрешности за счет этой замены.

$$\begin{aligned}
&= 2\pi (km)_1 (km)_2 \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{\Pi 1}}{\partial \bar{r}_{01}^*} \bigg|_{\bar{r}_{01}^*=1}; \\
Q_{02}(r_0, t) &= -2\pi (km)_1 (km)_2 r_0 \frac{H_1 - H_2}{KM} \frac{\partial R_{\Pi 2}}{\partial r} \bigg|_{r=r_0} \simeq \\
&\simeq -2\pi (km)_1 (km)_2 r_{02}^* \frac{H_1 - H_2}{KM} \frac{\partial R_{\Pi 2}}{\partial r} \bigg|_{r=r_{02}^*} = \\
&= -2\pi (km)_1 (km)_2 \frac{H_1 - H_2}{KM} \cdot \frac{\partial R_{\Pi 2}}{\partial \bar{r}_{02}^*} \bigg|_{\bar{r}_{02}^*=1},
\end{aligned}$$

что приводит к следующим выражениям для дебитов взаимодействующих пластов:

$$\left. \begin{aligned}
Q_{01}(r_0, t) &\simeq \frac{2\pi (km)_1 (km)_2 (H_1 - H_2)}{KM} G(f_{01}); \\
Q_{02}(r_0, t) &\simeq -\frac{2\pi (km)_1 (km)_2 (H_1 - H_2)}{KM} G(f_{02}),
\end{aligned} \right\} \quad (\text{II.25})$$

где

$$G(f_{0j}) = \frac{4}{\pi^2} \int_0^\infty e^{-\alpha_j^2 f_{0j}} \frac{d\alpha_j}{\alpha_j [J_0^2(\alpha_j) + N_0^2(\alpha_j)]}.$$

Из рассмотрения полученных решений следует, что работа каждого из взаимодействующих по скважине пластов после бурения по форме аналогична работе одиночного пласта при возбуждении скважины с постоянным понижением [23]. Функция  $G(f_0)$  вычислена и приведена во многих работах [23, 149, 151]. Заметим, что при  $f_{0j} > 500$  полученные выражения для понижений и дебитов в соответствии с [23, 148] могут быть упрощены и будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned}
S_{01}(r, t) &\simeq -\frac{(km)_2 (H_1 - H_2) E_i \left( -\frac{\bar{r}_{01}^{*2}}{4f_{01}} \right)}{KM \ln 2,25 f_{01}}; \\
S_{02}(r, t) &\simeq \frac{(km)_1 (H_1 - H_2) E_i \left( -\frac{\bar{r}_{02}^{*2}}{4f_{02}} \right)}{KM \ln 2,25 f_{02}};
\end{aligned} \right\} \quad (\text{II.26})$$

$$\left. \begin{aligned}
Q_{01}(r_0, t) &\simeq \frac{4\pi (km)_1 (km)_2 (H_1 - H_2)}{KM \ln 2,25 f_{01}}; \\
Q_{02}(r_0, t) &\simeq -\frac{4\pi (km)_1 (km)_2 (H_1 - H_2)}{KM \ln 2,25 f_{02}}.
\end{aligned} \right\} \quad (\text{II.27})$$

Отметим, что  $f_{01} = f_{02}$ . Поэтому  $Q_{01}(r_0, t) + Q_{02}(r_0, t) = 0$ , что вполне соответствует заданным условиям.

Если принять различие пластов по пьезопроводности несущественным, т. е.  $\lambda=1$ , то при  $r=r_0$

$$\left. \begin{aligned} S_{01}(r_0, t) &\simeq -\frac{(km)_2(H_1-H_2)}{KM}; \\ S_{02}(r_0, t) &\simeq \frac{(km)_1(H_1-H_2)}{KM}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.28})$$

При таких допущениях уровень воды в скважине стабилизируется практически мгновенно после соединения пластов скважиной независимо от соотношения их водопроницаемости. В то же время дебит перетекания воды между пластами по скважине остается функцией времени\*.

Таким образом, в рассматриваемом случае равных коэффициентов пьезопроводности во взаимодействующих пластах наблюдение постоянного уровня воды в скважине еще не является гарантией стабилизации процесса гидродинамического режима относительно дебита перетекания. Поэтому, приняв условие

$$\left| \frac{Q_{0j}(r_0, t) - Q_{0j}(r_0, t + \Delta t)}{Q_{0j}(r_0, t)} \right| \leq \delta, \quad (\text{II.29})$$

при котором с погрешностью не более  $\delta$  можно считать процесс перетекания стабилизированным в интервале  $\Delta t$ , на основании (II.27) рассчитана номограмма для определения  $t_n = f\left(\frac{a_j}{r_{0j}^2}, \Delta t\right)$ , рис. 2. Под интервалом  $\Delta t$  понимается общая ожидаемая продолжительность исследования по методу

расходомерии в неработающей и затем работающей скважине.

Из совместного решения уравнений (II.26) и (II.27) имеем

$$\frac{S_{0j}(r, t)}{Q_{0j}(r_0, t)} = S_{0j}^*(r, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_j t}\right) \right], \quad (\text{II.30})$$

где  $j=1,2$ .

\* К аналогичному выводу пришел А. А. Плетнев [98], рассматривая эту же задачу с помощью другого математического аппарата.

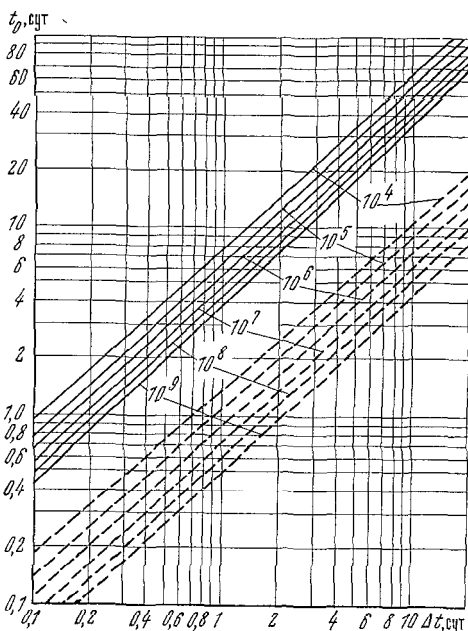


Рис. 2. Номограмма для определения времени стабилизации перетока по скважине  $t_0 = f\left(\frac{a_j}{r_{0j}^2}, \Delta t\right)$  с погрешностью 1% (сплошные линии) и 5% (штриховые линии).

Шифр кривых  $\frac{a_j}{r_{0j}^2}, \frac{1}{\text{сут}}$

По методу индукции этот вывод, очевидно, может быть распространен на систему из  $n > 2$  пластов. Вид этой функции не изменится также при условии равенства пьезопроводности пластов. Следует обратить внимание на то, что эта функция справедлива для всего периода наблюдений и не зависит от других пластов, вскрытых скважиной.

Вернемся теперь к анализу условий, при которых сделанное выше допущение  $Q_{0j}(r_0, t) \simeq Q_{0j}(r_0^*, t)$  может быть принято. Если задаться возможным изменением  $\lambda$  в рассматриваемой системе пластов, то при  $\lambda = 1$  значение  $\Delta r = 0$ , т. е. необходимое условие выполняется при любых  $\theta$ . При  $\lambda \neq 1$  значения  $\Delta r$  для пласта с большей пьезопроводностью по абсолютной величине изменяются примерно прямо пропорционально  $\lambda$  и имеют знак плюс, т. е.  $r_0^* > r_0$ . Для пласта с меньшей пьезопроводностью  $\Delta r$  примерно прямо пропорционально  $1/\lambda$  и имеет знак минус, т. е.  $r_0^* < r_0$ . Например, при  $\lambda = 10$  и  $r_0 = 0,1$  м имеем для первого пласта  $0,1 \leq r_0^* \leq 1,0$  м, а для второго  $0,09 \leq r_0^* \leq 0,1$  м.

Оценим далее долю упругой водоотдачи в общем дебите пласта в интервалах  $\Delta r$ , равных 1, 10 и 100 м, что будет примерно соответствовать отношениям пьезопроводности пластов, равным  $10^2$ ,  $10^4$  и  $10^6$ .

Для расчета упругой водоотдачи воспользуемся уравнением В. Д. Бабушкина. В нашем случае оно записывается в виде

$$V_{\text{упр}} = 2\pi\mu^* \int_{r_0}^{r_0^*} S_0(r, t) r dr,$$

где  $V_{\text{упр}}$  — количество воды, поступающей в скважину из зоны  $\Delta r$  за время  $t$ .

Доля упругой водоотдачи определится отношением

$$\frac{\frac{V_{\text{упр}}}{t}}{Q_0(r_0, t)} = \Delta V_{\text{упр}}.$$

При этом приближенная расчетная формула будет иметь вид

$$\Delta V_{\text{упр}} = \frac{1}{4at} [(r_0^{*2} - r_0^2) \ln 2,25at - r_0^{*2} (\ln r_0^* - 1) + r_0^2 (\ln r_0 - 1)].$$

Расчет осуществим при следующих фиксированных параметрах:  $a = 10^6$  м<sup>2</sup>/сут,  $r_0 = 0,1$  м,  $t = 0,1$  сут для  $r_0^*$ , равных 1, 10 и 100 м. В результате расчета  $\Delta V_{\text{упр}}$  оказалась соответственно равной 0,003, 0,275 и 21,8%. Отметим, что доля упругой водоотдачи в общем балансе тем больше, чем меньше пьезопроводность пласта при прочих равных условиях. Однако снижение пьезопроводности пласта в свою очередь уменьшает величину  $r_0^*$ . Таким образом, предположение о возможности принятия  $Q_{0j}(r_0, t) \simeq Q_{0j}(r_0^*, t)$  с допустимой погрешностью оказывается приемлемым в достаточно большом

диапазоне изменения соотношений пьезопроводностей взаимодействующих по скважине пластов.

## 2. ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РАБОТАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Известно, что анализ уровня режима и суммарного дебита совершенной по степени и характеру вскрытия работающей скважины, заложенной в неоднородной среде, позволяет судить о приведенных параметрах всей водоносной системы [24, 26]. Для обоснования расходометрического метода исследования неоднородных водоносных систем необходимо рассмотреть процесс формирования гидродинамического режима отдельных элементов неоднородной системы в условиях их совместного возбуждения\*.

Общая постановка задачи для этих условий следующая. Исследуемый водоносный комплекс перебурен совершенной по степени вскрытия скважиной с радиусом  $r_0$  и состоит из нескольких горизонтальных и бесконечных в плане однородных областей с параметрами  $k_i$ ,  $m_i$ ,  $a_i$  и  $H_i$ . Подошва и кровля водоносного комплекса предполагаются непроницаемыми. При  $t=0$  в скважине восстановлен уровень гидродинамического равновесия  $H_0$  (статический уровень скважины), а по стволу (при условии различных  $H_i$ ) происходит установившийся переток, в котором каждый элемент комплекса участвует с дебитом  $Q_{0i}$ . Во взаимодействующих таким образом однородных областях развиты установившиеся депрессионные поверхности, имеющие в разрезе уровни  $h_{0i}(r, 0)$ , измеряемые от поверхности земли, принятой за плоскость сравнения.

При  $t>0$  скважина возбуждается в гидродинамическом режиме. По принципу наложения течений заданное возбуждение накладывается на режим взаимодействия слоев при  $t=0$ . Требуется определить функцию дополнительного понижения уровня воды в скважине и за ее пределами при  $t>0$  после начала возбуждения в связи с исследованием данной неоднородной системы, а также функции дебитов отдельных элементов этой системы.

Понижение уровня  $S_i(r, t)$  в каждой однородной области должно удовлетворять уравнению теплопроводности

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} = \frac{1}{a_i} \frac{\partial S}{\partial t}, \quad (\text{II.31})$$

где  $S=S(r, z, t)$ .

\* Условия притока подземных вод к скважинам в слоистых водоносных системах рассматривались рядом исследователей [22, 76, 79, 134, 144, 152] в связи с решением различных прикладных гидрогеологических задач. Они отражали, как правило, простейшие случаи строения водоносных систем. Необходимость в рассмотрении таких задач была обусловлена существующими технологическими приемами опробования водоносных горизонтов и условиями их эксплуатации в конкретных случаях. Эти решения описывали характер происходящих явлений (депрессии, притоки) в отдельных водоносных пластах при раздельной или совместной эксплуатации содержащихся в них вод одной скважиной, что позволяло более объективно делать гидрогеологические прогнозы в сложных условиях, опираясь на традиционные методы опробования гидрогеологических скважин.



На границах областей должно удовлетворяться условие непрерывности давления

$$S_i(r, t)|_{z=z+0} = S_{i+1}(r, t)|_{z=z-0} \quad (\text{II.32})$$

и условие неразрывности потока по нормали  $n$  к границе

$$k_i \frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{z=z+0} = k_{i+1} \frac{\partial S}{\partial n} \Big|_{z=z-0}, \quad (\text{II.33})$$

где  $z$  — координата глубины залегания границы слоев.

Рассмотрим поставленную задачу последовательно для макропотоков первого и второго порядка в принятой схематизации фильтрационного поля неоднородных водоносных комплексов.

По условию выделения структурных элементов первого порядка (пластов) снижение давления в каждой такой квазигоднородной области будет удовлетворять уравнению

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S_j}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_j} \frac{\partial S_j}{\partial t}. \quad (\text{II.34})$$

По закону Дарси на фильтрующей поверхности скважины должно быть выполнено условие для дебита

$$Q(r_0, t) = - \int_F k(z) \frac{\partial S}{\partial n} dF = - 2\pi r_0 K M \left( \frac{\partial S}{\partial r} \right)_{r=r_0}, \quad (\text{II.35})$$

где  $Q(r_0, t)$  — общий дебит скважины;  $F$  — фильтрующая поверхность скважины в границах водоносного комплекса.

Сначала предположим, что водоносный комплекс вскрыт совершенной по степени и характеру скважиной. Начальные и граничные условия, при которых рассматривается данная задача, следующие:

при  $t=0$

$$r_0 \leq r \leq \infty, \quad S(r, 0) = S_j(r, 0) = 0; \quad (\text{II.36})$$

при  $t>0$

$$\left. \begin{aligned} r = r_0, \quad S(r_0, t) = S_j(r_0, t), Q(r_0, t) = \Sigma \Delta Q_j(r_0, t), \\ r \rightarrow \infty, \quad S(\infty, t) = S_j(\infty, t) \rightarrow 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.37})$$

где  $S$  — общее понижение уровня в водоносном комплексе при  $t>0$  относительно уровня гидродинамического равновесия;  $S_j$  — изменение давления в пластах при  $t>0$ .

Для случая, когда системы пластов различаются по естественным приведенным напорам (статическим уровням), она равна (см. рис. 3)

$$S_j(r, t) = h_i(r, t) - h_{0j}(r, 0), \quad (\text{II.38})$$

$$\Delta Q_j(r_0, t) = Q_j(r_0, t) - Q_{0j}(r_0, 0). \quad (\text{II.39})$$

Для решения уравнения (II.35) перейдем от функции  $S_j(r, t)$  к ее интегральному преобразованию по Лапласу [59]

$$\nabla^2 \bar{S}_j(r, p) = \frac{p}{a_j} \bar{S}_j(r, p). \quad (\text{II.40})$$

Решение уравнения (II.40) в области изображений аналогично (II.7).

$$\bar{S}_j(r, p) = B_j K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right). \quad (\text{II.41})$$

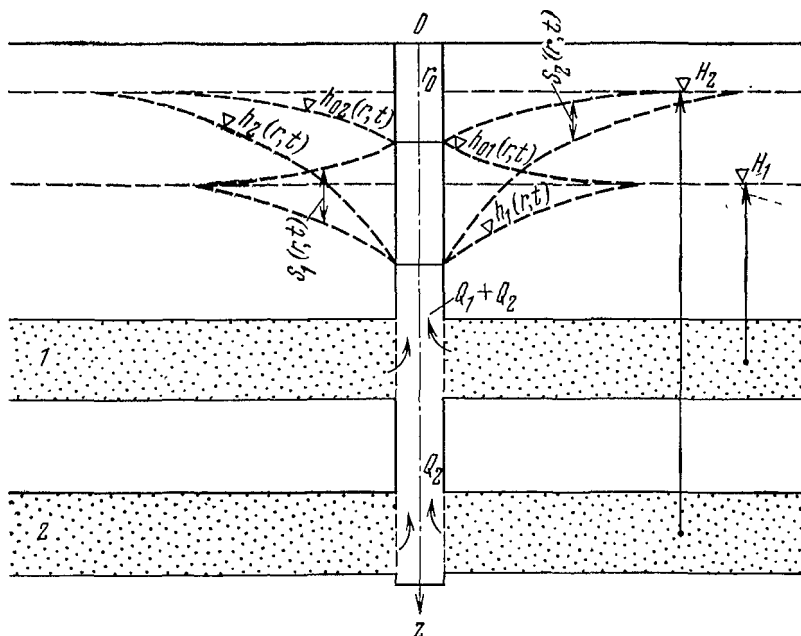


Рис 3. Схема взаимодействия двух пластов в работающей скважине

Аналогично для функции средневзвешенного понижения уровня в водоносном комплексе

$$\bar{S}(r, p) = BK_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a}} \right). \quad (\text{II.42})$$

С учетом (II.42) условие (II.34) в области изображений может быть выражено в виде

$$2\pi KMr_0 \left( \frac{\partial \bar{S}}{\partial r} \right)_{r=r_0} = -2\pi KMr_0 B \sqrt{\frac{p}{a}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) = -\bar{Q}(r_0, p). \quad (\text{II.43})$$

Откуда

$$B = \frac{\bar{Q}(r_0, p)}{2\pi K M r_0 \sqrt{\frac{p}{a}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}. \quad (\text{II.44})$$

Таким образом, решение уравнения (II 42) в изображениях будет иметь вид

$$\bar{S}(r, p) = \frac{\bar{Q}(r_0 p) K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{2\pi K M r_0 \sqrt{\frac{p}{a}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}. \quad (\text{II.45})$$

Полученное выражение можно упростить, используя асимптотическое представление функции  $K_1$  для малых значений аргумента, до вида (II 17)

$$\bar{S}(r, p) = \frac{\bar{Q}(r_0, p) K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a}}\right)}{2\pi K M} \quad (\text{II.46})$$

Переход от изображения к оригиналам в уравнении (II 46), выполненный по [23, 59, 64, 75], приводит к известному уравнению для линейного источника [23, 126]

$$S(r, t) = \frac{1}{4\pi K M} \int_0^t Q(r_0, \tau) \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau. \quad (\text{II.47})$$

Обозначая

$$\frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{t-\tau} = w(r, t-\tau); \quad (\text{II.48})$$

$$\int_0^t \frac{e^{-\frac{r^2}{4a(t-\tau)}}}{t-\tau} d\tau = \left[ -Ei \frac{r^2}{4at} \right], \quad (\text{II.49})$$

получим функцию  $S(r, t)$  в виде интеграла Дюамеля

$$S(r, t) = \frac{1}{4\pi K M} \int_0^t w(r, t-\tau) Q(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.50})$$

Физическое содержание ядра  $w(r_0, t-\tau)$  аналогично (II 16), с тем лишь отличием, что оно определяется приведенной пьезопроводностью всего водоносного комплекса и его общими граничными условиями

Из условия получения функции (II 50) следует, что она не зави-

сит от вида  $\bar{Q}(r_0, \tau)$ . Численно же она определяется приведенными параметрами  $KM$  и  $a$  водоносного комплекса.

Найдем теперь выражение для описания работы различных пластов. Для этого вернемся к условиям (II.34) и (II.37) при  $r=r_0$ . Имея в виду, что согласно [26]

$$KM = \sum_{j=1}^N (km)_j, \quad (\text{II.51})$$

получим

$$2\pi K M r_0 \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = 2\pi r_0 \sum_{j=1}^N (km)_j \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = - \sum_{j=1}^N \Delta Q_j(r_0, t). \quad (\text{II.52})$$

Таким образом, дебиты отдельных однородных пластов водоносной системы пропорциональны параметрам  $(km)_j$  этих пластов при общем градиенте давления на границе скважины, равно  $\frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0}^*$ . Поэтому можно записать

$$2\pi r_0 (km)_j \frac{\partial S}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = - \Delta Q_j(r_0, t) \quad (\text{II.53})$$

или в изображениях

$$2\pi r_0 (km)_j \frac{\partial \bar{S}}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = - \Delta \bar{Q}_j(r_0, p). \quad (\text{II.54})$$

С учетом (II.37) и (II.54) уравнение (II.50) при рассмотрении процесса на границе  $r=r_0$ , выраженное через индивидуальные параметры пластов, будет иметь вид

$$S(r_0, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \omega(r_0, t - \tau) \Delta Q_j(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.55})$$

Для принятой схемы строения разреза, представляемого в виде системы пластов с непроницаемыми границами раздела, условие (II.34) принимает вид

$$-Q(r_0, t) = - \sum_{j=1}^N \Delta Q_j(r_0, t) = 2\pi r_0 \sum_{j=1}^N (km)_j \frac{\partial S_j}{\partial r} \Big|_{r=r_0}, \quad (\text{II.56})$$

что позволяет вместо (II.53) записать

$$2\pi r_0 (km)_j \frac{\partial S_j}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = - \Delta Q_j(r_0, t), \quad (\text{II.57})$$

и вместо (II.54)

$$2\pi r_0 (km)_j \frac{\partial \bar{S}_j}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = - \Delta \bar{Q}_j(r_0, p). \quad (\text{II.58})$$

---

Ниже это положение будет доказано более строго

Тогда в уравнении (II.41)  $B_j$  определится выражением

$$B_j = \frac{\Delta \bar{Q}_j(r_0, p)}{2\pi (km)_j r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}, \quad (\text{II.59})$$

что приведет уравнение (II.41) к виду

$$S_j(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t w_j(r, t - \tau) \Delta Q_j(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.60})$$

или с учетом условия (II.37) при  $r=r_0$  будем иметь

$$S(r_0, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t w_j(r_0, t - \tau) \Delta Q_j(r_0, \tau) d\tau, \quad (\text{II.61})$$

где

$$w_j(r, t - \tau) = \frac{e^{-\frac{r^2}{4a_j(t-\tau)}}}{t - \tau}.$$

В уравнениях (II.55), (II.60) и (II.61) функция  $\Delta Q_j$  осталась неопределенной. Относительно просто ее можно выразить через индивидуальные параметры пластов, которым она соответствует, лишь для некоторых простейших случаев строения неоднородного водоносного комплекса. Поэтому рассмотрим эту задачу для модели водоносного комплекса, состоящего из двух напорных пластов. Примем также, что скважина при  $t > 0$  возбуждается с постоянной производительностью  $Q$ . Такое ограничение условий рассмотрения задачи оправдывается тем, что итоговые решения используются для обоснования технологических приемов исследования скважины с помощью расходомерии. В случае  $Q = Q(r_0, t)$  вид основных решений остается неизменным.

Для решения поставленной задачи вернемся к уравнениям (II.41). Запишем частные производные по  $r$

$$\frac{\partial \bar{S}_j(r, p)}{\partial r} = -B_j \sqrt{\frac{p}{a_j}} K_1 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right). \quad (\text{II.62})$$

Коэффициенты  $B_j$  найдем из граничных условий (II.37), записанных для изобращений

$$\left. \begin{aligned} B_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) &= B_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right); \\ (km)_1 B_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) &+ (km)_2 B_2 \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1 \times \\ \times \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) &= \frac{\bar{Q}}{2\pi r_0 p}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.63})$$

где  $\frac{\bar{Q}}{p}$  — изображение оригинала  $Q$  (суммарный дебит скважины).

Решая эту систему относительно  $B_1$  и  $B_2$  и подставляя полученные выражения в (II.41), имеем

$$\begin{aligned}\bar{S}_1(r, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi r_0 p} K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right) K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right)}{(km)_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right) K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right) +} \\ &\quad + (km)_2 \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right) K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right) \\ \bar{S}_2(r, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi r_0 p} K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right) K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right)}{(km)_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right) K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right) +} \\ &\quad + (km)_2 \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right) K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right)\end{aligned} \quad (II.64)$$

Воспользовавшись приближенным выражением функции  $K_1$  [23, 26, 143] в виде (II.13) при малых значениях аргумента и осуществив ряд алгебраических преобразований, приходим к следующим уравнениям для  $\bar{S}_1(r, p)$  и  $\bar{S}_2(r, p)$ :

$$\begin{aligned}\bar{S}_1(r, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right)}{KM} + \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} \ln \lambda^{-1/1+\theta} K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_1}}\right)}{KM K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta}\right)} \quad (II.65) \\ \bar{S}_2(r, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right)}{KM} + \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} \ln \lambda^{\theta/1+\theta} K_0\left(r \sqrt{\frac{p}{a_2}}\right)}{KM K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta}\right)}.\end{aligned}$$

Из условия (II.43) для дебитов совместно работающих пластов в области изображений имеем выражения

$$\begin{aligned}\Delta \bar{Q}_1(r_0, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{p} (km)_1}{KM} + \frac{\frac{\bar{Q}}{p} (km)_1 \ln \lambda^{-1/1+\theta}}{KM K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta}\right)}, \\ \Delta \bar{Q}_2(r_0, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{p} (km)_2}{KM} + \frac{\frac{\bar{Q}}{p} (km)_2 \ln \lambda^{\theta/1+\theta}}{KM K_0\left(r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta}\right)}.\end{aligned} \quad (II.66)$$

Переход от изображений к оригиналам аналогично (II.46) и (II.22) дает

$$\left. \begin{aligned} S_1(r, t) &= \frac{Q}{4\pi KM} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_1 t}\right) \right] - \frac{Q(km)_2 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} R_{\Pi 1}, \\ \bar{S}_2(r, t) &= \frac{Q}{4\pi KM} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \right] + \frac{Q(km)_1 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} R_{\Pi 2}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.67})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1(r_0, t) &= \frac{Q(km)_1}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_1 t}} + \frac{Q(km)_1(km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} G(f_{01}), \\ \Delta Q_2(r_0, t) &= \frac{Q(km)_2}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_2 t}} - \frac{Q(km)_1(km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} G(f_{02}). \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.68})$$

Интересно рассмотреть поведение полученных функций в зависимости от соотношения параметров пластов

Если принять условие, что  $f_{0j} > 500$ , то в соответствии с [23, 148] полученные выражения могут быть упрощены таким образом.

$$\left. \begin{aligned} S_1(r, t) &= \frac{Q}{4\pi KM} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_1 t}\right) \right] + \frac{Q(km)_2 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} \cdot \frac{Ei\left(-\frac{1}{4F_{01}}\right)}{\ln 2, 25f_{01}}; \\ S_2(r, t) &= \frac{Q}{4\pi KM} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_2 t}\right) \right] - \frac{Q(km)_1 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} \cdot \frac{Ei\left(-\frac{1}{4F_{02}}\right)}{\ln 2, 25f_{02}}, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.69})$$

где  $F_{0j} = \frac{a_j t}{r_0^2}$ ;

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1(r_0, t) &= \frac{Q(km)_1}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_1 t}} - \frac{Q(km)_1(km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} \cdot \frac{1}{\ln 2, 25f_{01}}; \\ \Delta Q_2(r_0, t) &= \frac{Q(km)_2}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_2 t}} + \frac{Q(km)_1(km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} \cdot \frac{1}{\ln 2, 25f_{02}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.70})$$

Если в данной водоносной системе предположить  $\theta = 1$ , то при рассмотрении процесса на границе  $r = r_0$ , т. е. в самой скважине, условие  $f_{0j} > 500$  выполняется с первых минут после пуска скважины даже при значительном различии пьезопроводностей пластов. Если предположить  $\theta \gg 1$ , то условие  $f_{0j} > 500$  выполняется спустя не более 100 мин после пуска скважины также независимо от различия пьезопроводностей пластов.

Если же принять различие пластов по пьезопроводности несущественным, то вторым членами в уравнениях (II.67), (II.68) — (II.70) будут стремиться к нулю. Понижения в пластах относительно своих первоначальных напоров будут равны. Пьезометрические поверхности (динамические уровни) будут различаться на величину, равную разности первоначальных напоров (статических уров-

ней) в пластах, т. е. будут параллельны друг другу в координатах  $r, t$ . Дебиты пластов в этом случае также будут функцией времени, а по величине пропорциональны их водопроницаемости

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_1(r_0, t) &= \frac{Q(km)_1}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_1 t}}; \\ \Delta Q_2(r_0, t) &= \frac{Q(km)_2}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_2 t}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.71})$$

Учитывая, что  $f_{01} = f_{02}$ ,

$$\Delta Q_1(r_0, t) + \Delta Q_2(r_0, t) = \frac{Q}{KM} \left[ (km)_1 e^{-\frac{r_0^2}{4a_1 t}} + (km)_2 e^{-\frac{r_0^2}{4a_2 t}} \right]. \quad (\text{II.72})$$

Однако по условию  $\Delta Q_1(r_0, t) + \Delta Q_2(r_0, t) = Q$ . Члены  $e^{-\frac{r_0^2}{4a_j t}}$  не равны единице, что объясняется использованием математической модели источника — стока для описания фильтрации на границе  $r \neq 0$ . Задаваясь погрешностью приближения, равной погрешности измерения дебитов с помощью скважинных расходомеров, получим, что условие

$$e^{-\frac{r_0^2}{4a_j t}} \rightarrow 1 \quad (\text{II.73})$$

выполняется практически уже в первые 10 мин после пуска скважины при любых значениях  $a_j$ .

Нетрудно также заметить, что для времени, удовлетворяющего условию (II.73), вторые члены в правой части уравнений (II.70) не превышают 0,05 от величины первых членов и имеют тенденцию к уменьшению. Поэтому можно считать, что значения дебитов пластов с точностью измерения будут определяться соотношением

$$\Delta Q_j = \frac{Q(km)_j}{KM}. \quad (\text{II.74})$$

При  $\lambda = 1$  это соотношение выполняется одновременно с условием (II.73).

В связи с этим интересно выяснить, при каких условиях математическая модель притока из пластов соответствует их работе с постоянной производительностью, чтобы использовать при решении обратной задачи постоянные значения их дебитов, измеренных при исследовании. Это имеет важное методическое значение, так как выполнение таких условий определяет необходимую длительность возбуждения скважины. Иными словами, следует выяснить время от пуска скважины до момента, когда значение дебита пласта по расходомерическим измерениям не будет отличаться в пределах погрешности измерения от средневзвешенного теоретического



значения дебита за время возбуждения скважины, используемого в математической модели притока, т. е. необходимо решить следующее неравенство относительно  $\Delta t$ :

$$\left| 1 - \frac{1}{Q_j \Delta t} \int_0^{\Delta t} Q_j(r_0, t) dt \right| < \delta, \quad (\text{II.75})$$

где  $\Delta t$  — необходимое время возбуждения скважины;  $\delta$  — погрешность приближения.

Номограмма для определения контрольного времени имеет весьма простой вид (рис. 4). Для оценки  $\Delta t$  несущественно число

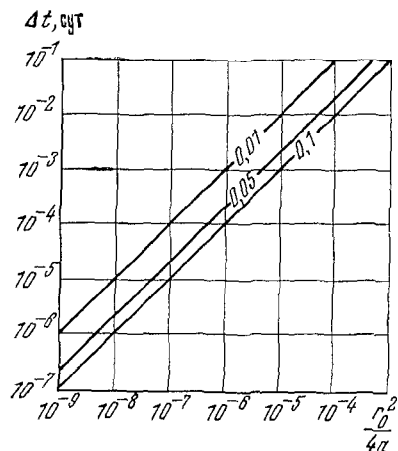


Рис 4 Номограмма для определения времени соответствия дебитов совместным исследуемым пластов условиям стабилизации при возбуждении скважины с постоянной производительностью  
Шифр кривых  $\delta$

одновременно работающих пластов. Достаточно использовать пласты с минимальным из возможных значений пьезопроводности, так как любые другие значения ускоряют приближение измеренных дебитов совместно исследуемых пластов к их теоретическому значению.

Это же условие обеспечивает приближение  $R_{n1} = R_{n2} \approx 1$  с погрешностью, не превышающей погрешность измерений. Тогда для понижений в пластах на границе  $r = r_0$  имеем

$$\begin{aligned} S_i(r_0, t) &= S(r_0, t) = \\ &= \frac{Q}{4\pi KM} \ln \left( \frac{2,25t}{r_0^2} a_1^{(km)_1/KM} a_2^{(km)_2/KM} \right). \end{aligned} \quad (\text{II.76})$$

Отсюда следует, что при продолжительности возбуждения водоносной системы, удовлетворяющей условию (II.75), понижение уровня в

скважине равно понижению на стенке каждого пласта, как это предусмотрено условиями (II.37), а его динамика определяется приведенными параметрами системы. При этом индивидуальные дебиты определяются соотношением (II.74) с заданной точностью. Таким образом, различия в пьезопроводности пластов несколько отдалают наступление момента соответствия дебитов, но при рассмотрении процесса в скважине ( $r = r_0$ ) оказывается, что он также приходится на начальный период возбуждения. Это связано с тем, что ряд факторов, обуславливающих несовершенство скважин, не учтены при теоретическом решении прямой задачи. Кроме того, наличие непроницаемых слоев раздела маловероятно.

\* Этот вывод в точности совпадает с решением задачи о приведенных параметрах многослойной системы в работе [26]

Поэтому для описания гидродинамического режима элементов реальной неоднородной среды, совместно исследуемых одной скважиной, пригодным оказывается в основном выражение (II.55), где ядро  $w(r, t-\tau)$  охарактеризовано значением приведенной пьезопроводности системы. Учитывая (II.74) для описания гидродинамического режима различных пластов при постоянном суммарном дебите скважины имеем

$$S_j(r_0, t) = S(r_0, t) = \frac{\Delta Q_j}{4\pi(km)_j} \ln \left[ \frac{2,25t}{r_0^2} a_1^{(km)_1/KM} a_2^{(km)_2/KM} \right]. \quad (\text{II.77})$$

Полученные выводы можно распространить на систему из  $n$  пластов. С учетом [26] при постоянном дебите гидродинамически совершенной скважины будем иметь

$$S(r_0, t) = \frac{Q}{4\pi KM} \ln \frac{2,25at}{r_0^2}; \quad (\text{II.78})$$

$$S_j(r_0, t) = \frac{\Delta Q_j}{4\pi(km)_j} \ln \frac{2,25at}{r_0^2}, \quad (\text{II.79})$$

где  $a = \prod_{j=1}^n a^{(km)_j/KM}$  — приведенная пьезопроводность системы

Из совместного решения уравнений (II.65) и (II.66) для области изображений определим

$$\frac{\bar{S}_j(r, p)}{\Delta \bar{Q}_j(r_0, p)} = \bar{S}_j^*(r, p) = \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}{2\pi(km)_j}, \quad (\text{II.80})$$

где  $j=1, 2$ .

По методу индукции этот вывод, очевидно, может быть распространен на систему пластов  $n > 2$ .

В области оригиналов эта функция имеет вид

$$S_j^*(r, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4a_j t} \right) \right]. \quad (\text{II.81})$$

Важно отметить, что эта функция не зависит от свойств других пластов, участвующих в эксперименте.

Повторив все выкладки для случая возбуждения скважины в гидродинамическом режиме с  $Q \neq \text{const}$ , нетрудно будет убедиться, что функция (II.81) является универсальной.

Рассмотренные выше закономерности формирования гидродинамического режима совместно исследуемых пластов отвечали условиям гидродинамически совершенной скважины. Реальная скважина характеризуется наличием скин-эффекта, величина которого является функцией глубины.

Физическому содержанию скин-эффекта и его влиянию на эпюру водопритока в скважину посвящена гл. III. Здесь же рассмотрим его влияние на формирование гидродинамического режима

различных элементов неоднородной системы. При наличии скин-эффекта действующее понижение в пласте в условиях откачки может быть записано в виде

$$S_{j,-}(r_0, t) = S_H(r_0, t) - \Delta S_j(r_0, t), \quad (\text{II.82})$$

где  $S_H(r_0, t)$  — понижение уровня, наблюдаемое в реальной скважине;  $\Delta S_j(r, t)$  — сумма гидравлических потерь на различных сопротивлениях ствола скважины и фильтра, характеризующая величину скин-эффекта для данного пласта. В случае переменного дебита пласта  $\Delta S_j$  является функцией времени.

При наличии скин-эффекта в реальной скважине для выражения функции суммарного дебита  $Q_H$  вместо условия (II.34) будем иметь

$$Q_H(r_0, t) = -2\pi r_0 \left[ KM \frac{\partial S_H(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} - \sum_{j=1}^N (km)_j \frac{\partial \Delta S_j(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0} \right] \quad (\text{II.83})$$

или

$$Q_H(r_0, t) = -2\pi r_0 \sum_{j=1}^N (km)_j \frac{\partial S_j(r, t)}{\partial r} \Big|_{r=r_0}. \quad (\text{II.84})$$

Применяя функцию Гиринского к значению понижения, действующего в скважине на всю открытую для исследования систему водоносных пластов, получим

$$S(r_0, t) = S_H(r_0, t) - \frac{\sum_{j=1}^N (km)_j \Delta S_{j,-}(r_0, t)}{KM}. \quad (\text{II.85})$$

Условие (II.37) для совместно исследуемых пластов при  $t > 0$  будет иметь вид

$$r = r_0, \quad S_j(r_0, t) = S_H(r_0, t) - \Delta S_j(r_0, t), \quad Q_H(t_0, t) = \sum_{j=1}^N \Delta Q_{Hj}(r_0, t), \quad (\text{II.86})$$

$$r \rightarrow \infty, \quad S(\infty, t) = S_j(\infty, t) = S_H(\infty, t) \rightarrow 0.$$

Повторяя решение аналогично описанному, для функции средневзвешенного действующего понижения на всю вскрытую систему водоносных пластов получим

$$S(r, t) = S_H(r, t) - \Delta S(r, t) = \frac{1}{4\pi KM} \int_0^t \omega(r, t - \tau) Q_H(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.87})$$

где  $\Delta S(r, t)$  — соответствует второму слагаемому в (II.85) при  $r \geq r_0$ .

Для понижений в совместно исследуемых пластах, принимая их разделенными непроницаемыми границами, получим соответственно

$$S_j(r, t) = S_n(r, t) - \Delta S_j(r, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \int_0^t w_j(r, t - \tau) \Delta Q_{nj}(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.88})$$

Физическое содержание уравнений (II.87) и (II.88) эквивалентно содержанию соответствующих уравнений (II.50), (II.60).  $Q_n$  и  $\Delta Q_{nj}$  — дебит скважины и пласта, измеренный при исследовании.

Получим далее уравнения для функций понижения и дебита пластов, выраженные через параметры системы. Как и раньше, примем модель, в которой скважина вскрывает два пласта, разделенных непроницаемым слоем, и возбуждается откачкой с постоянным дебитом. При выполнении условия (II.75) можно принять  $\Delta S_j$  не зависящими от времени. Это упростит выкладки, не изменив принципиального существа задачи.

Повторив решение аналогично описанному для функции понижения в пластах и их дебита в области изображений, получим

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_1(r, p) &= \frac{\left[ \frac{\bar{Q}_n}{2\pi p} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + \frac{\Delta \bar{S}_2 - \Delta \bar{S}_1}{p} (km)_2 \right] K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{KM \cdot K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{0/1+\theta} \right)}, \\ \bar{S}_2(r, p) &= \frac{\left[ \frac{\bar{Q}_n}{2\pi p} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - \frac{\Delta \bar{S}_2 - \Delta \bar{S}_1}{p} (km)_1 \right] K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right)}{KM \cdot K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)}; \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.89})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{Q}_{n1}(r_0, p) &= \frac{\left[ \frac{\bar{Q}_n}{p} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + \frac{2\pi(\Delta \bar{S}_2 - \Delta \bar{S}_1)}{p} (km)_2 \right] (km)_1}{KM \cdot K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{0/1+\theta} \right)}, \\ \Delta \bar{Q}_{n2}(r_0, p) &= \frac{\left[ \frac{\bar{Q}_n}{p} K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - \frac{2\pi(\Delta \bar{S}_2 - \Delta \bar{S}_1)}{p} (km)_1 \right] (km)_2}{KM \cdot K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.90})$$

Переход к оригиналам дает

$$S_1(r, t) = \frac{Q_n}{4\pi KM} \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4a_1 t} \right) \right] - \quad \}$$

$$\left. \begin{aligned} & - \frac{Q_H (km)_2 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} R_{n1} + \frac{(\Delta S_2 - \Delta S_1) (km)_2}{KM} R_{n1}, \\ S_2(r, t) = & \frac{Q_H}{4\pi KM} \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4a_2 t} \right) \right] - \\ & - \frac{Q_H (km)_1 \ln \lambda}{2\pi (KM)^2} R_{n2} - \frac{(\Delta S_2 - \Delta S_1) (km)_1}{KM} R_{n2}; \end{aligned} \right\} \quad (II.91)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{H1}(r_0, t) = & \frac{Q_H (km)_1}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_1 t}} + \frac{Q_H (km)_1 (km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} R_{n1}^* - \\ & - \frac{2\pi (km)_1 (km)_2 (\Delta S_2 - \Delta S_1)}{KM} R_{n1}^*, \end{aligned} \quad (II.92)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_{H2}(r_0, t) = & \frac{Q_H (km)_2}{KM} e^{-\frac{r_0^2}{4a_2 t}} - \frac{Q_H (km)_1 (km)_2 \ln \lambda}{(KM)^2} R_{n2}^* + \\ & + \frac{2\pi (km)_1 (km)_2 (\Delta S_2 - \Delta S_1)}{KM} R_{n2}^*. \end{aligned}$$

Как видно из уравнений (II.91) и (II.92), влияние скин-эффекта на формирование гидродинамического режима отражается на третьем члене. Для времени, удовлетворяющего условию (II.75), как было показано,  $R_n \rightarrow 1$  и  $\frac{\partial R_n}{\partial r} \rightarrow 0$ . Таким образом, все закономерности формирования понижений и дебитов, выявленные для пластов в гидродинамически совершенной скважине, остаются теми же для случая их совместной работы в реальной скважине, если функция скин-эффекта выделена индивидуально для каждого рассматриваемого элемента системы.

Из совместного решения уравнений (II.89) и (II.90) для области изображений получаем

$$\frac{\bar{S}_j(r, \rho)}{\Delta \bar{Q}_{Hj}(r_0, \rho)} = \bar{S}_j^*(r, \rho) = \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{\rho}{a_j}} \right)}{2\pi (km)_j}. \quad (II.93)$$

В области оригиналов эта функция имеет вид

$$S_j^*(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4a_j t} \right) \right]. \quad (II.94)$$

По методу индукции этот вывод можно, очевидно, распространить на систему пластов  $n > 2$ . Как видно, (II.94) эквивалентно (II.81).

Соответственно для всего водоносного комплекса

$$\frac{\bar{S}(r, \rho)}{\bar{Q}(r_0, \rho)} = \bar{S}^*(r, \rho) = \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{\rho}{a}} \right)}{2\pi KM}, \quad (II.95)$$

$$S^*(r, t) = \frac{1}{4\pi KM} \left[ -Ei \left( -\frac{r^2}{4at} \right) \right]. \quad (\text{II.96})$$

Из сравнения способов получения (II.81) и (II.94) приходим к следующему соотношению для приведения условий работы пластов в реальной скважине к условиям их работы в гидродинамически совершенной скважине по величинам дебитов:

$$\Delta Q_j(r_0, t) = \frac{{}^r\Delta Q_{Hj}(r_0, t) \cdot S_H(r_0, t)}{S_H(r, t) - \Delta S_j(r_0, t)}. \quad (\text{II.97})$$

Как видим, приведенная функция  $\Delta Q_j$  зависит от времени за пределами интервала, обеспечивающего выполнение условия (II.75) при постоянном дебите скважины.

Аналогично для приведенного дебита скважины имеем

$$Q(r_0, t) = \frac{Q_H \cdot S_H(r_0, t)}{S_H(r_0, t) - \Delta S}. \quad (\text{II.98})$$

Можно показать, что

$$Q(r_0, t) = \sum_{j=1}^n \Delta Q_j(r_0, t). \quad (\text{II.99})$$

Нетрудно также видеть, что

$$\frac{\bar{S}_H(r, p)}{\bar{\Delta} Q_j(r_0, p)} = \bar{S}_j^*(r, p) = \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}{2\pi (km)_j}. \quad (\text{II.100})$$

Для области оригиналов эта функция определена в виде (II.94). Соответственно для всей системы пластов

$$\frac{\bar{S}_H(r, p)}{\bar{Q}(r_0, p)} = \bar{S}^*(r, p) = \frac{K_0 \left( r \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{2\pi KM}. \quad (\text{II.101})$$

Для области оригиналов вид этой функции выражен уравнением (II.96).

Рассмотрим далее поведение функций давления для макропотоков второго порядка, схематизированных в виде горизонтальных и бесконечных слоев, имеющих между собой свободный контакт. Функция давления для этих элементов фильтрационного поля должна удовлетворять уравнениям (II.31) и условиям (II.32) — (II.34).

Для рассмотрения задачи примем, что модель пласта (макропотока первого порядка) состоит из двух слоев, имеющих соответственно коэффициенты фильтрации  $k_1$  и  $k_2$ , коэффициенты преезпроводности  $a_1$  и  $a_2$  и мощности  $m_1$  и  $m_2$ . Расположим начало координат в плоскости раздела слоев, а ось  $z$  направим вертикально

вниз. Для каждого из этих слоев уравнение (II.31) может быть переписано следующим образом:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S_i}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 S_i}{\partial z^2} = \frac{1}{a_i} \frac{\partial S_i}{\partial t} \begin{cases} i=1, & -m_1 < z < 0; \\ i=2, & 0 < z < m_2. \end{cases} \quad (\text{II.102})$$

В дополнение к условиям (II.32)—(II.34) на кровле и подошве двухслойного пласта должно удовлетворяться условие непроницаемости

$$\left. \frac{\partial S}{\partial z} \right|_{z=-m_1} = \left. \frac{\partial S}{\partial z} \right|_{z=m_2} = 0. \quad (\text{II.103})$$

Аналогичная модель рассмотрена в [26] в связи с определением приведенных параметров водопроводимости и пьезопроводности неоднородных систем. Наша задача состоит в нахождении функций  $S_1$  и  $S_2$  в связи с индивидуальными параметрами слоев. Ее решение облегчается возможностью использования примененных в [26] приемов. В частности, функции  $S_i$  удобно представить в зависимости от безразмерных параметров

$$U_i(\rho, Z, t) = S_i(r, z, t) \begin{cases} i=1, & -Z_1 < z < 0; \\ i=2, & 0 < z < Z_2. \end{cases} \quad (\text{II.104})$$

где

$$U_i = \frac{S_i(r, z, t)}{S_i(r_0, z, t)}; \quad \rho = r/r_0; \\ Z = z/r_0; \quad Z_1 = m_1/r_0; \quad Z_2 = m_2/r_0.$$

Уравнение (II.104) применительно к функции  $U_i(\rho, Z, t)$  в области изображений по Лапласу имеют вид

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \left( \rho \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial \rho} \right) + \frac{\partial^2 \bar{U}_i}{\partial Z^2} = \gamma_i^2 \bar{U}_i, \quad (\text{II.105})$$

где  $\gamma_i^2 = \frac{r_0^2 \rho}{a_i}.$

Начальные и граничные условия для решения задачи относительно функций  $\bar{U}_i$  имеют вид

$$\begin{cases} \text{при } \rho = 1 & \bar{U}_i(\rho, Z, \rho) = 1; \\ \text{при } \rho \rightarrow \infty & \bar{U}_i(\rho, Z, \rho) = 0. \end{cases} \quad (\text{II.106})$$

На границе раздела слоев

$$\bar{U}_1(\rho, 0, \rho) = \bar{U}_2(\rho, 0, \rho); \quad (\text{II.107})$$

$$k_1 \left. \frac{\partial \bar{U}_1}{\partial Z} \right|_{Z=0} = k_2 \left. \frac{\partial \bar{U}_2}{\partial Z} \right|_{Z=0}. \quad (\text{II.108})$$

На кровле и подошве двухслойного пласта

$$\left. \frac{\partial \bar{U}_1}{\partial Z} \right|_{Z=-Z_1} = \left. \frac{\partial \bar{U}_2}{\partial Z} \right|_{Z=Z_2} = 0. \quad (\text{II.109})$$

Для нахождения функций  $\bar{U}_i(\rho, Z, \rho)$ , следуя [26], воспользуемся интегральным преобразованием Вебера

$$F(\sigma) = \int_1^{\infty} \bar{U}(\rho) \rho Z_0(\rho\sigma) d\rho, \quad (\text{II.110})$$

где  $Z_0(\rho\sigma) = N_0(\rho\sigma)J_0(\sigma) - J(\rho\sigma)N_0(\sigma)$ ;  $\sigma$  — параметр преобразования.

Для этого преобразования в интервале  $1 < \rho < \infty$  переход от образа  $F(\sigma)$  к оригиналу  $\bar{U}(\rho)$  осуществляется по формуле

$$\bar{U}(\rho) = \int_0^{\infty} F(\sigma) \frac{\sigma Z_0(\rho\sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma. \quad (\text{II.111})$$

Применив преобразование Вебера к уравнениям (II.105), получаем следующие обыкновенные линейные уравнения:

$$\frac{d^2 F_i(\sigma, Z)}{dZ^2} = b_i^2 F_i(\sigma, Z) - \frac{2}{\pi} \begin{cases} i=1, & -Z_1 < Z < 0; \\ i=2, & 0 < Z < Z_2, \end{cases} \quad (\text{II.112})$$

где  $b_i^2 = \sigma^2 + \gamma_i^2$ ;  $F_i(\sigma, Z)$  — преобразования Вебера (II.110) функций  $\bar{U}_i(\rho, Z)$ . Условия (II.107) — (II.109) после преобразования имеют вид

$$F_1(\sigma, 0) = F_2(\sigma, 0); \quad (\text{II.113})$$

$$k_1 \left. \frac{\partial F_1}{\partial Z} \right|_{Z=0} = k_2 \left. \frac{\partial F_2}{\partial Z} \right|_{Z=0}; \quad (\text{II.114})$$

$$\left. \frac{\partial F_1}{\partial Z} \right|_{Z=-Z_1} = \left. \frac{\partial F_2}{\partial Z} \right|_{Z=Z_2}. \quad (\text{II.115})$$

Решением уравнений (II.112), удовлетворяющим условию (II.115), является [26]

$$\left. \begin{aligned} F_1(\sigma, Z) &= \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{b_1^2} + A_1 \operatorname{ch} b_1(Z + Z_1) \right]; \\ F_2(\sigma, Z) &= \frac{2}{\pi} \left[ \frac{1}{b_2^2} + A_2 \operatorname{ch} b_2(Z - Z_2) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.116})$$

Не зависящие от  $Z$  величины  $A_1$  и  $A_2$  находятся из условий (II.111) и (II.114)

$$A_1 = \frac{b_1^2 - b_2^2}{b_1^2 b_2} \frac{k_2 \operatorname{sh} b_2 Z_2}{\Delta},$$

$$A_2 = \frac{b_2^2 - b_1^2}{b_1 b_2^2} \frac{k_1 \operatorname{sh} b_1 Z_1}{\Delta},$$

где  $\Delta = b_1 k_1 \operatorname{sh} b_1 Z_1 \operatorname{ch} b_2 Z_2 + b_2 k_2 \operatorname{sh} b_2 Z_2 \operatorname{ch} b_1 Z_1$ .



В результате для функций  $\bar{U}(\rho, Z)$  получаем выражения

$$\bar{U}_i(\rho, Z) = \int_0^\infty F_i(\sigma, Z) \frac{\sigma Z_0(\rho\sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma. \quad (\text{II } 117)$$

Определим средневзвешенное понижение в каждом слое, которое будем рассматривать эквивалентным понижению для того же слоя при условии, что он изолирован и в нем имеет место плоскорадиальная фильтрация

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{1}{k_i Z_i} \int_0^{Z_i} \bar{U}_i(\rho, Z) dZ. \quad (\text{II.118})$$

После подстановки (II 117) и перемены порядка интегрирования будет

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{2}{\pi k_i Z_i} \int_0^\infty \left( \frac{Z_i}{b_i^2} + \frac{A_i}{b_i} \operatorname{sh} b_i Z_i \right) \frac{\sigma Z_0(\rho\sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma. \quad (\text{II.119})$$

Исследование интегралов, содержащих  $A_i$  в (II 119), проведенное в [26] при больших значениях времени, приводит (II 119) к выражению

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_i^2 + \sigma^2} \frac{\sigma Z_0(\rho\sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma. \quad (\text{II.120})$$

Из справочника \* известна следующая формула

$$\int_1^\infty \frac{K_0(\gamma_i \rho)}{K_0(\gamma_i)} \rho Z_0(\rho\sigma) d\rho = \frac{2}{\pi (\gamma_i^2 + \sigma^2)}. \quad (\text{II.121})$$

Рассматривая этот интеграл как преобразование Вебера, для функции  $\frac{K_0(\gamma_i \rho)}{K_0(\gamma_i)}$  образом будет служить функция  $\frac{2}{\pi (\gamma_i^2 + \sigma^2)}$ . В свою очередь на основании формулы обращения (II 117) для функций  $\bar{U}_i^*(\rho)$  получается выражение

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{K_0(\gamma_i \rho)}{K_0(\gamma_i)}. \quad (\text{II.122})$$

Однако

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{\bar{S}_i(\rho, p)}{\bar{S}_i(1, p)}, \quad (\text{II } 123)$$

---

\* Я Н Шпильрейн Таблицы специальных функций Ч 1 М—Л ГТТИ, 1933

поэтому

$$\bar{S}_i(\rho, p) = \bar{S}_i(1, p) \frac{K_0(\gamma_i \rho)}{K_0(\gamma_i)}. \quad (\text{II.124})$$

Из условия (II.34) имеем

$$\bar{S}_i(1, p) = \frac{\Delta \bar{Q}_{hi}(1, p)}{2\pi k_i Z_i} K_0(\gamma_i). \quad (\text{II.125})$$

После подстановки в (II.124) получаем

$$\bar{S}_i(\rho, p) = \frac{\Delta \bar{Q}_{hi}(1, p)}{2\pi k_i Z_i} K_0(\gamma_i \rho). \quad (\text{II.126})$$

или для области оригиналов с использованием первоначальной размерности величин

$$S_i(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_i} \int_0^t \omega_i(r, t - \tau) \Delta Q_{hi}(r_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.127})$$

Для функций  $S^*(r, t)$  имеем также

$$S_i^*(r, t) = \frac{1}{4\pi (km)_i} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_i t}\right) \right]. \quad (\text{II.128})$$

Если вместо (II.118) записать

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{1}{k_1 Z_1 + k_2 Z_2} \left[ \int_{Z_1}^0 \bar{U}_1(\rho, Z) dZ + \int_0^{Z_2} \bar{U}_2(\rho, Z) dZ \right], \quad (\text{II.129})$$

то получим функцию средневзвешенного понижения, характеризующего работу всего пласта, считая его квазиоднородным. После подстановки (II.117)

$$\begin{aligned} \bar{U}_i^*(\rho) = \frac{2}{\pi (k_1 Z_1 + k_2 Z_2)} \int_0^\infty \left[ \frac{Z_1}{b_1^2} + \frac{Z_2}{b_2^2} + \frac{A_1}{b_1} \operatorname{sh} b_1 Z_1 + \right. \\ \left. + \frac{A_2}{b_2} \operatorname{sh} b_2 Z_2 \right] \frac{\sigma Z_0(\rho \sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma. \end{aligned} \quad (\text{II.130})$$

Произведя упрощения на основе исследования поведения интегралов, содержащих  $A_i$  [26],

$$\bar{U}_i^*(\rho) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \frac{1}{\gamma_0^2 + \sigma^2} \cdot \frac{\sigma Z_0(\rho \sigma)}{J_0^2(\sigma) + N_0^2(\sigma)} d\sigma, \quad (\text{II.131})$$

где

$$\gamma_0^2 = \frac{k_1 Z_1 \gamma_1^2 + k_2 Z_2 \gamma_2^2}{k_1 Z_1 + k_2 Z_2} = \frac{\frac{k_1 Z_1}{a_1} + \frac{k_2 Z_2}{a_2}}{k_1 Z_1 + k_2 Z_2} r_0^2 \rho.$$

Поступая так же, как при анализе (II.121), для  $\bar{U}_j^*(\rho)$  получаем выражение

$$\bar{U}_j^*(\rho) = \frac{K_0(\gamma_0 \rho)}{K_0(\gamma_0)}. \quad (\text{II.132})$$

Представив аналогично (II.123)

$$\bar{U}_j^*(\rho) = \frac{\bar{S}_j(\rho, \rho)}{\bar{S}_j(1, \rho)}, \quad (\text{II.133})$$

имеем

$$\bar{S}_j(\rho, \rho) = \bar{S}_j(1, \rho) \frac{K_0(\gamma_0 \rho)}{K_0(\gamma_0)}. \quad (\text{II.134})$$

Найдя из условия (II.34) для дебита пласта значение  $\bar{S}_j(1, \rho)$ , получим

$$\bar{S}_j(\rho, \rho) = \frac{\Delta \bar{Q}_{Hj}(1, \rho)}{2\pi(k_1 Z_1 + k_2 Z_2)} K_0(\gamma_0 \rho). \quad (\text{II.135})$$

Для области оригиналов с использованием первоначальной размерности величин

$$S_j(r, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \int_0^t w_j(r, t - \tau) \Delta Q_{Hj}(r_0, \tau) d\tau \quad (\text{II.136})$$

и для функции

$$S_j^*(r, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4a_j t}\right) \right], \quad (\text{II.137})$$

где

$$a_j = \frac{\sum (km)_i}{\sum \frac{(km)_i}{a_i}}.$$

Полученные решения, очевидно, можно распространить на случай  $n > 2$  слоев в пласте.

Таким образом, для макропотоков как первого, так и второго порядка функции понижения и дебита описываются однотипным уравнением свертки (интеграл Дюамеля), если гидравлические потери, обусловленные скин-эффектом, выделены индивидуально для каждой области. Аналогично (II.98) получим также соотношение для приведения наблюдаемых дебитов слоев к их теоретическим дебитам для условия гидродинамически совершенной скважины, работающей с понижением  $S_H(r_0, t)$

$$\Delta Q_i(r_0, t) = \frac{\Delta Q_{Hi}(r_0, t) S_H(r_0, t)}{S_H(r_0, t) - \Delta S_i(r_0, t)}. \quad (\text{II.138})$$

### 3 ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ РЕАГИРУЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ

Гидродинамический режим наблюдательной (реагирующей) скважины, вскрывшей неоднородный по фильтрационным свойствам разрез, может быть рассмотрен индуктивным методом на основе полученных решений в разделах 1 и 2. Из них ясно, что в реагирующей скважине, имеющей то же строение, что и возмущающая, должно наблюдаться изменение перетока по стволу при

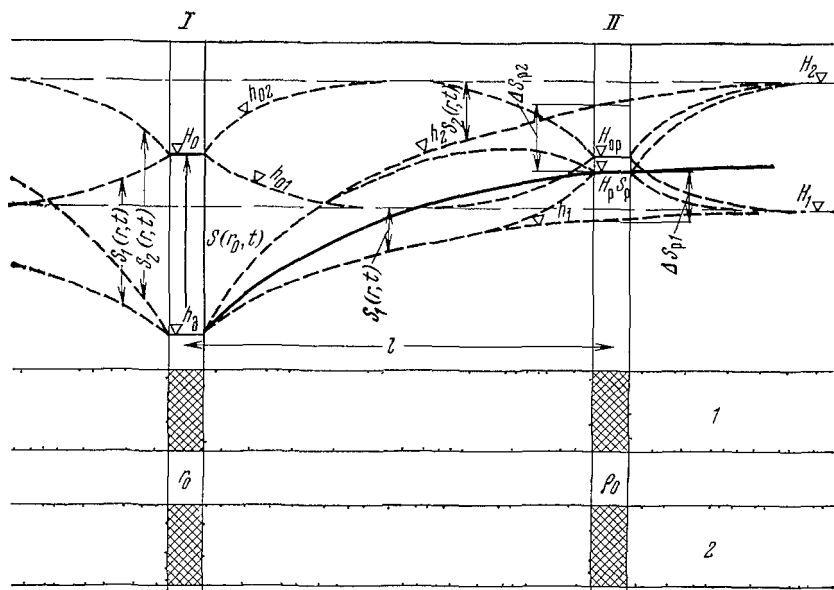


Рис 5 Схема взаимодействия возмущающей (I) и реагирующей (II) скважин, вскрывших два водоносных пласта, разделенных непроницаемым слоем

откачке. Схема взаимодействия возмущающей и реагирующей скважин, вскрывших два водоносных пласта, разделенных непроницаемым слоем, показана на рис 5.

Аналогичная задача для системы двух пластов решалась В. А. Манукиным. Им предложено частное решение, описывающее поведение уровней (понижений) в пластах в точке расположения наблюдательной скважины. Процесс формирования уровней поверхностей напора рассматривается с момента вскрытия пластов. Это хотя и приводит к принципиально точным решениям относительно понижений, однако постановка задачи все же далека от реальных условий проведения опыта. При использовании полученных решений в обратных задачах предполагается знание статических уровней совместно исследуемых пластов, что ограничивает возможность применения полученных решений. Реальные модели разрезов взаимодействующих скважин характеризуются более разнообразным строением и сочетанием параметров, которые априори

могут (и должны) быть неизвестны. Обратные же задачи должны быть построены только на данных, получаемых в процессе опыта.

Представляется более удобным процесс формирования уровней и перетоков в реагирующей скважине в период, предшествующий опыту, рассматривать установившимся и уже на него накладывать условия неустановившегося режима, заданного возбуждением возмущающей скважины в связи с проведением данного исследования.

Обсудим физическую модель взаимодействия скважин на примере разреза, содержащего два однородных бесконечных в плане водоносных пласта, разделенных непроницаемым слоем. Кровля и подошва этого водоносного комплекса также непроницаемы (см. рис. 5).

При проведении откачки с постоянным дебитом срезки уровней (понижения) каждого из рассматриваемых пластов на расстоянии  $l$  от возмущающей скважины (при отсутствии других точек возмущения) будут описываться уравнениями (II.69). При различии в пьезопроводности пластов срезки статических уровней не равны. Дренированные уровни каждого из участвующих в опыте пластов

$$h_j(l, t) = H_j + S_j(l, t), \quad (\text{II.139})$$

где  $j=1,2$ ;  $h_j$  — глубина до пьезометрического уровня.

Из (II.139) следует, что при  $t > 0$  в реагирующей скважине, расположенной на расстоянии  $l$  от возмущающей, изменится перепад напоров между взаимодействующими пластами, поскольку

$$h_1(l, t) - h_2(l, t) \neq H_1 - H_2.$$

Изменение перепада напоров неизбежно будет вызывать изменение величины перетекания воды между пластами по стволу реагирующей скважины. Если обозначить через  $H_p(l, t)$  динамический уровень воды в реагирующей скважине при  $t > 0$ , то

$$H_p(l, t) - h_j(l, t) = \Delta S_{pj}(l, t), \quad (\text{II.140})$$

где  $\Delta S_{pj}(l, t)$  — понижения, при которых происходит переток между пластами по стволу реагирующей скважины при  $t > 0$ .

Наблюдаемое снижение уровня в реагирующей скважине при  $t > 0$  равно

$$S_p(l, t) = H_p(l, t) - H_{ор}, \quad (\text{II.141})$$

где  $H_{ор}$  — установившийся уровень гидродинамического равновесия в реагирующей скважине при  $t=0$ , или, учитывая (II.139) и (II.140),

$$S_p(l, t) = S_j(l, t) + \zeta_j(\rho_0, t), \quad (\text{II.142})$$

где  $\zeta_j(\rho_0, t) = \Delta S_{pj}(l, t) - (H_{ор} - H_j)$ .

Подставляя в (II.142) вместо  $S_j(l, t)$  выражение (II.60) и вместо  $\zeta_j(\rho_0, t)$  — (II.18), получим общее уравнение для описания видимого понижения уровня в реагирующей скважине в виде

$$S_p(l, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_j(r_0, \tau) \omega_j(l, t - \tau) d\tau + \\ + \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{pj}(\rho_0, \tau) \omega_j(\rho_0, t - \tau) d\tau, \quad (\text{II.143})$$

где  $\Delta Q_{pj}(\rho_0, t)$  — функция приращения дебита перетока между пластами по стволу реагирующей скважины при  $t > 0$  по отношению к дебиту перетока  $Q_{p0j}$  при  $t = 0$ ;  $\rho_0$  — радиус реагирующей скважины.

Уравнения (II.143) устанавливают связь между дебитом каждого из совместно работающих пластов  $\Delta Q_j(r_0, t)$  (вход системы) и видимым понижением уровня в реагирующей скважине (выход системы). Нетрудно заметить, что данное решение не зависит от числа водоносных пластов, участвующих в эксперименте, важно чтобы скважинами были вскрыты идентичные пласты.

Определим вид функции  $S_p(l, t)$  в зависимости от параметров системы. В качестве исходного дифференциального уравнения используем уравнение теплопроводности

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial S_j(r, t)}{\partial r} \right) = \frac{1}{a_j} \frac{\partial S_j(r, t)}{\partial t}. \quad (\text{II.144})$$

Начальные и граничные условия решения задачи следующие.  
При  $t = 0$

$$r_0 \leq r \leq \infty, \quad \rho_0 \leq \rho \leq \infty, \quad S(r, 0) = S_j(r, 0) = \zeta_j(\rho, 0) = 0. \quad (\text{II.145})$$

При  $t > 0$

$$\left. \begin{aligned} r = r_0, \quad S(r_0, t) = S_j(r_0, t), \quad KM \frac{\partial S(r, t)}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi r_0}, \\ Q = \Sigma \Delta Q_j; \quad \rho = \rho_0, \quad \zeta_1(\rho_0, t) - \zeta_2(\rho_0, t) = S_2(l, t) - \\ - S_1(l, t), \quad \Sigma (km)_j \frac{\partial \zeta_j(\rho, t)}{\partial \rho} = 0; \\ r \rightarrow \infty, \quad \rho \rightarrow \infty, \quad S(\infty, t) = S_j(\infty, t) = \zeta_j(\infty, t) \rightarrow 0, \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.146})$$

где  $r$  — расстояние от возмущающей и  $\rho$  — от реагирующей скважин до точки определения функции  $S(r, t)$ .

Решение задачи в общем виде в изображениях по Лапласу с учетом замечаний, приведенных в разделах 1, 2, будет таким

$$\bar{S}(r, \rho) = B_j K_0 \left( r \sqrt{\frac{\rho}{a_j}} \right) + B_{pj} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{\rho}{a_j}} \right), \quad (\text{II.147})$$

где

$$\bar{S}_j(r, \rho) = B_j K_0 \left( r \sqrt{\frac{\rho}{a_j}} \right), \quad \bar{\zeta}_j(\rho, \rho) = B_{pj} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{\rho}{a_j}} \right);$$

$\bar{S}_j(r, p)$  и  $\xi_j(\rho, p)$  — изображения оригиналов  $S_j(r, t)$  и  $\xi_j(\rho, t)$ .

Функции  $S_j(r, t)$  были определены выше для области изображений и оригиналов соответственно в виде (II.64) и (II.66). Таким образом, задача сводится к определению функции  $\xi_j(\rho, t)$ . На основании условий (II.146) для реагирующей скважины составим систему уравнений для нахождения коэффициентов  $B_{p1}$  и  $B_{p2}$

$$\left. \begin{aligned} & B_{p1} K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - B_{p2} K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) = \\ & = \frac{\bar{Q}}{2\pi r_0 p} \left[ K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) - \right. \\ & \quad \left. (km)_1 \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + \right. \\ & \quad \left. - K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right] \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{(km)_2 \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{(km)_1 B_{p1} \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) + (km)_2 B_{p2} \sqrt{\frac{p}{a_2}} \times} \\ & \quad \times K_1 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.148})$$

В результате решения системы (II.148) имеем

$$\begin{aligned} B_{p1} &= \frac{(km)_2 \frac{\bar{Q}}{2\pi p} \left[ K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \times \right. \\ & \quad \left. \left[ (km)_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right] \times \right. \\ & \quad \left. \times K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) \right]}{\left[ (km)_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right] \times} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{\times \left[ (km)_1 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right]}{\times \left[ (km)_1 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right]}; \\ B_{p2} &= \frac{(km)_1 \frac{\bar{Q}}{2\pi p} \left[ K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - \right. \\ & \quad \left. \left[ (km)_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right] \times \right. \\ & \quad \left. - K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) K_0 \left( l \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) \right]}{\left[ (km)_1 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( r_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right] \times} \rightarrow \\ & \rightarrow \frac{\times \left[ (km)_1 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right]}{\times \left[ (km)_1 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) + (km)_2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \right]}. \end{aligned}$$

Используя асимптотическое представление функции  $K_0$  для малых аргументов [143] и произведя несложные алгебраические преобразования, для  $\bar{\xi}_1(\rho, p)$  и  $\bar{\xi}_2(\rho, p)$  получим уравнения

$$\left. \begin{aligned} \bar{\xi}_1(\rho, p) &= - \frac{(km)_2 \bar{Q} \ln \lambda \ln \frac{\rho_0}{l} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{2\pi p (KM)^2 K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)} ; \\ \bar{\xi}_2(\rho, p) &= \frac{(km)_1 \bar{Q} \ln \lambda \ln \frac{\rho_0}{l} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right)}{2\pi p (KM)^2 K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)} . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.149})$$

Принято  $r_0 = \rho_0$ .

Запишем функции изменения дебитов перетока по стволу реагирующей скважины при  $t > 0$

$$\Delta Q_{пj}(\rho_0, t) = Q_{пj}(\rho_0, t) - Q_{п0j} \quad (\text{II.150})$$

или в изображениях

$$\Delta \bar{Q}_{пj}(\rho_0, p) = \bar{Q}_{пj}(\rho_0, p) - \frac{\bar{Q}_{п0j}}{p} . \quad (\text{II.151})$$

Однако  $\Delta \bar{Q}_{пj}(\rho_0, p)$  можно записать в виде

$$\Delta \bar{Q}_{пj}(\rho_0, p) = - 2\pi \rho_0 (km)_j \frac{\partial \bar{\xi}_j(\rho, p)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} . \quad (\text{II.152})$$

или на основании (II.149)

$$\left. \begin{aligned} \Delta \bar{Q}_{п1}(\rho_0, p) &= - \frac{(km)_1 (km)_2 \rho_0 \bar{Q} \sqrt{\frac{p}{a_1}} K_1 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) \ln \lambda \cdot \ln \frac{\rho_0}{l}}{(KM)^2 p K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)} ; \\ \Delta \bar{Q}_{п2}(\rho_0, p) &= \frac{(km)_1 (km)_2 \rho_0 \bar{Q} \sqrt{\frac{p}{a_2}} K_1 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) \ln \lambda \ln \frac{\rho_0}{l}}{(KM)^2 p K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)} . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.153})$$

После преобразования (II.153) с использованием асимптотической формулы для  $K_1$  при малом значении аргумента [143] имеем

$$\Delta \bar{Q}_{п1}(\rho_0, p) = - \frac{(km)_1 (km)_2 \bar{Q} \ln \lambda \cdot \ln \frac{\rho_0}{l}}{(KM)^2 p K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)} ;$$



$$\Delta \bar{Q}_{\Pi 2}(\rho_0, p) = \frac{(km)_1 (km)_2 \bar{Q} \ln \lambda \cdot \ln \frac{\rho_0}{l}}{(KM)^2 p K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)} . \quad \left. \vphantom{\frac{(km)_1 (km)_2 \bar{Q} \ln \lambda \cdot \ln \frac{\rho_0}{l}}{(KM)^2 p K_0^2 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)}} \right\} \quad (\text{II.154})$$

Нетрудно заметить, что

$$K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right) = K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right).$$

Поэтому  $\Delta \bar{Q}_{\Pi 1}(\rho_0, p) + \Delta \bar{Q}_{\Pi 2}(\rho_0, p) = 0$ , что соответствует указанным граничным условиям и реальным условиям перетока в реагирующей скважине.

Интересно рассмотреть поведение функции

$$\bar{\xi}_j^*(\rho, p) = \frac{\bar{\xi}_j(\rho, p)}{\Delta \bar{Q}_{\Pi j}(\rho_0, p)}.$$

Из совместного решения (II 149) и (II.154) имеем

$$\bar{\xi}_j^*(\rho, p) = \frac{K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a_j}} \right)}{2\pi (km)_j}, \quad (\text{II.155})$$

где  $j=1,2$ .

Для области оригиналов эти функции имеют вид

$$\bar{\xi}_j^*(\rho, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \left[ -Ei \left( -\frac{\rho^2}{4a_j t} \right) \right]. \quad (\text{II.156})$$

По методу индукции этот вывод нетрудно распространить на систему изолированных водоносных пластов  $n > 2$ .

При рассмотрении процесса только в реагирующей скважине  $\rho = \rho_0$ .

Усложним теперь модель разрезов взаимодействующих скважин. Будем считать, что коррелируемости пластов между скважинами и однородности их по водопроницаемости не отмечается. Кроме того, пласты имеют равную проницаемость или по крайней мере гидравлически связаны.

Вернемся к уравнению (II 143). Для откачки с постоянным дебитом, что является необходимым условием эксперимента,  $\Delta Q_j(r_0, t) = \Delta Q_j = \text{const}$ . Поэтому для указанной модели строения разрезов взаимодействующих скважин вместо (II.143) на основании (II.74) можно написать

$$S_p(l, t) = \frac{Q}{4\pi KM} \int_0^t w_j(l, t - \tau) d\tau + \\ + \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{\Pi j}(\rho_0, \tau) w_j(\rho_0, t - \tau) d\tau, \quad (\text{II.157})$$

но в данном случае должно быть

$$\frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{пj}(\rho_0, \tau) \omega_j(\rho_0, t - \tau) d\tau = 0. \quad (\text{II.158})$$

Это условие означает, что срезки уровней для различных пластов в реагирующей скважине равны, а дебит перетока по ее стволу при  $t > 0$  равен дебиту перетока при  $t = 0$ . Оно также непосредственно следует из (II.149) при  $\lambda = 1$ .

На практике при исследовании скважин в трещиноватых и трещинно-карстовых породах условие (II.158), как правило, не выполняется, хотя здесь имеются все формальные основания для представления таких водоносных систем в виде единого гидравлически связанного комплекса водоносных зон. Это может быть объяснено рядом условий, которые проявляются в комплексе или отдельно:

- 1) гидрогеологические разрезы скважин не тождественны;
- 2) расстояние между скважинами (проекция на плоскость) не равно расстоянию между рассматриваемыми сечениями различных макропотоков в пространстве;
- 3) фильтрационные свойства между скважинами изменчивы.

Указанные факторы вполне реальны, но мы не можем знать их априори. Поэтому следует ограничить возможность применения метода расхсдометрии реагирующих скважин слоистыми разрезами, где выполняются условия коррелируемости и взаимной изолированности водоносных пластов [41]. При этом практическая ценность метода будет в значительной мере снижена. Можно, однако, рассуждать иначе. Рассматривая разрез реагирующей сква-

жины, будем по-прежнему считать, что  $\frac{Q}{4\pi KM} \int_0^t \omega_j(l, t - \tau) d\tau$  — от-

клик в изменении уровня исследуемого пласта в реагирующей скважине от возбуждения возмущающей скважины. При этом величина  $l \rightarrow L$  будет некоторым приведенным расстоянием, соответствующим по величине срезки расстоянию в среде с фильтрационными параметрами, равными фильтрационным параметрам рассматриваемого пласта в реагирующей скважине и ее окрестности. Такая схематизация расширяет область применения метода в различной геолого-гидрогеологической обстановке, а также снижает требования к подготовке конструкции скважин. Очевидно и другое преимущество: возможность оценки и сравнения водоносных зон по величине  $L$ , что может служить мерой их гидродинамической связи с возмущающей скважиной. При полном соответствии физической и математической моделей  $l = L$ . Таким образом, общее уравнение для понижения уровня в реагирующей скважине в моделях взаимодействующих скважин с некоррелируемыми разрезами вместо (II.157) будет таким:

$$S_p(l, t) = \frac{Q}{4\pi KM} \int_0^t w(L_j, t - \tau) d\tau + \\ + \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{пj}(\rho_0, t - \tau) \omega_j(\rho_0, \tau) d\tau. \quad (\text{II.159})$$

Здесь индекс «j» соответствует номеру рассматриваемого пласта в реагирующей скважине. Ядро в первом члене правой части (II.159) определяется приведенной пьезопроводностью разреза, а во втором — индивидуальными ее значениями во взаимодействующих пластах.

Рассмотрим поведение функций  $\xi_j(\rho_0, t)$  и  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, t)$  для модели разреза реагирующей скважины, содержащего два водоносных пласта. Условие (II.146) для данного случая будет иметь вид

$$\left. \begin{aligned} t > 0, \rho = \rho_0, \xi_1(\rho_0, t) - \xi_2(\rho_0, t) = S_2(L_2, t) - S_1(L_1, t); \\ \sum (km)_j \frac{\partial \xi_j(\rho, t)}{\partial \rho} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.160})$$

Система уравнений для определения коэффициентов  $B_{p1}$  и  $B_{p2}$  с учетом (II.84) будет такой:

$$\left. \begin{aligned} B_{p1} K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right) - B_{p2} K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right) = \\ = \frac{\bar{Q}}{2\pi p KM} \left[ K_0 \left( L_2 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) - K_0 \left( L_1 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) \right]; \\ (km)_1 B_{p1} + (km)_2 B_{p2} = 0. \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.161})$$

Из решения системы имеем

$$B_{p1} = \frac{\bar{Q} (km)_2 \left[ K_0 \left( L_2 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) - K_0 \left( L_1 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) \right]}{2\pi p (KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)}, \\ B_{p2} = - \frac{\bar{Q} (km)_1 \left[ K_0 \left( L_2 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) - K_0 \left( L_1 \sqrt{\frac{p}{a}} \right) \right]}{2\pi p (KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)}.$$

Произведя предварительно несложные преобразования с использованием асимптотического представления функции  $K_0$  для малых значений аргумента, получим для  $\xi_j(\rho, p)$  выражения

$$\left. \begin{aligned} \bar{\xi}_1(\rho, p) &= - \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} (km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a_1}} \right)}{(KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_1}} \lambda^{\theta/1+\theta} \right)} ; \\ \bar{\xi}_2(\rho, p) &= \frac{\frac{Q}{2\pi p} (km)_1 \ln \frac{L_2}{L_1} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a_2}} \right)}{(KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a_2}} \lambda^{-1/1+\theta} \right)} . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.162})$$

Легко заметить, что при  $L_1 = L_2$   $\bar{\xi}_1(\rho, p) = \bar{\xi}_2(\rho, p) = 0$ . В соответствии с физическим смыслом  $L$  этот случай соответствует модели коррелируемых пластов, одновременно открытых во взаимодействующих скважинах.

В случае некоррелируемых пластов с равными пьезопроводностями, например, в разрезах трещинно-карстовых пород, уравнения (II.162) будут иметь вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{\xi}_1(\rho, p) &= - \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} (km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{(KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a}} \right)} ; \\ \bar{\xi}_2(\rho, p) &= \frac{\frac{\bar{Q}}{2\pi p} (km)_1 \ln \frac{L_2}{L_1} K_0 \left( \rho \sqrt{\frac{p}{a}} \right)}{(KM)^2 K_0 \left( \rho_0 \sqrt{\frac{p}{a}} \right)} . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.163})$$

Переход к оригиналам функции (II.162) дан в разделе 1 на основании [23]. Воспользовавшись этим приемом, получим

$$\left. \begin{aligned} \xi_1(\rho, t) &= - \frac{Q (km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{2\pi (KM)^2} R_{\text{II1}} ; \\ \xi_2(\rho, t) &= \frac{Q (km)_1 \ln \frac{L_2}{L_1}}{2\pi (KM)^2} R_{\text{II2}} . \end{aligned} \right\} \quad (\text{II.164})$$

Найдем функции изменения дебита перетекания между пластами по стволу реагирующей скважины при  $t > 0$

$$\Delta Q_{\text{II1}}(\rho_0, t) = - 2\pi \rho_0 (km)_1 \frac{\partial \xi_1(\rho, t)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} = \frac{Q (km)_1 (km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{(KM)^2} R_{\text{II1}}^* ; \quad \left\{ \right.$$

$$\Delta Q_{п2}(\rho_0, t) = 2\pi\rho_0(km)_2 \frac{\partial \xi_2(\rho, t)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=\rho_0} = - \frac{Q(km)_1(km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{(KM)^2} R_{п2}^* . \quad (II.165)$$

При  $f_{0j} > 500$  полученные выражения могут быть упрощены аналогично тому, как это было сделано в разделе 1. Тогда

$$\left. \begin{aligned} \xi_1(\rho, t) &= - \frac{Q(km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{2\pi(KM)^2} \frac{Ei\left(-\frac{\bar{\rho}_{01}^{**}}{4f_{01}}\right)}{\ln 2,25f_{01}} ; \\ \xi_2(\rho, t) &= \frac{Q(km)_1 \ln \frac{L_2}{L_1}}{2\pi(KM)^2} \frac{Ei\left(-\frac{\bar{\rho}_{02}^{**}}{4f_{02}}\right)}{\ln 2,25f_{02}} . \end{aligned} \right\} \quad (II.166)$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_{п1}(\rho_0, t) &= \frac{2Q(km)_1(km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{(KM)^2} \frac{1}{\ln 2,25f_{01}} ; \\ \Delta Q_{п2}(\rho_0, t) &= - \frac{2Q(km)_1(km)_2 \ln \frac{L_2}{L_1}}{(KM)^2} \frac{1}{\ln 2,25f_{02}} . \end{aligned} \right\} \quad (II.167)$$

Так как  $f_{01} = f_{02}$ , следовательно

$$\Delta Q_{п1}(\rho_0, t) + \Delta Q_{п2}(\rho_0, t) = 0,$$

что соответствует заданным условиям взаимодействия пластов в реагирующей скважине.

Получим далее функции  $\xi_j^*(\rho, t) = \frac{\xi_j(\rho, t)}{\Delta Q_{пj}(\rho_0, t)}$  из совместного решения уравнений (II.166) и (II.167)

$$\xi_j^*(\rho, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \left[ -Ei\left(-\frac{\rho^2}{4a_j t}\right) \right], \quad (II.168)$$

где  $j=1,2$ .

Как видно, полученное выражение аналогично (II.156). Как и выше, полученные функции могут быть использованы для разрезов реагирующих скважин, содержащих более двух пластов.

При рассмотрении процесса только в реагирующей скважине  $\rho = \rho_0$ . В этом случае также полученные решения могут быть применены и для макропотоков второго порядка.

## ВЫВОДЫ

1. Взаимодействие пластов в неработающей скважине после их вскрытия характеризуется постепенно затухающими функциями перетока и давления. Характерно, что функция перетока является более инерционной, чем функция давления. Однако время услов-

ной стабилизации этих функций для пластов с различным соотношением параметров относительно невелико.

2. Гидродинамический режим одновременно работающих пластов в общем виде описывается интегралом Дюамеля. При задании режима работы скважины с постоянной производительностью функции дебитов совместно работающих пластов стабилизируются достаточно быстро, что не требует специального учета начального неустановившегося периода.

3. Гидродинамический режим макропотоков первого и второго порядка описывается аналогичными функциями, что позволяет рассматривать их с помощью однотипных приемов.

4. Гидродинамический режим реагирующей скважины накладывается на общий фон снижения давления. Функции дебита перетока и давления в реагирующей скважине зависят от параметров взаимодействующих водоносных зон и приведенных расстояний от возмущающей скважины. Выделение этих функций из экспериментальных данных позволяет осуществить отдельную оценку таких зон в условиях одновременного их реагирования на возбуждение возмущающей скважины.

## ГЛАВА III

# ГИДРАВЛИКА ВОДОПРИТОКА В СКВАЖИНУ ИЗ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ

### 1. ОСНОВНОЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЕ УРАВНЕНИЕ РАСХОДОГРАММЫ

Расходограммой принято называть экспериментальную функцию изменения объемного расхода воды по глубине скважины. Она тождественна интегральной функции распределения водопритоков в скважину из фильтрующих пород. Форма этой функции зависит от совместного действия многих гидравлических сопротивлений, образующих замкнутую саморегулирующуюся систему.

Достаточно подробный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных исследованию влияния гидравлических сопротивлений водоприемной части скважин на их производительность и режим работы, приведен Э. А. Грикевичем [47]. К этому источнику можно отослать тех, кто интересуется прикладной стороной данной проблемы при проектировании водозаборных сооружений.

К числу наиболее интересных предложений аналитического описания функции водопритока в скважину в связи с действием различных сопротивлений и, в частности, сопротивления фильтра, относится предложение применения основных закономерностей движения тел в замкнутых системах [25, 47, 99, 154]. Эти работы, как и большая часть других в области гидравлики скважин, имели конкретную прикладную направленность в связи с решением задач выбора оптимальных конструкций водоприемной части и потому в исходных предпосылках использовали некоторые заданные параметры системы (гидрогеологические, технологические). На основе такого подхода получены приближенные решения, описывающие функцию водопритока через фильтр, окруженный средой с практически постоянным по вертикали гидравлическим сопротивлением.

Иными словами, в принятых моделях предполагается, что в однородном пласте скорость потока за фильтром не зависит от глубины, а скорость просачивания воды через отверстия фильтра является функцией глубины. Такое представление физической модели удобно, так как приводит к простому виду функции водопритока в скважину вдоль фильтрующей поверхности пласта. Однако фактически в этом случае не выполняется условие непрерывности давления и неразрывности потока на границе фильтр — порода.

Для некоторых практических задач принятое упрощение может быть приемлемо. Для более широких целей, в частности для определения фильтрационных свойств пород в заскважинной области, оно нуждается в обосновании допустимости такого упрощения физической задачи. Без этого полученные решения соответствуют функции водопритока в средах с бесконечно малым гидравличе-

ским сопротивлением. Кроме того, в отмеченных выше источниках предложенные решения отвечают случаю работы одиночного фильтра в однородном пласте. В реальной скважине либо может быть этажно установлено несколько фильтров, либо секции фильтра могут обладать различными гидравлическими характеристиками, либо водоносный пласт может состоять из нескольких слоев с разной проводимостью и т. п. При рассмотрении таких моделей необходим учет транзитного потока по скважине для объектов, расположенных вдоль потока.

В задачах исследования гидрогеологических свойств пород необходимо выявить влияние гидравлических сопротивлений фактических конструкций скважин и их водоприемной части на распределение водопритоков и депрессий в разрезе. Поэтому крайне важно получение этой функции в общем виде и обоснование возможности ее использования с указанными целями.

Ниже приводится более общее решение прямой задачи расходомерии, эквивалентное нахождению функции водопритока в скважину вдоль ее фильтрующей поверхности, учитывающее отмеченные особенности реальных разрезов. Анализ этого решения позволил определить область применения частных или упрощенных вариантов математических моделей водопритока и их физических аналогов для практических оценок гидравлических сопротивлений в прискважинной зоне.

Рассматривается однородный напорный проницаемый пласт, оборудованный фильтром на всю мощность. В качестве исходного уравнения для описания движения воды по скважине при поступлении ее из боковых фильтрующих пород, следуя [47], применим уравнение Мещерского. Дифференциальное уравнение поступательного движения абсолютного твердого тела, масса которого  $m_*$  зависит от времени, имеет вид \*

$$\frac{d}{dt}(m_* \bar{v}) = \bar{F} + \bar{u} \frac{dm_*}{dt}, \quad (\text{III.1})$$

где  $\bar{F}$  — главный вектор сил, действующих на движущееся тело;  $\bar{v}$  — вектор абсолютной скорости движения тела;  $\bar{u}$  — вектор скорости присоединяющихся частиц до момента присоединения;  $t$  — время.

При  $\frac{dm_*}{dt} > 0$  происходит присоединение массы, при  $\frac{dm_*}{dt} < 0$  — отсоединение массы.

Преобразуем это уравнение применительно к движению жидкости в вертикальной скважине с присоединением притока из боковых пород \*\*. После дифференцирования и скалярного умножения правой и левой частей на  $\bar{v}$  получаем

\* Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. Справочник по физике М, Наука, 1964, 847 с

\*\* Применимость уравнения (III.1) для описания движения жидкости с переменным расходом была показана в ряде работ, например [96]



$$\bar{v}d\bar{v} \frac{m_*}{dt} - \bar{v}u \frac{dm_*}{dt} + \bar{v}\bar{v} \frac{dm_*}{dt} = \bar{v}\bar{F}. \quad (\text{III.2})$$

Считая вектор скорости присоединяемых частиц  $\bar{u}$  направленным перпендикулярно к вектору скорости потока внутри скважины  $\bar{v}$ , получим  $\bar{u}\bar{v}=0$ . Член  $\frac{dm_*}{dt}$  называется секундной массой.

В единицах потока жидкости он выражается в виде

$$\frac{m_*}{dt} = \frac{\gamma}{g} q = \frac{\gamma W}{g} v, \quad (\text{III.3})$$

где  $q$  — объемный расход потока;  $\gamma$  — плотность жидкости;  $g$  — ускорение силы тяжести;  $W$  — площадь поперечного сечения фильтра.

При движении жидкости в цилиндрической трубе главный вектор сил, приложенных к движущемуся объему, коллинеарен вектору средней скорости и направлен в ту же сторону, т. е. по осевой линии фильтра. Как известно, величина вектора равнодействующей в этом случае равна сумме проекций на осевую линию векторов приложенных сил, а скалярное произведение векторов равно произведению скаляров, т. е.  $\bar{F}\bar{v}=Fv$ .

Из теории движения жидкости в напорном трубопроводе имеем [47]

$$Fv = \gamma W \left( -\frac{dp}{\gamma} - dz - \frac{\lambda}{D} \frac{v_i^2}{2g} dl \right) v, \quad (\text{III.4})$$

где  $dp$  — разность гидродинамических давлений в сечениях элементарного объема;  $dz$  — разность ординат центров тяжести выделенных сечений рассматриваемого элементарного объема;  $v_i$  — средняя скорость движения в элементарном объеме;  $dl$  — длина пути, проходимого частицами жидкости от сечения к сечению;  $\lambda$  — коэффициент сопротивления трения по длине пути;  $D$  — внутренний диаметр фильтра.

Рассматривая движение жидкости в вертикальной скважине как поступательное, можно принять  $l=z$  и  $v_i=v$ . Тогда, подставив (III.3) и (III.4) в (III.2) и произведя соответствующие преобразования, получим

$$\frac{dv^2}{g} + \frac{dp}{\gamma} + dz + \frac{\lambda}{2gD} v^2 dz = 0. \quad (\text{III.5})$$

Запишем это уравнение в интегральном виде для интервала  $0-z$

$$\int_{v_0}^z \frac{dv^2}{g} + \frac{p_z}{\gamma} - \frac{p_0}{\gamma} + z + \int_0^z \frac{\lambda}{2gD} v^2 dz = 0, \quad (\text{III.6})$$

где  $v_z$ ,  $p_z$  — соответственно скорость и давление внутри потока жидкости на уровне  $z$ ;  $v_0$ ,  $p_0$  — соответственно скорость и давление внутри потока жидкости на нулевом уровне ( $z=0$ ).

Обозначим  $\frac{p_0}{\gamma} = h_0$  и  $\frac{p_z}{\gamma} = h_z$ , что соответственно будет равно пьезометрическому напору, отвечающему давлению на глубине подошвы водоносного пласта  $h_0$  и на некоторой промежуточной глубине  $z > 0$  вверх от подошвы  $h_z$ . Вместо линейной скорости потока перейдем к объемной скорости (расходу) путем замены  $v = \frac{q}{W}$ .

После этого уравнение (III.6) переписется в виде

$$\int_{q_0}^{q_z} \frac{dq^2}{gW^2} + h_z - h_0 + z + \int_0^z \frac{\lambda}{2gDW^2} q^2 dz = 0. \quad (\text{III.7})$$

Уравнение (III.7) является балансовым.

Поток жидкости на пути от периферийных областей к скважине и по скважине на поверхность преодолевает различные сопротивления, расходуя на них часть потенциальной энергии. Выделим из всего разнообразия возможных гидравлических сопротивлений наиболее очевидные и сгруппируем их по признаку физической общности. На рис. 6 дано схематическое распределение соответствующих им потерь напора и давлений в скважине и околоскважинной зоне. Поясним обозначения потерь напора и давлений на рис. 6:

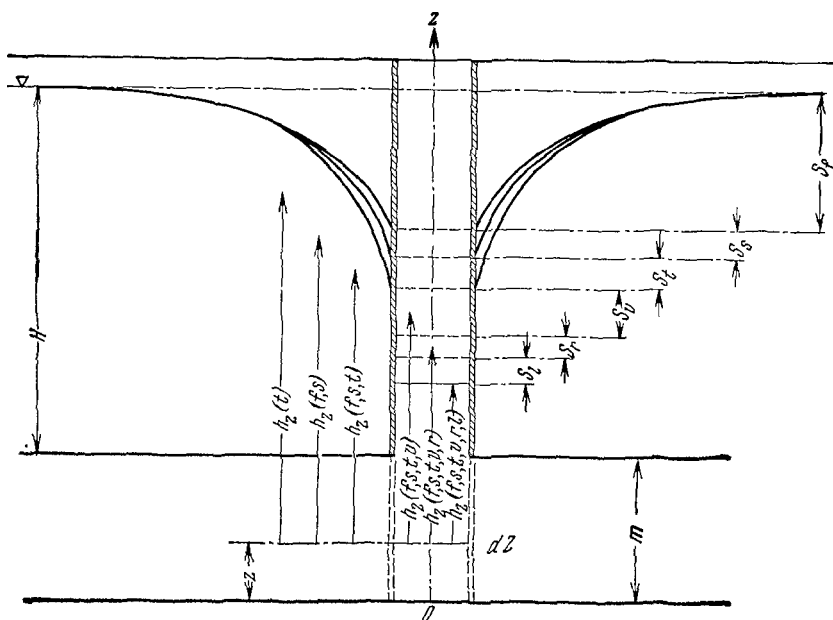


Рис. 6. Схема распределения гидравлических потерь и давлений в скважине и околоскважинной зоне в связи с преодолением потоком различных сопротивлений

$S_f$  — потери напора в связи с преодолением сопротивления фильтрующих пород при предположительно линейном режиме фильтрации. В связи с различием скоростей фильтрации на разных уровнях  $S_f = f(z)$ . При  $z = m$  значение  $S_{fm} = S_{f\max}$ . Средневзвешенное значение фильтрационных потерь напора в пласте  $S_{fi} = \frac{1}{m_i} \int_{m_i} S_f dz$ . Следует отметить, что во все расчетные уравнения

водопритока в скважину входят именно величины  $S_{fi}$ .

$h_z(f)$  — напор в сечении  $z$  (нуль отсчета совмещен с подошвой водоносного пласта) на стенке скважины (наружной стенке фильтра) в предположении, что поток преодолевает только сопротивление фильтрующих пород в линейном режиме фильтрации. В связи с различием скоростей фильтрации на разных уровнях  $h_z(f) = f(z)$ .

$S_s$  — дополнительное снижение напора в околоскважинной зоне в связи с возможным изменением проницаемости пород в результате бурения, кольматации и других процессов при условии сохранения в ней ламинарного режима фильтрации  $S_s = f(z)$ . При  $z = m$  значение  $S_{sm} = S_{s\max}$ . Средневзвешенное значение этой части потерь напора в пределах пласта  $S_{si} = \frac{1}{m_i} \int_{m_i} S_s dz$ .

$h_z(f, s)$  — напор в сечении  $z$  на стенке скважины (наружной стенке фильтра) в связи с возможным наличием дополнительного сопротивления измененной части пласта.

$S_t$  — дополнительное снижение напора в околоскважинной зоне в связи с возможным переходом режима фильтрации в квадратичную область,  $S_t = f(z)$ . Если  $z = m$ , то  $S_{tm} = S_{t\max}$ . Средневзвешенное значение этой части потерь напора в пределах пласта  $S_{ti} = \frac{1}{m_i} \int_{m_i} S_t dz$ .

$h_z(f, s, t)$  — напор в сечении  $z$  на стенке скважины (наружной стенке фильтра) в связи с возможным наличием дополнительного сопротивления при переходе потока в область турбулентного режима,  $h_z(f, s, t) = f(z)$ .

$S_v$  — дополнительное снижение напора в связи с прохождением потока через фильтр в скважину,  $S_v = f(z)$ . Если  $z = m$ , то  $S_{vm} = S_{v\max}$ . Средневзвешенное значение потерь напора на фильтре, установленном против данного пласта,

$$S_{vi} = \frac{1}{m_i} \int_{m_i} S_v dz.$$

$h_z(f, s, t, v)$  — напор в сечении  $z$  на внутренней стенке фильтра в результате дополнительного сопротивления фильтра,  $h_z(f, s, t, v) = f(z)$ .

$S_r$  — дополнительное снижение напора в фильтре в результате рассеяния энергии потока на преодоление касательных сил у его стенок, приобретение ускорения в направлении оси скважины в связи с присоединением бокового несжимаемого потока, перемещения частиц жидкости в потоке и самой массы потока,

$$S_r = f(z). \text{ Если } z = m, \text{ то } S_{rm} = S_{r\max}. S_{ri} = \int_{m_i} S_r dz + \sum_{i=1}^{i-1} S_{ri}.$$

$h_z(f, s, t, v, r)$  — напор в сечении  $z$  внутри скважины, образующийся в результате дополнительного внутреннего сопротивления фильтра,  $h_z(f, s, t, v, r) = f(z)$ .

$S_l$  — дополнительное снижение напора в результате преодоления потоком сопротивления трения в глухой части скважины (колоине) выше кровли водоносного пласта (фильтра). При рассмотрении функции водопритока по мощности водоносного пласта (фильтра) величину  $S_l$  можно считать независимой от  $z$ .

$h_z(f, s, t, v, r, l)$  — напор в сечении  $z$ , образованный наличием дополнительного сопротивления глухой части скважины. Поскольку  $S_l = \text{const}$ , функция  $h_z(f, s, t, v, r, l)$  параллельна функции  $h_z(f, s, t, v, r)$ .

Обратимся снова к уравнению (III.7). Для случая гидравлических потерь, показанных на рис. 6, значения  $h_z$  и  $h_0$  можно выразить так:

$$h_z = h_z(f, s, t, v, r, l) = H - (S_f + S_s + S_t + S_v + S_r + S_l) - z; \quad (\text{III.8})$$

$$h_0 = h_0(f, s, t, v, r, l) = H - (S_{f0} + S_{s0} + S_{t0} + S_{v0} + S_{r0} + S_{l0}); \quad (\text{III.9})$$

где  $H$  — потенциальный (статический) напор на контуре депрессионной воронки;  $S_{f0}$ ,  $S_{s0}$ ,  $S_{t0}$ ,  $S_{v0}$ ,  $S_{r0}$  — соответствующие значения потерь напора на нулевом уровне ( $z=0$ ).

После подстановки (III.8) и (III.9) в (III.7) получим

$$\int_{q_0}^{q_z} \frac{dq^2}{gW^2} - (S_f - S_{f0}) - (S_s - S_{s0}) - (S_t - S_{t0}) - (S_v - S_{v0}) - (S_r - S_{r0}) + \\ + \int_0^z \frac{\lambda}{2gDW^2} q^2 dz = 0. \quad (\text{III.10})$$

Нетрудно заметить, что первый и последний члены уравнения (III.10) соответствуют известным из гидравлики записям энергетических составляющих так называемых «местных» потерь напора в напорном трубопроводе (первый член) и потерь напора «по длине» трубопровода (последний член). В соответствии с рассмотренным физическим содержанием различных гидравлических сопротивлений эти члены можно считать эквивалентными следующим составляющим потерь напора при фильтрации жидкости в скважину и движения по ней:

$$\int_{q_0}^{q_z} \frac{dq^2}{gW^2} - (S_f - S_{f0}) - (S_s - S_{s0}) - (S_t - S_{t0}) - (S_v - S_{v0}) = 0; \quad (\text{III.11})$$

$$\int_0^z \frac{\lambda}{2gDW^2} q^2 dz - (S_r - S_{r0}) = 0. \quad (\text{III.12})$$

Используя известное выражение величины гидравлического уклона потока в напорном трубопроводе, равное

$$dS_r = \frac{\lambda}{2gDW^2} q^2 dz, \quad (\text{III.13})$$

получим то же разделение уравнений.

Такое же разделение составляющих потерь напора получится, если предположить отсутствие сил трения внутри скважины. Если теперь продифференцировать уравнение (III.11) по  $z$ , то получим основное дифференциальное уравнение установившегося потока жидкости в скважине без учета сил трения по оси  $z$ . Решение его

будет соответствовать нахождению интегральной функции водопритока в скважину, т. е. уравнения расходограммы.

$$\frac{dq^2}{gW^2} - dS_f - dS_s - dS_t - dS_v = 0. \quad (\text{III.14})$$

Уравнение (III.14) отличается от уравнения, приведенного в работе [47], наличием членов  $dS_f$ ,  $dS_s$  и  $dS_t$ . Это означает, что в упомянутой физической модели притока [47] принято допущение о существовании в зафильтровой зоне плоскорадиального потока с постоянной в вертикальном разрезе скоростью, обуславливающей

$$h_z(f, s, t) = C - z \text{ при } C = \text{const} \quad (\text{III.15})$$

и соответственно

$$\frac{dS_f}{dz} = \frac{dS_s}{dz} = \frac{dS_t}{dz} = 0. \quad (\text{III.16})$$

Теоретическое значение потерь напора на входе в фильтр в этом случае будет соответствовать

$$S_v^T = h_z(f, s, t) - h_z(f, s, t, v, r, l) = S_f + S_s + S_t + S_v + \\ + S_r + S_l + C - H. \quad (\text{III.17})$$

Попробуем показать это, проанализировав материалы экспериментальных исследований Э. А. Грикевича, приведенных в его работе [47]. К сожалению, в методике экспериментальных исследований не было предусмотрено непосредственного измерения функции  $S_f + S_s + S_t = f(z)$  в зафильтровом пространстве. Поэтому наша задача состоит в том, чтобы обнаружить отсутствие этой функции в результатах расчетов потерь напора на фильтре на основании полученных Э. А. Грикевичем формул [47].

Проанализируем эти эксперименты, используя наши обозначения физических величин. Опыты проводились с перфорированной трубой, имитирующей скважину, окруженную водной средой [47, прилож. II], — первая серия опытов, и песчаной обсыпкой [47, прилож. IV] — вторая серия опытов. Методика проведенных экспериментов предусматривала измерение величин напоров, принятых в теоретической модели: в первой серии опытов априори было принято  $S_f + S_t = 0$ , во второй —  $S_f + S_t = \text{const}$ . Другими словами, напор в любой точке зафильтрового пространства на фиксированном расстоянии от фильтра считался только линейной функцией глубины. По условию устройства искусственной модели можно принять  $S_s = 0$ .

В первой серии опытов фактически измерялись уровень воды в лотке и показания во внутренних пьезометрах фильтра на различных высотах от его нижней кромки. На основании этих данных была подсчитана «фактическая» функция  $S_v^\Phi = f(z)$ , которая в этом опыте фактически равна

$$S_v^\Phi = H - z - h_z(f, t, v, r, l) = S_f + S_t + S_v + S_r + S_l. \quad (\text{III.18})$$

Определим физическое содержание разности между «фактическим» и «теоретическим» значениями потерь напора на фильтре

$$S_v^{\Phi} - S_v^T = H - C = \text{const.} \quad (\text{III.19})$$

Если учесть, что

$$h_z(f, t) = H - z - S_f - S_t, \quad (\text{III.20})$$

то из (III.15) фактически имеем

$$C = H - S_f - S_t. \quad (\text{III.21})$$

Однако предположив для данной модели априорно  $S_f + S_t \rightarrow 0$ , получаем, что  $C \rightarrow H$ , причем  $C < H$ . Таким образом,

$$S_v^{\Phi} - S_v^T = S_f + S_t. \quad (\text{III.22})$$

Экспериментальная функция  $S_v^{\Phi}$  неизбежно обладает погрешностью. Путем осреднения экспериментальных точек случайная часть погрешности может быть сведена к нулю. Систематическая же часть останется, поэтому фактически  $S_v^{\Phi} \pm \delta_{\Phi}$ , где  $\delta_{\Phi}$  — погрешность экспериментальной функции.

Для анализа результатов проведенного эксперимента Э. А. Грикевич рассчитал «теоретическую» функцию  $S_v^T = f(z)$ , используя значение коэффициента гидравлического сопротивления фильтра из независимого эксперимента. Поскольку экспериментальное значение коэффициента гидравлического сопротивления фильтра также содержит погрешность, то расчетная функция  $S_v^T$  будет содержать систематическую погрешность. Обозначим эту функцию через  $S_v^T \pm \delta_T$ , где  $\delta_T$  — некоторая погрешность расчетной функции. Подсчитаем теперь расхождение между фактическим значением потерь напора на фильтре и теоретическим

$$S_v^{\Phi} \pm \delta_{\Phi} - S_v^T \mp \delta_T = S_f + S_t \pm \delta_{\Phi} \mp \delta_T. \quad (\text{III.23})$$

По условию проведения анализируемых опытов  $\delta_{\Phi} \mp \delta_T = \text{const.}$  Поэтому разностная функция (III.23), если наше предположение о ненулевом и непостоянном значении  $S_f + S_t$  верно, должна изменяться по оси  $z$  с нарастанием от  $z=0$  до  $z=m$ . В опытах первой серии, где «фильтрующая среда» имела 100%-ную пористость, конечно, трудно ожидать значительного роста этой функции, а поскольку выявление такой функции не предусматривалось, точность эксперимента оказалась недостаточной, чтобы ее обнаружить в результатах. Общее приращение этой функции в опытах со скважностью фильтра 0,23% при максимальном расходе воды 0,557 л/с не превысило 3 мм. В опытах со скважностью 0,83% и максимальном расходе 1,96 л/с приращение уже было меньше 1 мм. При относительной малости значений этой функции приведенные результаты свидетельствуют о возможности применения полученных расчетных формул для рассматриваемой модели притока, т. е. для фильтра, окруженного сплошной водной средой.

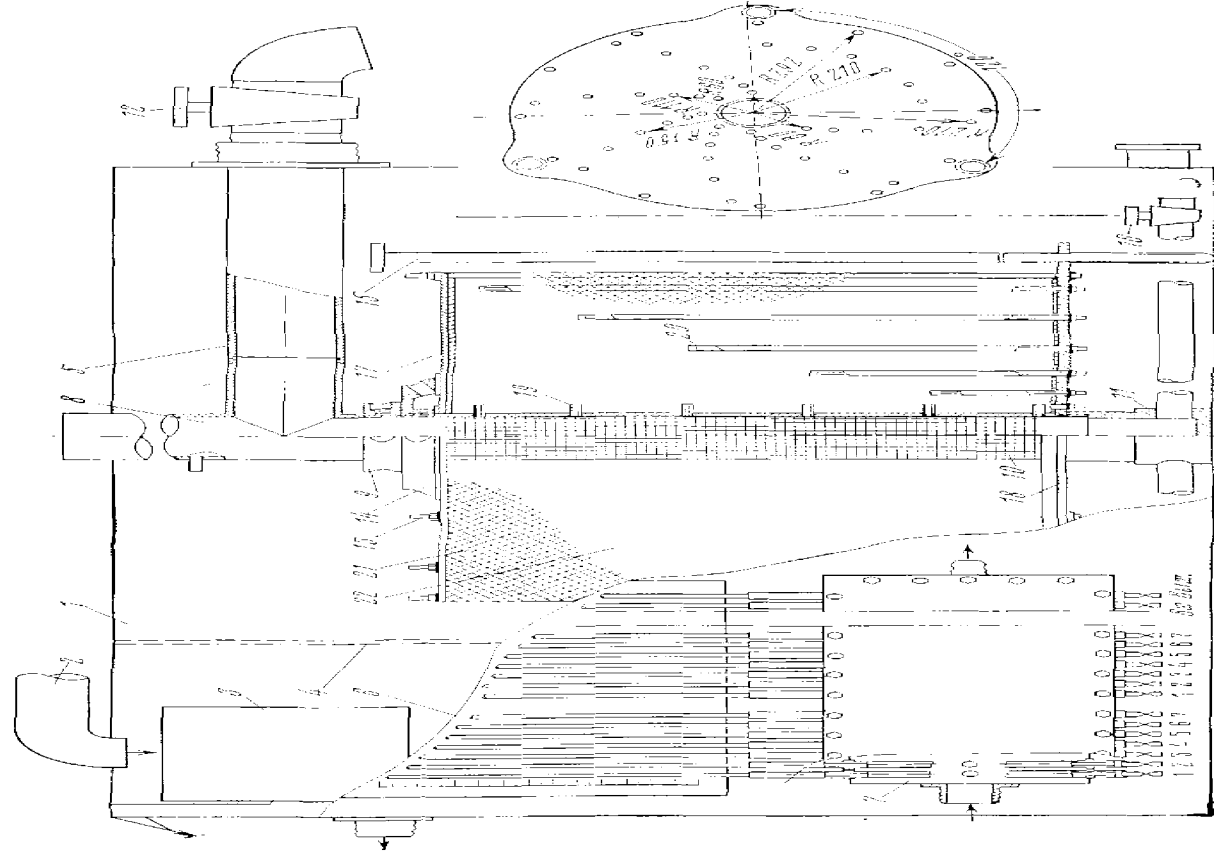


Рис. 7. Физическая модель реактора с постоянным контуром в осевом сечении.

1 — бак; 2 — водород; 3 — датчик; 4 — датчик; 5 — датчик; 6 — датчик; 7 — датчик; 8 — датчик; 9 — датчик; 10 — датчик; 11 — датчик; 12 — датчик; 13 — датчик; 14 — датчик; 15 — датчик; 16 — датчик; 17 — датчик; 18 — датчик; 19 — датчик; 20 — датчик; 21 — датчик; 22 — датчик.

Однако все же важно выяснить принципиальную правомерность такой физической схематизации притока даже в подобных экстремальных условиях. Поэтому мы фактически повторили эксперименты Э. А. Грикевича, построив подобную модель, но со встроенными пьезометрами в зафильтовое пространство. Вид модели показан на рис. 7. На рис. 8 представлены расходограммы, получен-

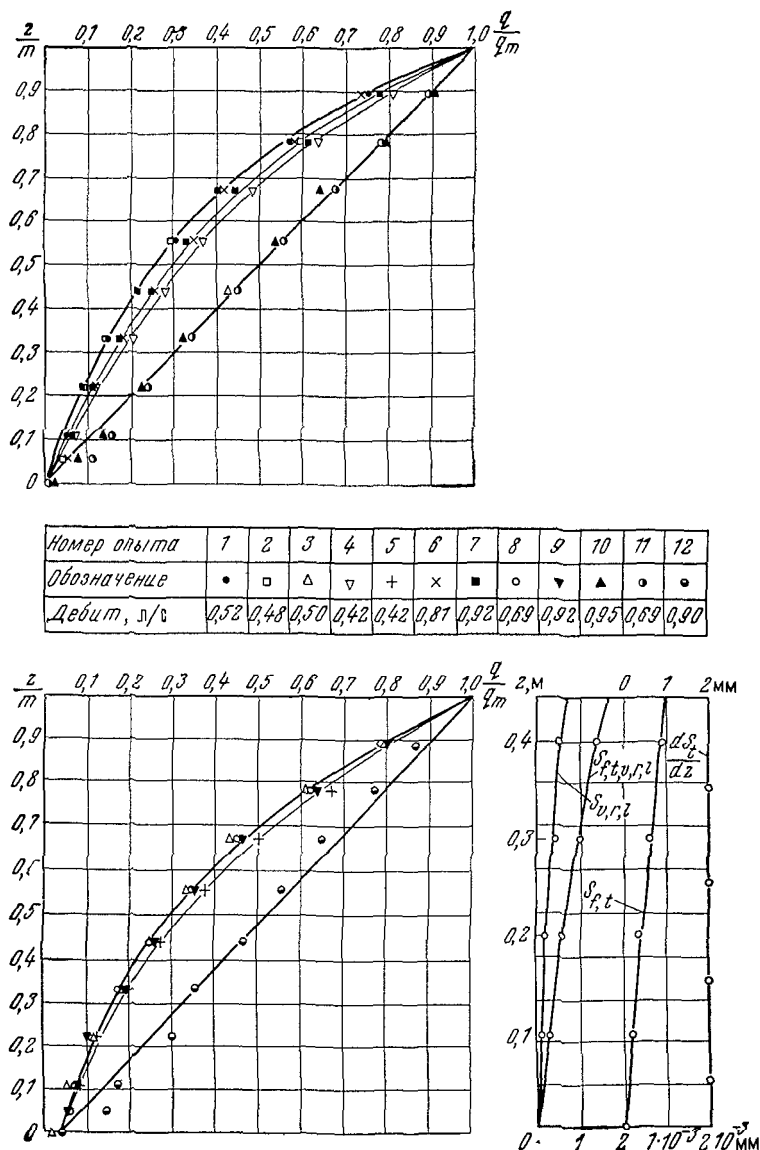


Рис. 8 Экспериментальные расходограммы и функции потерь напора в физической модели фильтра в напорном пласте с «нулевым» сопротивлением



ные в этой экспериментальной модели напорного пласта с фильтром, окруженным водой (среда с «нулевым» сопротивлением). С помощью патрубка для выпуска воды моделировалась откачка с постоянным дебитом. С помощью донного патрубка задавался приток с забоя, что соответствовало случаю работы фильтра с транзитным потоком по стволу скважины. В процессе откачки на контуре пласта поддерживался постоянный напор. В пространстве модели пласта располагались пьезометры для измерения давления на различных высотах над подошвой пласта и на различном удалении от стенки фильтра. Кроме того, пьезометры были введены внутрь фильтра для измерения давлений вдоль оси  $z$ . Всего было выстроено 36 пьезометров: шесть по радиусу модели и шесть по ее высоте.

Значения расхода внутри фильтра на различных глубинах измерялись с помощью специального миниатюрного тахометрического расходомера на базе прибора ТСР-34/70.

В первой серии опытов использовался фильтр из перфорированной трубы диаметром 81 мм и высотой 450 мм. Перфорация выполнена сверлом 5 мм по сетке, поэтому на поверхности трубы было равномерно просверлено  $58 \times 24$  отверстия. На трубу дополнительно наложен один слой сетки галунного плетения. При условии  $q_0 = 0$  проведено четыре откачки с разным дебитом. При условии  $q_0 > 0$  проведено три откачки также с различным дебитом на выходе и постоянным значением  $q_0$ . Форма полученных расходограмм показана на рис. 8. Расходограммы построены в безразмерных координатах. Порядок проведения опытов обозначен соответствующим номером кривой. Интересно обратить внимание на следующие частные результаты проведенных опытов. Опыты 1, 2, 3 проведены вскоре после заполнения лотка водой. Полученные расходограммы опытов 1 и 2 полностью совпали, так как их форма в безразмерных координатах определяется коэффициентом гидравлического сопротивления, который для данной модели постоянен. В последующие двое суток опыты не проводились, но лоток оставался заполненным водой. За это время сетка фильтра обильно покрылась пузырьками воздуха. Можно было предположить, что они изменяют сопротивление фильтра. Эксперименты были повторены в порядке, соответствующем номерам опытов с 4 по 9. Выделившийся воздух, видимо, действительно, ухудшил сопротивление фильтра, так как расходограммы сдвинулись вправо, что соответствует большим значениям коэффициента сопротивления. По мере работы модели, т. е. с увеличением номера эксперимента и дебита моделируемой откачки, расходограммы смещаются постепенно влево к первоначальному положению, что, видимо, связано с некоторым очищением поверхности фильтра.

Во второй серии опытов на фильтр была дополнительно наложена в несколько слоев плотная капроновая сетка. При условии  $q_0 = 0$  зарегистрированы две расходограммы 10, 11 и при  $q > 0$  одна — 12. На рис. 8 они хорошо аппроксимируются прямыми линиями, что свидетельствует о равномерной скорости входа воды в

фильтр по его длине. Сопротивление фильтра в этой серии опытов было, несомненно, увеличено.

На этом же рисунке показаны также кривые потерь напора, полученные по показаниям пьезометров в опыте 1. Кривая  $S_{v,t,l} = h_z(f, t) - h_z(f, v, r, l) = S_v + S_t + S_l$  соответствует разности между показаниями во внутренних пьезометрах и ближних к его наружной стенке, кривая  $S_{f,t,l} = H - z - h_z(f, t, v, r, l) = S_f + S_t + S_v + S_r + S_l$  — разности показаний напоров, измеренных во внутренних пьезометрах и пьезометрах, равноудаленных от фильтра и боковых границ пласта (3 и 4 ряды). В этих пьезометрах фиксировался постоянный напор по высоте модели, который принят равным пластовому. Кривая  $S_{f,t}$  соответствует разности значений  $S_{f,t,v,r,l} - S_{v,r,l}$ . Кривая  $\frac{dS_{f,t}}{dz}$  получена методом графического дифференцирования.

Эти результаты показывают, что в принципе не существует среды с нулевым сопротивлением, поскольку даже в воде  $\frac{dS_{f,t}}{dz} > 0$ . Однако изменения функции  $S_{f,t}$  по высоте модели невелики и соответствуют значениям, полученным в опытах Э. А. Грикевича. Поэтому проанализируем далее материалы второй серии опытов. В этой серии опытов [47, прилож. IV] измерения напоров производились в пяти радиально установленных пьезометрах в подошве пласта, обеспечивших величину  $h_0(f, t)$ , и в пяти пьезометрах внутри фильтра, обеспечивших значения  $h_z(f, t, v, r, l)$ .

На основании этих данных была подсчитана фактическая функция  $S_v^\Phi = f(z)$ , которая при данной схеме измерения фактически равна

$$S_v^\Phi = h_0(f, t) - z - h_z(f, t, v, r, l) = (S_f - S_{f0}) + (S_t - S_{t0}) + S_v + S_r + S_l. \quad (\text{III.24})$$

Нетрудно видеть, что полученное таким образом «фактическое» значение потерь напора на фильтре завышено по сравнению с тем, которое должно было быть. Принимая полученное значение потерь напора против верхней кромки фильтра в качестве опорного и подставив его в соответствующую формулу потерь напора на фильтре, Э. А. Грикевич [47] определил значение коэффициента гидравлического сопротивления фильтра. Затем была рассчитана теоретическая функция  $S_v^\tau = f(z)$ . Очевидно, что используя завышенное значение потерь напора в конечном сечении фильтра, он получил также завышенное значение сопротивления и завышенные значения функции  $S_v^\tau$ . Понятно, что на верхней кромке фильтра  $S_v^\Phi = S_v^\tau$ , а на всех других глубинах должна появиться разница, возрастающая по абсолютной величине от верхней к нижней кромке фильтра. При этом следует ожидать выполнение соотношения  $S_v^\Phi < S_v^\tau$ .

Определим физическое содержание этой разности, используя (III.24) и (III.17).

$$S_v^\Phi - S_v^\tau = H - C - S_{f0} - S_{t0}. \quad (\text{III.25})$$

Если предпосылка о линейности функции напора в зафильтровом пространстве верна, то из (III.25) должно следовать

$$C = H - S_{f0} - S_{t0} \quad (\text{III.26})$$

и

$$S_v^\Phi - S_v^\tau = 0.$$

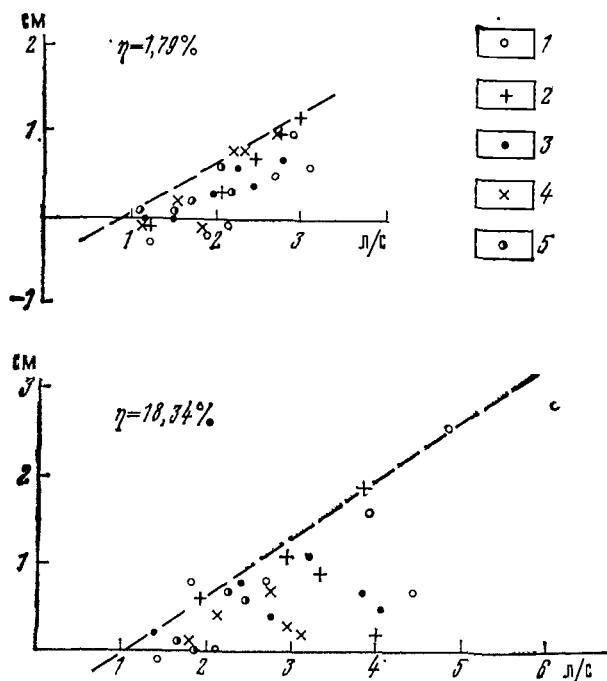


Рис. 9. Зависимость  $S_v^\tau - S_v^\Phi$  на нижней границе фильтра от величины расхода и материала обсыпки. По опытам Э. А. Грикевича.

1—10  $\leq d \leq 20$ ; 2—5  $\leq d \leq 7$ ; 3—3  $\leq d \leq 5$ ; 4—1  $\leq d \leq 3$ ; 5—0,6  $\leq d \leq 1$

Если учесть (III.20), то для  $C$  следует считать справедливым выражение (III.21). Тогда

$$S_v^\Phi - S_v^\tau = (S_f - S_{f0}) + (S_t - S_{t0}). \quad (\text{III.27})$$

Это хорошо подтверждают эксперименты Э. А. Грикевича [47]. Из 64 опытов с различными скважностью фильтра, зернистостью песка и значениями расхода в 55 опытах четко проявляется тенденция закономерного роста абсолютных величин разности  $S_v^\Phi - S_v^\tau$  в направлении от верхней к нижней границе фильтра. В 46 опы-

тах эта разность имеет знак «минус». На нижней границе фильтра в проведенных опытах расхождение достигают 60%. Величина расхождения зависит от совокупности следующих факторов: расхода, зернистости материала и скважности фильтра. Однако, как видно из проведенных опытов, результаты которых сведены на рис. 9, эта величина зависит в первую очередь от расхода, что непосредственно указывает на проявление функций  $S_f$  и  $S_t$ .

Из рассмотрения результатов проведенных экспериментов следует, что условие  $S_f + S_t = \text{const}$ , принятое в исходных моделях притока к скважине [25, 47, 99, 154], не соответствует реальному. Погрешность в оценке потерь напора на фильтре, получаемая на основании такой математической модели, достигает значительных величин и зависит от фильтрационных свойств пород, определение которых и является задачей исследований.

Таким образом, записанное нами уравнение (III.14) является физически обоснованным и будет более точно характеризовать формирование притока в скважину вдоль ее фильтрующей поверхности.

## 2. ИНТЕГРАЛЬНАЯ ФУНКЦИЯ ВОДОПРИТОКА В СКВАЖИНУ ИЗ ОДНОРОДНОГО ПЛАСТА (УРАВНЕНИЕ РАСХОДОГРАММЫ ДЛЯ ОДНОРОДНОГО ПЛАСТА)

Для получения интегральной функции водопритока решим уравнение (III.14), выразив  $dS_f$ ,  $dS_s$ ,  $dS_t$  и  $dS_v$  через формирующие их значения притоков воды в скважину.

По условию распределения потерь напора, данном на рис. 10, приток из каждого элементарного слоя ненарушенного изотропного пласта в установившемся линейном режиме фильтрации может быть записан в общем виде

$$dq = \frac{1}{\varphi_f'} S_f dz, \quad (\text{III.28})$$

где  $S_f = f(z)$ ;

$\varphi_f'$  — коэффициент сопротивления ненарушенного изотропного пласта при ламинарном режиме фильтрации в границах от  $r=r_0$  до  $r \rightarrow R$ .

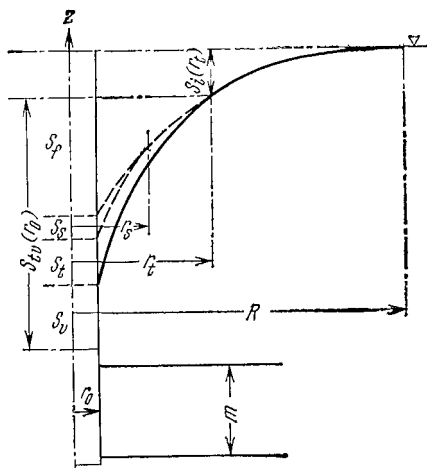


Рис 10. Распределение потерь напора в прискважинной зоне

После дифференцирования (III.28) по  $z$  получим

$$dS_f = \varphi_f' \frac{d^2 q}{dz^2} dz. \quad (\text{III.29})$$

Выражение для  $dS_s$  получим из следующих соображений. Пусть коэффициент сопротивления пласта в зоне  $r=r_s$  с нарушенной проницаемостью при сохранении ламинарной фильтрации будет  $\varphi_s$ . В этом случае понижение в скважине при отсутствии других сопротивлений будет равно

$$S_f + S_s = \varphi_f'' \frac{dq}{dz} + \varphi_s \frac{dq}{dz}, \quad (\text{III.30})$$

где  $S_s = f(z)$ ;

$\varphi_f'$  — коэффициент сопротивления пласта за пределами зоны с радиусом  $r_s$ .

Откуда

$$S_s = \varphi_s \frac{dq}{dz} + \varphi_f'' \frac{dq}{dz} - \varphi_f' \frac{dq}{dz} \quad (\text{III.31})$$

и

$$dS_s = \varphi_s \frac{d^2q}{dz^2} dz + \varphi_f'' \frac{d^2q}{dz^2} dz - \varphi_f' \frac{d^2q}{dz^2} dz. \quad (\text{III.32})$$

Пусть далее в связи с переходом потока в турбулентную область фильтрации сопротивление охватываемой им области будет  $\varphi_t$ . Тогда с учетом этого дополнительного сопротивления понижение в скважине может быть записано в виде

$$S_f + S_s + S_t = \varphi_f \frac{dq}{dz} + \varphi_t \left( \frac{dq}{dz} \right)^2, \quad (\text{III.33})$$

где  $S_t = f(z)$ ;

$\varphi_f$  — коэффициент сопротивления пласта за пределами зоны с радиусом  $r_t$ .

Тогда с учетом (III.28) и (III.31)

$$S_t = \varphi_t \left( \frac{dq}{dz} \right)^2 + \varphi_f \frac{dq}{dz} - \varphi_f'' \frac{dq}{dz} - \varphi_s \frac{dq}{dz} \quad (\text{III.34})$$

и

$$dS_t = 2\varphi_t \frac{d^2q}{dz^2} \frac{dq}{dz} dz + \varphi_f \frac{d^2q}{dz^2} dz - \varphi_f'' \frac{d^2q}{dz^2} dz - \varphi_s \frac{d^2q}{dz^2} dz. \quad (\text{III.35})$$

Потеря напора при истечении воды в скважину через отверстия фильтра в пределах элементарного слоя  $dz$  может быть записан уравнением Торичелли

$$dq = \sqrt{\frac{S_v}{\varphi_v}} dz, \quad (\text{III.36})$$

где  $S_v = f(z)$ .

Продифференцировав по  $z$ , получим

$$dS_v = 2\varphi_v \frac{d^2q}{dz^2} \frac{dq}{dz} dz. \quad (\text{III.37})$$

Строго говоря, коэффициенты сопротивления  $\varphi_f$ ,  $\varphi_s$ ,  $\varphi_t$  и  $\varphi_v$  являются функциями глубины. Однако для упрощения задачи в пределах однородного пласта считаем их постоянными. Это оправдывается способом решения обратной задачи, что будет показано ниже.

Подставив найденные значения дифференциалов (III.29), (III.32), (III.35) и (III.37) в уравнение (III.14), получим

$$\varphi_c \frac{dq^2}{dz} - 2(\varphi_t + \varphi_v) \frac{d^2q}{dz^2} \frac{dq}{dz} - \varphi_f \frac{d^2q}{dz^2} = 0, \quad (\text{III.38})$$

где  $\varphi_c = \frac{1}{gW^2}$  — коэффициент сопротивления ствола скважины.

Получилось нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка, решение которого даст уравнение интегральной функции водопритока, которое тождественно уравнению расходограммы для однородного пласта при действии всех названных гидравлических сопротивлений.

Запишем уравнение (III.38) в относительных координатах  $q^* = \frac{q}{m}$  и  $z^* = \frac{z}{m}$  (где  $m$  — мощность пласта,  $q_m$  — расход на уровне его кровли).

$$(\varphi_t^* + \varphi_v^*) \frac{d^2q^*}{dz^{*2}} \frac{dq^*}{dz^*} + \varphi_f \frac{d^2q^*}{dz^{*2}} - \varphi_c^* \frac{dq^*}{dz^*} q^* = 0, \quad (\text{III.39})$$

где

$$\varphi_c^* = \frac{\varphi_c q_m^2}{m}; \quad \varphi_v^* = \frac{\varphi_v q_m^2}{m^3}; \quad \varphi_t^* = \frac{\varphi_t q_m^2}{m^3}; \quad \varphi_f^* = \frac{\varphi_f q_m}{2m^2};$$

$\varphi_c^*$ ,  $\varphi_v^*$ ,  $\varphi_t^*$ ,  $\varphi_f^*$  — безразмерные коэффициенты соответственно сопротивления ствола скважины, фильтра, зоны турбулентного режима и пласта в зоне ламинарного режима.

Приведем уравнение (III.39) к виду

$$\frac{d^2q^*}{dz^{*2}} \frac{dq^*}{dz^*} + \Phi^* \frac{d^2q^*}{dz^{*2}} - \Psi^* \frac{dq^*}{dz^*} q^* = 0, \quad (\text{III.40})$$

где

$$\Phi^* = \frac{\varphi_f^*}{\varphi_v^* + \varphi_t^*};$$

$$\Psi^* = \frac{\varphi_c^*}{\varphi_v^* + \varphi_t^*}.$$

Решение (III.40) будем искать методом последовательного понижения порядка уравнения при следующих начальных и граничных условиях\*:

\* Решение уравнения (II.40) получено В. Ч. Ли.

$$\left. \begin{aligned} q^*|_{z^*=0} &= q_0^* \geq 0; \\ q^*|_{z^*=1} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.41})$$

Введем обозначение  $p = \frac{dq^*}{dz^*}$ , рассматривая  $p$  как функцию  $q^*$ .  
Вычислим вторую производную

$$\frac{d^2q^*}{dz^{*2}} = \frac{dp}{dz^*} \frac{dq^*}{dz^*} = p \frac{dp}{dq^*}.$$

Вместо (III 41) получим

$$\frac{dp}{dq^*} (\Phi^* p + p^2) = \psi^* q^* p. \quad (\text{III.42})$$

Из (III 42) выделим решение, где  $p=0$ . Это соответствует случаю  $q^* = \text{const}$ , что при заданных начальных условиях означает  $q^* = q_0^*$ . Следовательно, предстоит найти решение дифференциального уравнения вида

$$(\Phi^* + p) dp = \psi^* q^* dq^*. \quad (\text{III.43})$$

После интегрирования получаем \*

$$p = \sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} - \Phi^*.$$

Возвращаясь к первоначальным переменным, имеем

$$\frac{dq^*}{dz^*} = \sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} - \Phi^*. \quad (\text{III.44})$$

После разделения переменных решение будет найдено путем интегрирования уравнения

$$\int \frac{dq^*}{\sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} - \Phi^*} = \int dz^*. \quad (\text{III.45})$$

Воспользовавшись первой подстановкой Эйлера  $\sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} = \sqrt{\psi^*} q^* + t$ , окончательное решение дифференциального уравнения (III.40) получаем в виде

$$\begin{aligned} & \ln (\sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} - \sqrt{\psi^*} q^*) + \frac{2\Phi^*}{\sqrt{C_1 - \Phi^{*2}}} \operatorname{arctg} \times \\ & \times \frac{\sqrt{\psi^* q^{*2} + C_1} - \sqrt{\psi^*} q^* - \Phi^*}{\sqrt{C_1 - \Phi^{*2}}} + z^* \sqrt{\psi^*} - C_2 = 0. \end{aligned} \quad (\text{III.46})$$

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  находятся из граничных условий (III 41).

Из анализа коэффициента  $C_1$  областью его определения будет

$$\Phi^{*2} < C_1 < \left[ \frac{\sqrt{\psi^*} (e^{\sqrt{\psi^*}} - q_0^{*2})}{2 (e^{\sqrt{\psi^*}} - q_0^*)} \right]^2.$$

\* Согласно смыслу задачи учитывается только один корень уравнения

Таким образом, интегральная функция водопритока из однородного пласта в скважину через фильтр вдоль его образующей для общей физической модели притока, схематизированной на рис. 10, выражается уравнением (III.46) с учетом условий (III.41) на его границах.

На рис. 11 и 12 приведены семейства теоретических расходограмм, рассчитанных на ЭВМ-222 по уравнению (III.46) для различных начальных и граничных условий и параметров\*.

Анализ полученных численных решений показал, что положение расходограмм весьма сложным образом зависит от параметров системы. Общей закономерностью является выравнивание расходограмм с уменьшением отношения  $\psi^*/\Phi^*$ . Однако шифр  $\psi^*/\Phi^*$  является указателем не конкретного положения данной расходограммы, а семейства расходограмм, группирующихся возле нанесенной на рис. 11 кривой. Иными словами, для каждого значения  $\psi^*/\Phi^*$  имеется некоторая область существования функции (III.46). Более выражено положение расходограммы в зависимости от шифров  $\psi^*$  и  $\Phi^*$ , однако, однозначно определяют положение кривой только значения  $\Phi_c^*$ ,  $\Phi_v^*$ ,  $\Phi_t^*$  и  $\Phi_f^*$ . С уменьшением сопротивления  $\Phi_c^*$  и ростом сопротивления  $\Phi_v^*$ ,  $\Phi_t^*$  и  $\Phi_f^*$  расходограммы приобретают тенденцию к спрямлению. Это можно использовать для искусственного управления значениями безразмерных сопротивлений, поскольку они зависят от мощности пласта при прочих неизменных характеристиках. В частности, используя прием формального разбиения расходограммы на кусочные отрезки, можно представить ее в виде семейства квазиоднородных интервалов фильтрации с требуемыми значениями безразмерных коэффициентов сопротивления. Такой прием дает возможность перейти от общей схемы физической модели притока к частным для выбора способа приближенного решения обратной задачи.

Частный случай 1. Пусть  $dS_v=0$ , т. е. отсутствует фильтр. При этом условии  $S_v=0$  и  $\Phi_v=0$ . Подстановка (III.29), (III.32) и (III.35) в уравнение (III.14) приводит его к виду

$$\varphi_t \frac{d^2 q}{dz^2} - \frac{dq}{dz} + \varphi_f \frac{d^2 q}{dz^2} - \varphi_c \frac{dq}{dz} q = 0. \quad (\text{III.47})$$

или, перейдя к относительным координатам и безразмерным коэффициентам сопротивления,

$$\frac{d^2 q^*}{dz^{*2}} - \frac{dq^*}{dz^*} + \Phi_1^* \frac{d^2 q^*}{dz^{*2}} - \psi_1^* \frac{dq^*}{dz^*} q^* = 0. \quad (\text{III.48})$$

где

$$\Phi_1^* = \frac{\Phi_f^*}{\Phi_t^*};$$

$$\psi_1^* = \frac{\Phi_c^*}{\Phi_t^*}.$$

\* Расчеты выполнены В. М. Дядиченко.



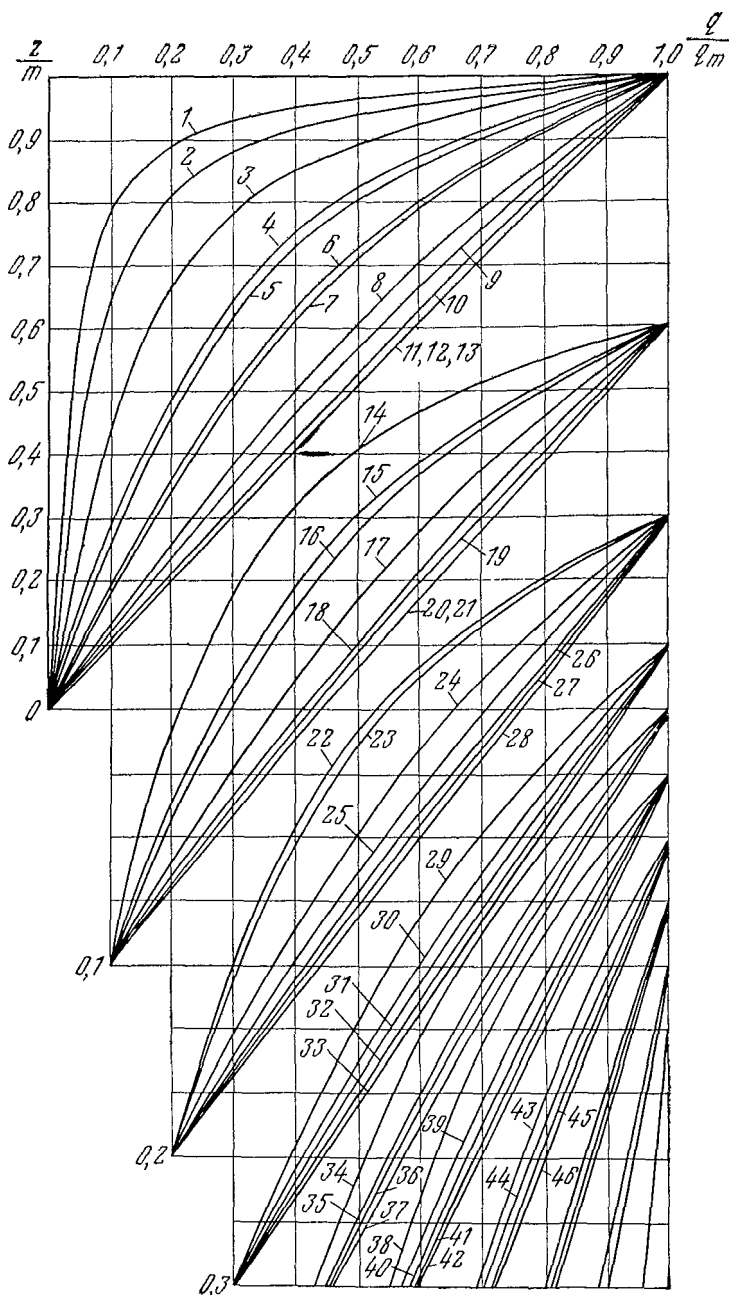


Рис 11. Теоретические расходограммы для однородного пласта в неоднородной водоносной системе, вскрытой реальной скважиной.

Шифр кривых ( $\Psi^*$ ,  $\Phi^*$ ),  $\Psi^*/\Phi^*$ ; шифр групп  $q_0^*$ .

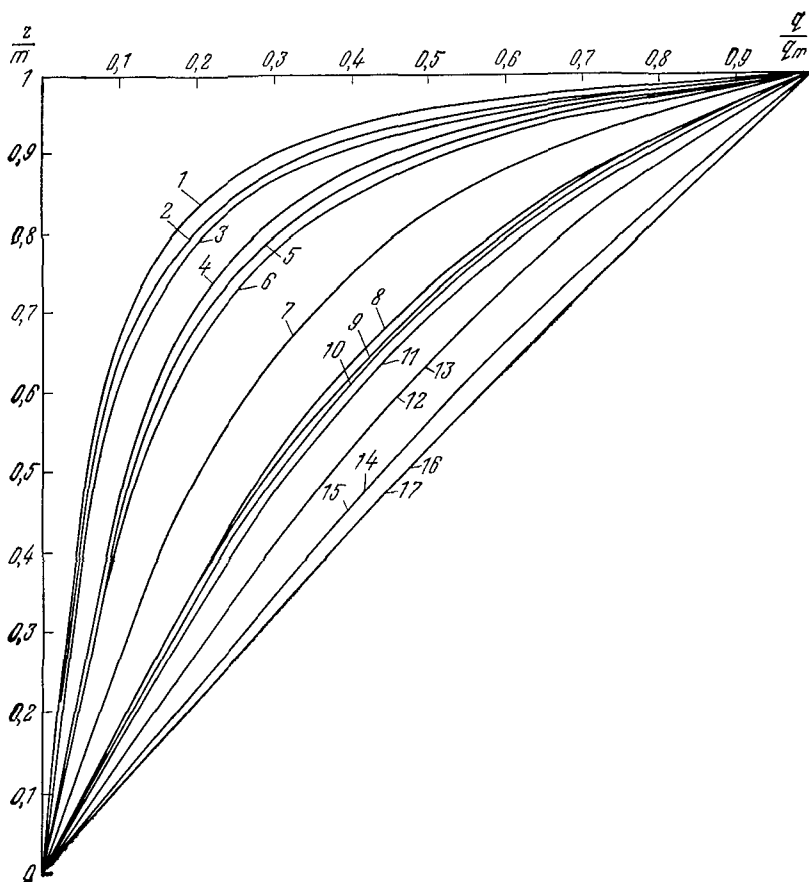


Рис. 12. Теоретические расходограммы для однородного одиночного пласта в реальной скважине.

Шифр кривых  $\left( \frac{1}{2} \Phi_i^*, \Phi_o^*, \Phi_l^* \right), (\psi^*, \Phi^*), \psi^*/\Phi^*$

1— $(4 \cdot 10^{-4}, 8 \cdot 10^{-6}, 2 \cdot 10^{-2})$  (2500, 50) 50; 2— $(4 \cdot 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-5}, 2 \cdot 10^{-2})$  (500, 10) 50; 3— $(4 \cdot 10^{-4}, 8 \cdot 10^{-6}, 2 \cdot 10^{-2})$  (250, 5) 50; 4— $(4 \cdot 10^{-4}, 8 \cdot 10^{-6}, 10^{-2})$  (1250, 50) 25; 5— $(4 \cdot 10^{-4}, 4 \cdot 10^{-5}, 10^{-2})$  (250, 10) 25; 6— $(4 \cdot 10^{-4}, 8 \cdot 10^{-6}, 10^{-2})$  (125, 5) 25; 7— $(2 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-5}, 2 \cdot 10^{-2})$  (250, 25) 10; 8— $(4 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 0,5 \cdot 10^{-2})$  (2,5, 0,5) 5; 9— $(2 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-5}, 2 \cdot 10^{-2})$  (2,5, 0,5) 5; 10— $(4 \cdot 10^{-4}, 10^{-4}, 0,5 \cdot 10^{-2})$  (50, 10) 5; 11— $(4 \cdot 10^{-4}, 8 \cdot 10^{-5}, 0,5 \cdot 10^{-2})$  (25, 5) 5; 12— $(4 \cdot 10^{-3}, 4 \cdot 10^{-5}, 10^{-2})$  (250, 100) 2,5; 13— $(4 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 2 \cdot 10^{-2})$  (1250, 500) 2,5; 14— $(2 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 0,5 \cdot 10^{-2})$  (250, 250) 1; 15— $(2 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 0,5 \cdot 10^{-2})$  (25, 25) 1; 16— $(4 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 2 \cdot 10^{-3})$  (250, 500) 0,5; 17— $(4 \cdot 10^{-3}, 8 \cdot 10^{-6}, 2 \cdot 10^{-2})$  (25, 50) 0,5

К рис. 11

1—(1000, 10) 100; 2—(500, 10) 50; 3—(1000, 50) 20; 4—(1000, 100) 10; 5—(100, 10) 10; 6—(500, 100) 5; 7—(50, 10) 5; 8—(100, 50) 2; 9—(10, 10) 1; 10—(50, 100) 0,5; 11—(10, 50) 0,2; 12—(10, 100) 0,1; 13—(10, 1000) 0,01; 14—(500, 50) 10; 15—(500, 100) 5; 16—(50, 10) 5; 17—(1000, 500) 2; 18—(100, 100) 1; 19—(50, 100) 0,5; 20—(10, 100) 0,1; 21—(50, 500) 0,01; 22—(500, 100) 5; 23—(50, 10) 5; 24—(1000, 500) 2; 25—(500, 500) 1; 26—(50, 100) 0,5; 27—(10, 50) 0,2; 28—(10, 500) 0,02; 29—(1000, 500) 2; 30—(500, 500) 1; 31—(50, 100) 0,5; 32—(100, 500) 0,2; 33—(10, 500) 0,02; 34—(100, 50) 2; 35—(100, 100) 1; 36—(50, 100) 0,5; 37—(10, 50) 0,2; 38—(100, 50) 2; 39—(500, 500) 1; 40—(50, 100) 0,5; 41—(10, 50) 0,2; 42—(100, 1000) 0,1; 43—(500, 500) 1; 44—(50, 100) 0,5; 45—(100, 500) 0,2; 46—(10, 500) 0,2;

Уравнение (III 48) аналогично (III 40) В результате получаем решение в виде (III 46) с коэффициентами  $\Phi_1^*$  и  $\psi_1^*$

$$\ln \left( \sqrt{\psi_1^* q^{*2} + C_1} - \sqrt{\psi_1^* q^*} \right) + \frac{2\Phi_1^*}{\sqrt{C_1 - \Phi_1^{*2}}} \times \\ \times \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{\psi_1^* q^{*2} + C_1} - \sqrt{\psi_1^* q^*} - \Phi_1^*}{\sqrt{C_1 - \Phi_1^{*2}}} + z^* \sqrt{\psi_1^*} - C_2 = 0. \quad (\text{III.49})$$

Как видно, наличие или отсутствие фильтра принципиально не меняет характера формирования интегральной функции водопритока.

Частный случай 2. Пусть  $dS_f = 0$ , т. е. при понижении  $S_f$ , если предполагается отсутствие других сопротивлений, поток в пределах пласта является плоскорадиальным с постоянной по вертикали величиной  $\frac{dq}{dz} = \text{const}$ , соответствующей выполнению предпосылки Дюпюи для однородного пласта. Считается, что деформация потока в вертикальной плоскости в этой модели притока связана с наличием сопротивлений  $\varphi_s$ ,  $\varphi_t$  и  $\varphi_v$

С введением такого условия вместо (III.32) имеем

$$dS_s = \varphi_s \frac{d^2 q}{dz^2} dz. \quad (\text{III.50})$$

Аналогично вместо (III.34) будет

$$ds_t = \varphi_t \frac{d^2 q}{dz^2} \frac{dq}{dz} dz - \varphi_s \frac{d^2 q}{dz^2} dz. \quad (\text{III.51})$$

Подстановка (III.50), (III 51) и (III.38) в уравнение (III.14) приводит его к виду

$$\varphi_c \frac{dq^2}{dz} - (\varphi_t + \varphi_v) \left( \frac{dq}{dz} \right)^2 = 0. \quad (\text{III.52})$$

Поскольку физическому смыслу задачи соответствует область  $\frac{dq}{dz} \neq 0$ , то в результате имеем следующее исходное дифференциальное уравнение:

$$\frac{d^2 q}{dz^2} - \psi_2 q = 0, \quad (\text{III.53})$$

где

$$\psi_2 = \frac{\varphi_c}{\varphi_t + \varphi_v}.$$

Общее решение уравнения (III 53) найдем в виде

$$q = C_1 e^{-\alpha_2 z} + C_2 e^{\alpha_2 z}, \quad (\text{III.54})$$

где  $\alpha_2^2 = \psi_2$ .

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  определим из начальных и граничных условий

$$\left. \begin{aligned} q|_{z=0} &= q_0 \geq 0; \\ q|_{z=m} &= q_m. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.55})$$

Составив систему уравнений (III.54) для этих условий и решив ее, получим

$$C_1 = \frac{q_m - q_0 e^{\alpha_2 m}}{e^{-\alpha_2 m} - e^{\alpha_2 m}};$$

$$C_2 = \frac{q_0 e^{-\alpha_2 m} - q_m}{e^{-\alpha_2 m} - e^{\alpha_2 m}}.$$

Таким образом, уравнение (III.54) будет иметь вид

$$q = q_m \frac{e^{-\alpha_2 z} - e^{\alpha_2 z}}{e^{-\alpha_2 m} - e^{\alpha_2 m}} + q_0 \frac{e^{-\alpha_2(m-z)} - e^{\alpha_2(m-z)}}{e^{-\alpha_2 m} - e^{\alpha_2 m}} \quad (\text{III.56})$$

или

$$q = q_m \frac{\text{sh } \alpha_2 z}{\text{sh } \alpha_2 m} + q_0 \frac{\text{sh } \alpha_2 (m - z)}{\text{sh } \alpha_2 m}. \quad (\text{III.57})$$

Уравнение (III.57) по форме аналогично уравнению, полученному Э. А. Грикевичем [47], но имеет другое физическое содержание.

Представим уравнение (III.57) в относительных координатах с безразмерными коэффициентами сопротивления

$$q^* = \frac{\text{sh } \alpha_2^* z^*}{\text{sh } \alpha_2^*} + q_0^* \frac{\text{sh } \alpha_2^* (1 - z^*)}{\text{sh } \alpha_2^*}, \quad (\text{III.58})$$

где  $\alpha_2^* = \sqrt{\psi_2^*}$ .

На рис. 13 приведено семейство теоретических расходограмм, рассчитанных по уравнению (III.58). Как видно, положение кривых однозначно определяется значениями  $\alpha_2^*$  и  $q_0^*$ . Обращает на себя внимание следующая особенность представленных семейств теоретических расходограмм. С ростом  $q_0^*$  область кривых с  $\frac{dq^*}{dz^*} > 0$  сужается в направлении  $\alpha_2^* \rightarrow 0$ . Поскольку  $\alpha_2^*$  является константой системы скважина — прискважинная зона, то при больших  $\alpha_2^*$  для области  $q_0^* > 0$  кривые в нижней части пласта могут приобрести обратный уклон\*. При заданном значении  $\alpha_2^*$

\* Возможность получения кривых с обратным уклоном экспериментально установлена В. М. Дядиченко на физической модели фильтра, окруженного водой.

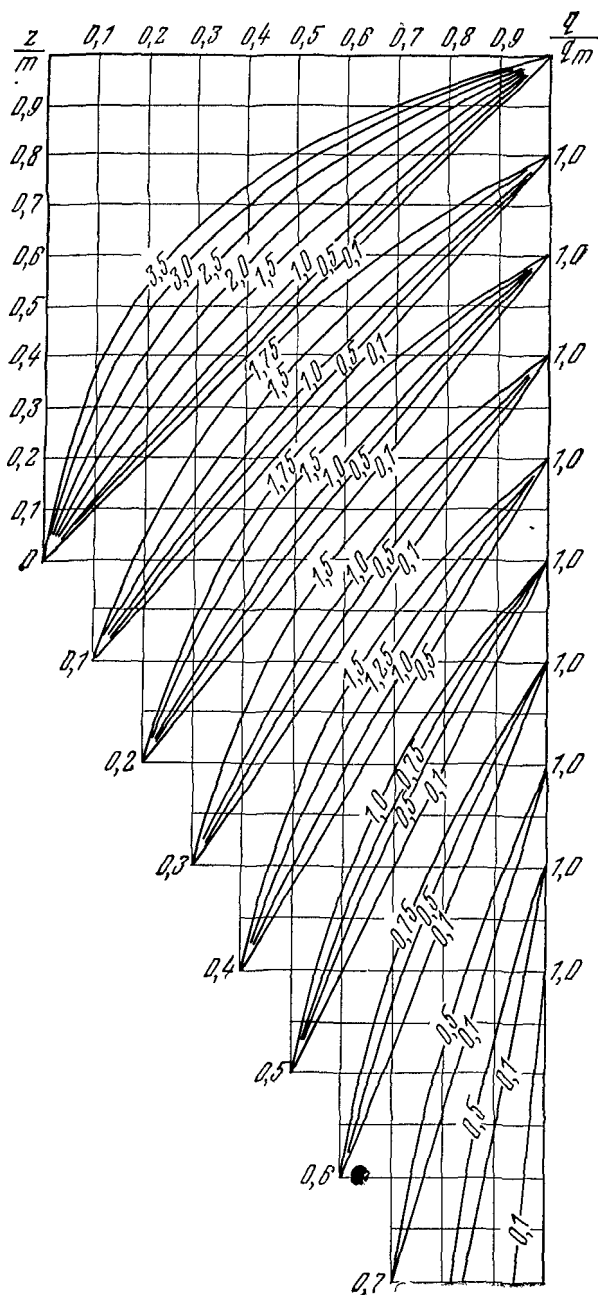


Рис. 13. Теоретические расходограммы для однородного пласта в неоднородной водоносной системе при условии сохранения плоскорадиального режима фильтрации в ненарушенной зоне заскважинного пространства.  
 Шифр кривых  $\alpha_2^*$ ; шифр групп  $q_0^*$

эта тенденция усиливается с ростом  $q_0^*$ . Физически это означает, что при соответствующем значении  $q_0^* > 0$  пласт в нижней части сначала поглощает воду из транзитного потока, а затем по пути движения отдает ее в скважину. Такое явление будет иметь место при условии, когда напор транзитного потока на уровне подошвы пласта выше пластового напора, а пластовый напор в свою очередь выше напора потока в скважине на уровне кровли. Следует, однако, повторить, что при наличии такой дифференциации напоров частичная потеря транзитного потока в пласт может иметь место только при соответствующих  $\alpha_2^*$ , в частности, если они больше тех, что показаны на рис. 13. Однако реально такие значения  $\alpha_2^*$  и соответствующее им явление инверсии потока могут встретиться очень редко, если фильтр плотно контактирует с боковыми породами. Учитывая исходную посылку данной математической модели притока  $\frac{dS_t}{dz} \rightarrow 0$ , следует признать, что кривые с шифром более 0,1 не соответствуют ее физическому смыслу.

Однако основным следствием полученного решения является зависимость неравномерности притока вдоль фильтрующей поверхности скважины (отклонение функции (III.58) от прямой) от значения безразмерного коэффициента сопротивления  $\psi_2^*$ . С уменьшением  $\psi_2^*$  кривая притока приближается к прямой, а распределение входных скоростей — к равномерному. Существует предел такого приближения. Он соответствует модели притока, рассмотренной в частном случае 5. Из обозначения параметра  $\alpha_2^* = \sqrt{\psi_2^*}$  следует, что неравномерность притока в скважину вдоль фильтрующей поверхности в рассмотренной физической модели притока является результатом довольно сложного взаимодействия гидравлических сопротивлений участков движения потока. Познав механизм этого взаимодействия, можно управлять эпюрой водопритока, что имеет значение, например, для улучшения качества и долговечности работы эксплуатационных скважин. И наоборот, по периодически наблюдаемым формам расходограмм при известных параметрах пласта и начальной конструкции водоприемной части можно судить о причинах изменения режима работы скважин.

На рис. 14 приведены практические расходограммы, полученные в скв. 1220 (Кзыл-Ординское месторождение подземных вод в долине р. Сырдарьи). Диаметр бурения в интервале 0—75 м — 304 мм. Раствор глинистый, плотность 1,2—1,4 г/см<sup>3</sup>. После бурения скважина оборудована сетчатым фильтром на колонне  $d = 146$  мм. Общая длина фильтра 75 м. Интервалы перфорации 15,8—42; 57,8—66,5 м. Устройство фильтра: на перфорированную часть трубы намотана проволока  $d = 2$  мм, поверх которой наложена сетка галунного плетения 10/90, закрепленная проволокой  $d = 2$  мм. Зафильтровое пространство засыпано гравием.

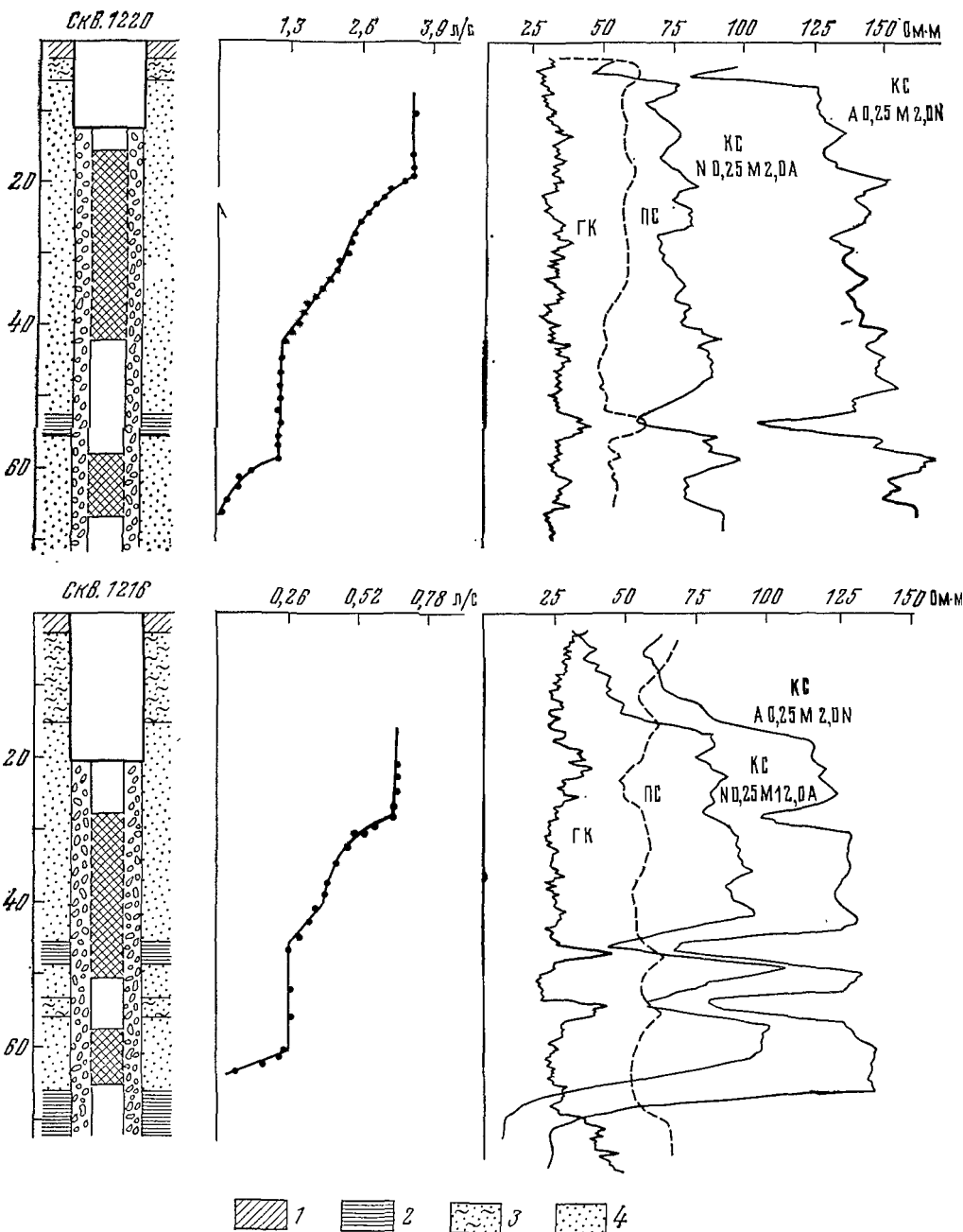


Рис. 14. Фактические расходограммы для однородных песчаных пластов, оборудованных сетчатым фильтром с гравийной обсылкой (Кзыл-Ординское месторождение).

1 — суглинки; 2 — глины; 3 — глины песчаные; 4 — пески

Геологический разрез в интервалах установки фильтров представлен, по геофизическим данным, однородными песками. После установки фильтра, скважина была промыта и испытан пробной откачкой. Расходограмма получена при повторной откачке из скважины с дебитом 3,5 л/с. Интересно отметить, что нижняя часть верхнего фильтрующего интервала мощностью около 10 м характеризуется практически прямолинейной расходограммой. Если ее условно продлить до верхней кромки фильтра, то значение расхода совпадает с дебитом скважины, измеренным на этой глубине расходомером. Верхняя часть данного фильтрующего интервала скважины характеризуется криволинейной расходограммой, форма которой отвечает уравнению (III.56). Несмотря на то что исследования проводились в пределах однородных песков с коэффициентом фильтрации 5,9 м/сут (по данным опытного куста), закрепленных фильтром постоянной конструкции, нетрудно убедиться, что в пределах различных интервалов разреза условия фильтрации неравноценны.

Может быть несколько вероятных причин, объясняющих это явление, однако наиболее вероятно следующая версия. Гравийная обсыпка существенно повышает проницаемость прискважинной зоны. В принятой нами схеме притока она может быть отнесена к зоне с коэффициентом  $k_s$ , причем  $k_s > k_f$ . Такие исходные условия способствовали снижению сопротивлений  $\varphi_t$  и  $\varphi_v$  в связи с лучшей сохранностью исходной скважинности фильтра. Это способствовало увеличению коэффициента  $\alpha_2$  и соответственно неравномерности распределения входных скоростей потока в скважину. В связи с меньшими входными скоростями в нижней части фильтрующего интервала гравийная обсыпка постепенно запесочивалась, что ухудшало ее проницаемость, которая становилась близкой к проницаемости песков.

Одновременно также ухудшалась проницаемость фильтровой колонны в связи с более плотным прилеганием к сетке песчано-гравийной смеси по сравнению с чистым гравием. Этот процесс развивался снизу вверх. На момент исследования верхняя часть фильтра оставалась еще достаточно чистой. В результате  $\alpha_2^*$  для нижнего и верхнего интервалов оказались различными, причем  $\alpha_{2\text{ ниж}}^* < \alpha_{2\text{ верх}}^*$ , что и отражено в форме наблюдаемой расходограммы.

На рис. 14 приведены также исследования еще одной скважины того же месторождения, имеющей однотипные геологический разрез и конструкцию. Аналогичная картина водопитока наблюдалась еще в пяти скважинах того же месторождения. В остальных исследованных скважинах процесс запесочивания гравийной обсыпки уже, видимо, закончился, так как расходограммы имели практически прямолинейную форму.

На рис. 15 приведена расходограмма по скв. 1229 Кзыл-Ординского месторождения, оборудованной фильтром ФКО. Как видно, форма расходограммы, в этом случае отвечает теоретиче-



ской для однородного пласта, оборудованного фильтром постоянной конструкции. Данный пример, возможно, может служить свидетельством большей сохранности первоначальных гидравлических свойств фильтра ФКО.

На основе этих примеров приходим к выводу о том, что для интересующей нас цели изучения фильтрационной неоднородности пород нет смысла углубляться в анализ причин, обуславливающих

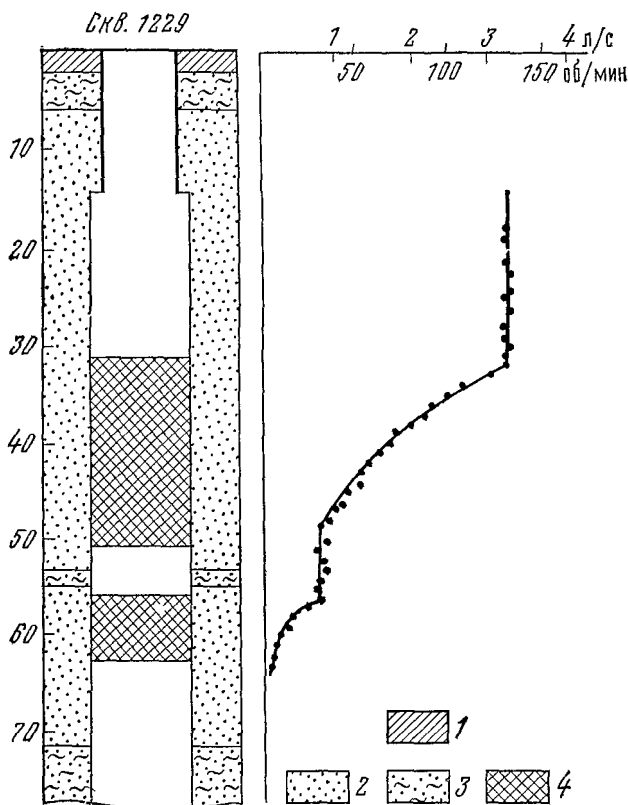


Рис. 15. Экспериментальная расходограмма в фильтре ФКО в однородных песках.

1 — суглинки; 2 — пески; 3 — пески глинистые; 4 — фильтр

ту или иную форму графика притока. Ясно, что причины эти объективны и их влияние однозначно определяет положение функции водопритока. Необходимо лишь найти способ количественной оценки такого влияния, т. е. определения величины гидравлических сопротивлений в системе водопритока. На первом этапе решения задачи встает вопрос о разбиении разреза на квазиоднородные слои, в пределах которых коэффициенты различных гидравлических сопротивлений оставались бы постоянными. Понятно,

что такой прием в условиях получения криволинейных расходограмм даже для заведомо однородных объектов имеет в известной мере интуитивное решение. Поэтому формальный прием разбивания фактической расходограммы на кусочные отрезки, удовлетворительно аппроксимируемые прямыми линиями, будет наилучшим образом обеспечивать условие квазиоднородности слоя.

В качестве примера на рис. 16 приведена теоретическая расходограмма для однородного пласта мощностью 100 м при дебите откачки 100 л/с. Пласт оборудован фильтром  $\alpha_2^* = 1,5$ . Аппроксимация этой расходограммы прямой линией дает в средней части отклонение 28%. Не имея сведений о пласте и состоянии водоприемной части скважины, факт наблюдения расходограммы такой формы может быть истолкован различным образом.

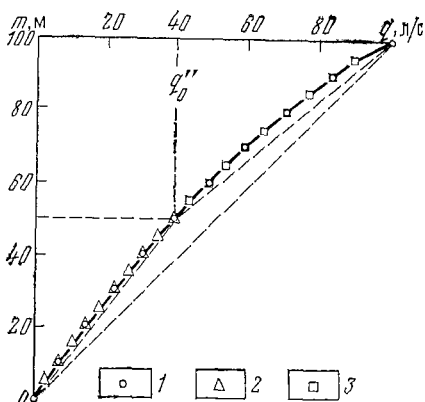


Рис. 16. Пример кусочной линейной аппроксимации расходограммы.

Расчетные точки расходограммы: 1 — для пласта 0—100 м, 2 — для интервала пласта 0—50 м, для интервала пласта 50—100 м

Затем этот пласт был разделен на два слоя равной мощности. Отклонение каждой кусочной расходограммы от прямой в средней части интервала дает значения 4 и 11%. Эти отклонения близко соответствуют погрешности измерения, поэтому выделенные слои могут рассматриваться как квазиоднородные со значительно большей вероятностью. Для каждого слоя также подсчитаны расходограммы. Исходные данные для расчета взяты с первоначальной общей расходограммы. Как видно, кусочные расходограммы полностью совпали с исходной. Это свидетельствует о точном соответствии полученной математической модели притока принятой физической модели, а также указывает на обоснованность с точки зрения физики процесса, возможности кусочной прямолинейной аппроксимации криволинейных расходограмм с погрешностью, допускаемой при их измерении, т. е. формального разделения разреза на квазиоднородные слои. Прием разбиения расходограммы на кусочные отрезки, соответствующие квазиоднородности слоя, позволяет достаточно просто решать задачи о функции гидравлических потерь напора за счет скин-эффекта, рассматривая его как функцию глубины (см. гл. IV).

Частный случай 3. Пусть  $dS_f = dS_s = 0$ , т. е. кольцевая зона с измененной проницаемостью либо отсутствует полностью, либо ее наличие при заданном понижении  $S_f + S_s$  в ламинарном режиме не деформирует поток в вертикальной плоскости. В каждом элементарном слое однородного пласта с кольцевой зоной

выполняется предпосылка Дюпюи, т. е.  $\frac{dq}{dz} = \text{const}$ . Возникновение деформации потока в этой физической модели притока будем связывать только с его турбулизацией в соответствующей зоне. Рассуждая аналогично случаю 2, для  $dS_t$  будем иметь

$$dS_t = \varphi_t \frac{d^2 q}{dz^2} \frac{dq}{dz} dz. \quad (\text{III.59})$$

Подстановка (III.59) и (III.37) в уравнение (III.14) приводит его к виду (III.52), решением которого служат (III.56) — (III.58) с коэффициентами  $\alpha_3 = \alpha_2$  и  $\alpha_3 = \alpha_2^*$ . Как видно, коэффициенты сопротивления для второй и третьей моделей притока равны. Это естественно, так как согласно схеме распределения напоров в околоскважинной зоне, приведенной на рис. 10, зона турбулизации потока наложена на зону измененной проницаемости. Коэффициент  $k_t$  обобщенно характеризует проницаемость этого интервала фильтрации жидкости в турбулентном режиме, поэтому выделение зоны измененной проницаемости в ламинарном режиме принципиально излишне.

Частный случай 4. Пусть  $dS_f = dS_s = dS_t = 0$ , т. е. условия притока соответствуют случаю расположения фильтра в среде с «нулевым» сопротивлением, например в воде, либо такой гипотетической модели, в которой поток до границы фильтра плоскорадиальный с постоянной скоростью  $\frac{dq}{dz} = \text{const}$  при понижении  $S_f + S_s + S_t$ , а проходя через фильтр деформируется в вертикальной плоскости. Нетрудно видеть, что такое условие является результатом очень грубой схематизации физической обстановки. После подстановки (III.37) в уравнение (III.14) получаем

$$\varphi_c \frac{dq^2}{dz} - \varphi_v \frac{d}{dz} \left( \frac{dq}{dz} \right)^2 = 0 \quad (\text{III.60})$$

или, используя обозначение относительного сопротивления

$$\frac{d^2 q}{dz^2} - \psi_4 q = 0, \quad (\text{III.61})$$

где

$$\psi_4 = \frac{\varphi_c}{\varphi_v}.$$

Решение уравнения (III.61) аналогично (III.53). В результате имеем

$$q = q_m \frac{\text{sh } \alpha_4 z}{\text{sh } \alpha_4 m} + q_0 \frac{\text{sh } \alpha_4 (m - z)}{\text{sh } \alpha_4 m} \quad (\text{III.62})$$

и

$$q^* = \frac{\text{sh } \alpha_4^* z^*}{\text{sh } \alpha_4^*} + q_0^* \frac{\text{sh } \alpha_4^* (1 - z^*)}{\text{sh } \alpha_4^*}, \quad (\text{III.63})$$

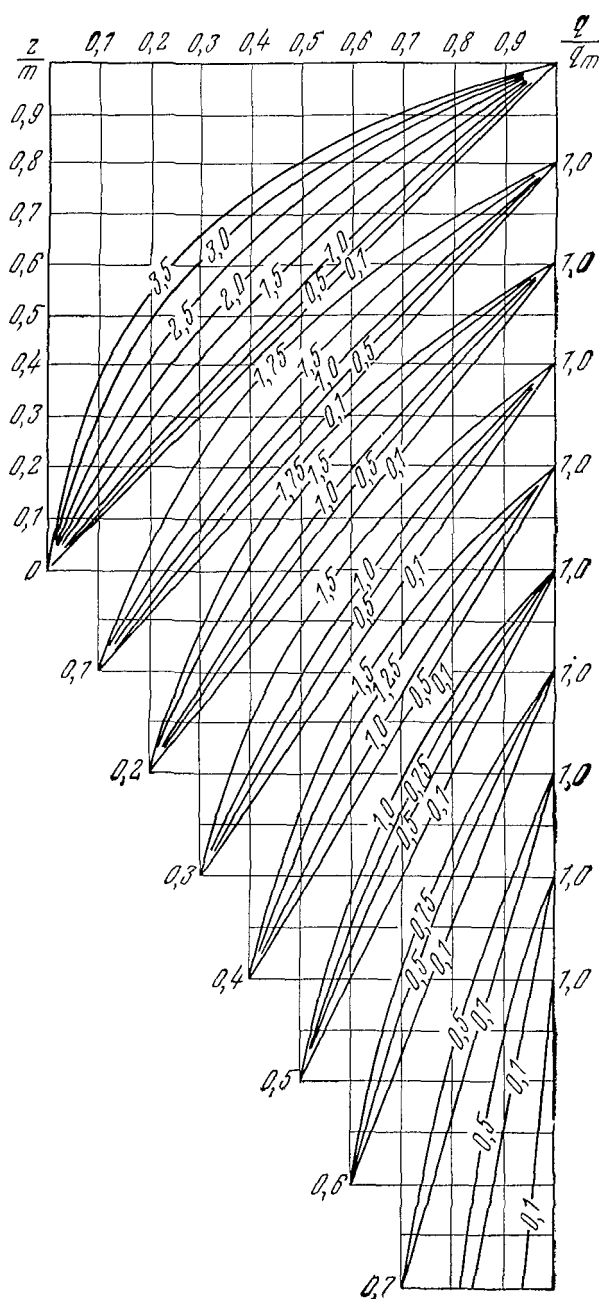


Рис 17. Теоретические расходограммы для фильтра в среде с «нулевым» сопротивлением.

Шифр кривых  $\alpha_4$ ; шифр групп  $q_0^*$

где

$$\alpha_4 = \sqrt{\Psi_4}; \quad \alpha_4^* = \sqrt{\Psi_4^*} = \sqrt{\frac{\Phi_c^*}{\Phi_v^*}}.$$

На рис. 17 приведено семейство теоретических расходограмм, рассчитанных по уравнению (III.63). Это семейство кривых формально эквивалентно предыдущему, однако физическое содержание коэффициента  $\alpha_4^*$  соответствует случаю, рассмотренному Э. А. Грикевичем, который, как теперь видно, является частным видом общей модели притока и требует выполнения условия  $dS_f = dS_s = dS_t = 0$ . Расчетные формулы для  $\alpha_4$  и других характеристик притока [47] приведены Э. А. Грикевичем для одиночного фильтра, т. е. для условия  $q = 0$ .

Частный случай 5. Пусть  $dS_s = dS_t = dS_v = 0$ , т. е. условия притока соответствуют случаю, когда отсутствуют участки дополнительных сопротивлений в прискважинной зоне. Поток в каждом элементарном слое пласта имеет ламинарный режим.

Подставив (III.29) в уравнение (III.14), получим исходное дифференциальное уравнение в виде

$$\frac{d^2 q}{dz^2} - \Phi_5 q \frac{dq}{dz} = 0, \quad (\text{III.64})$$

где

$$\Phi_5 = \frac{\Phi_c}{\Phi_f},$$

или в безразмерном виде

$$\frac{d^2 q^*}{dz^{*2}} - \Phi_5^* q^* \frac{dq^*}{dz^*} = 0, \quad (\text{III.65})$$

где

$$\Phi_5^* = \frac{\Phi_c^*}{\Phi_f^*}.$$

Решение уравнения (III.65) найдем методом последовательного понижения порядка. Подстановка  $p = \frac{dq^*}{dz^*}$  приводит (III.65) к уравнению первого порядка относительно вспомогательной функции  $p$

$$dp = \Phi_5^* q^* dq^*. \quad (\text{III.66})$$

После интегрирования имеем

$$p = \frac{1}{2} \Phi_5^* q^{*2} + C_0. \quad (\text{III.67})$$

Возвращаясь к первоначальным переменным, получаем уравнение

$$\frac{dq^*}{\frac{1}{2} \Phi_5^* q^{*2} + C_0} = dz^*. \quad (\text{III.68})$$

После интегрирования окончательным решением дифференциального уравнения (III.65) будет

$$q^* = \frac{C_1}{\alpha_5^*} \operatorname{tg} \left[ \frac{\alpha_5^*}{2} C_1 (z^* + C_2) \right], \quad (\text{III.69})$$

где

$$\alpha_5^{*2} = \Phi_5^*; \\ C_1 = \sqrt{2C_0};$$

$C_1$  и  $C_2$  могут быть найдены из граничных условий (III.41)

$$\left. \begin{aligned} q_0^* &= \frac{C_1}{\alpha_5^*} \operatorname{tg} \left( \frac{\alpha_5^*}{2} C_1 C_2 \right); \\ 1 &= \frac{C_1}{\alpha_5^*} \operatorname{tg} \left[ \frac{\alpha_5^*}{2} C_1 (1 + C_2) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.70})$$

Решение системы (III.70) приводит к следующим трансцендентным уравнениям для нахождения  $C_1$  и  $C_2$ :

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{4}{\alpha_5^*} \left( \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{\alpha_5^*}{C_1} - \operatorname{arc} \operatorname{tg} q_0^* \frac{\alpha_5^*}{C_1} \right)^2; \\ C_2 &= \frac{\operatorname{arctg} \frac{\alpha_5^*}{C_1} + \operatorname{arctg} q_0^* \frac{\alpha_5^*}{C_1}}{C_1 \alpha_5^*} - 0,5. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.71})$$

Для последующего анализа (III.69) удобно ввести обозначения

$$\beta_1 = \frac{C_1 \alpha_5^*}{2}; \\ \beta_2 = \frac{C_1 C_2 \alpha_5^*}{2}.$$

Из совместного решения (III.70) имеем также

$$q_0^* = \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{\operatorname{tg} (\beta_1 + \beta_2)}. \quad (\text{III.72})$$

Откуда  $\beta_1$  можно представить как функцию  $\beta_2$  в виде

$$\beta_1 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left( \frac{\operatorname{tg} \beta_2}{q_0^*} \right) - \beta_2. \quad (\text{III.73})$$

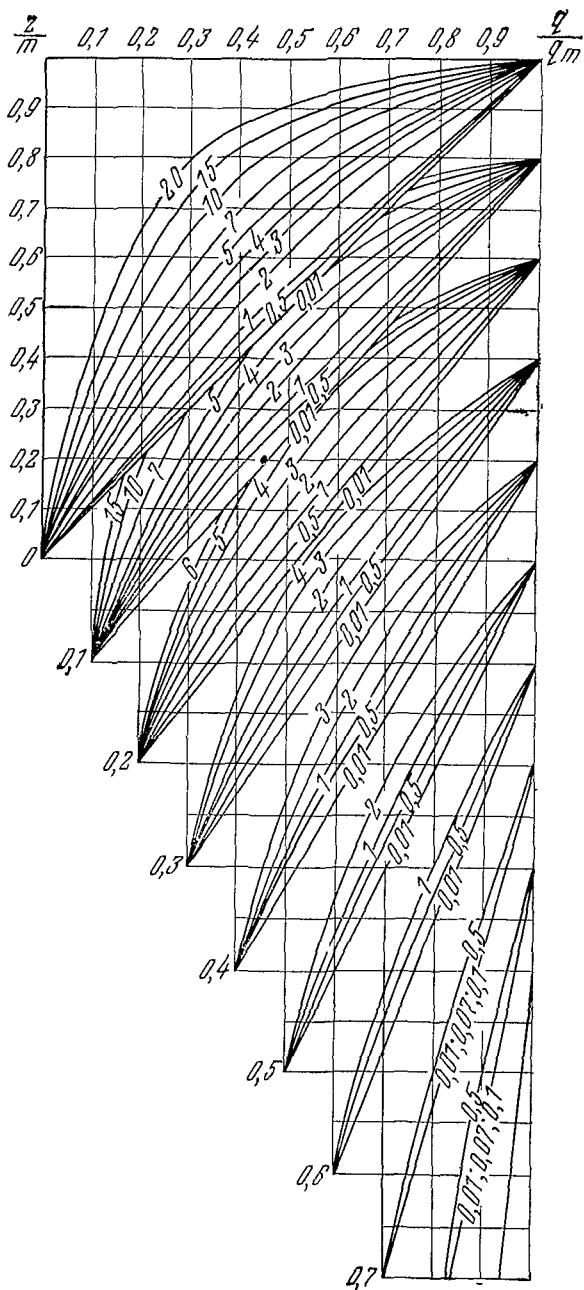


Рис 18 Теоретические расходограммы для однородного пласта в неоднородной водоносной системе, вскрытой «гидродинамически совершенной» скважиной

Шифр кривых —  $\Phi_5^*$ ; шифр групп —  $q_0^*$

Подставив  $\beta_1$  из (III.73) в первое уравнение системы (III.70), получим

$$\beta_2 = \frac{q_0^* \alpha_5^* \operatorname{arctg} q_0^*}{(1 - \operatorname{arc} \operatorname{tg} q_0^*) \operatorname{tg} \beta_2}. \quad (\text{III.74})$$

Решая (III.74) методом итерации, находим  $\beta_2$ . По известным  $\beta_1$  и  $\beta_2$  нетрудно далее найти  $C_1$  и  $C_2$ .

На рис. 18 приведено семейство теоретических расходограмм, рассчитанных на основании (III.69) для различных  $q_0^*$  и  $\Phi_5^*$ .

Как видно, положение расходограммы однозначно определяется значениями  $\Phi_5^*$  и  $q_0^*$ : с уменьшением  $\Phi_5^*$  и увеличением  $q_0^*$  кривизна расходограмм уменьшается. Из определения  $\Phi_5^*$  следует также, что изменения проницаемости, мощности или дебита пласта при постоянном  $q_0^*$  влияют на форму расходограммы равнозначно. Уменьшение значений соответствующих характеристик уменьшает кривизну функции водопритока. Изменение диаметра скважины в том же направлении оказывает противоположное воздействие.

Можно показать, что область существования теоретических расходограмм в этой модели притока ограничивается областью действительных корней уравнения (III.72). Раскрыв тангенс суммы в уравнении (III.72), получим квадратное уравнение относительно  $\beta_2$

$$\operatorname{tg}^2 \beta_2 + \frac{q_0^* - 1}{\operatorname{tg} \beta_1} \operatorname{tg} \beta_2 + q_0^* = 0, \quad (\text{III.75})$$

корень которого равен

$$\beta_2 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left[ \frac{1 - q_0^*}{2 \operatorname{tg} \beta_1} \pm \sqrt{\frac{(\sqrt{1 - q_0^*})^2}{4 \operatorname{tg}^2 \beta_1} - q_0^*} \right]. \quad (\text{III.76})$$

Очевидно, что значения  $\beta_1$  ограничиваются областью действительных корней уравнения (III.76), т. е. условием выполнения неравенства

$$\beta_1 \leq \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 - q_0^*}{2 \sqrt{q_0^*}}. \quad (\text{III.77})$$

При  $\beta_1 = \beta_{1 \max}$

$$\beta_2 = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{1 - q_0^*}{2 \operatorname{tg} \beta_{1 \max}}. \quad (\text{III.78})$$

В табл. 1 приведены значения  $\beta_{1 \max}$  и соответствующие им значения  $\beta_2$ .



Значения  $\beta_{1\max}$  и  $\beta_2$ 

$q_0^*$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
$\beta_{1\max}$	0,9582	0,7293	0,5684	0,4428	0,3398	0,2528	0,1775	0,114	0,0527
$\beta_2$	0,3064	0,4205	0,5005	0,5640	0,6155	0,6591	0,6964	0,7315	0,7591

В соответствии с (III 76) каждому значению  $\beta_1 < \beta_{1\max}$  отвечают два значения  $\beta_2$ . Для реальных условий величина  $\beta_2$  определяется выражением

$$\beta_2 = \arctg \left[ \frac{1 - q_0^*}{2 \operatorname{tg} \beta_1} - \sqrt{\frac{(1 - q_0^*)^2}{4 \operatorname{tg}^2 \beta_1} - q_0^*} \right]. \quad (\text{III.79})$$

На рис 19 приведены зависимости  $\beta_2 = f(\beta_1)$  для значений  $\beta_1 < \beta_{1\max}$ , рассчитанные по (III 76)

Из рис. 18 следует, что форма расходограммы для однородного проницаемого пласта отклоняется от линейной зависимости тем интенсивнее, чем больше значение  $\beta_1$  и меньше  $q_0^*$ . Использование уравнения (III 69), описывающего такие кривые в общем виде, для решения обратной задачи (оценки зональной проницаемости неоднородных водоносных горизонтов) с практической точки зрения мало удобно. Поэтому имеет смысл рассмотреть возможность его упрощения.

Нетрудно заметить, что при некоторых, как будет показано ниже, часто встречающихся значениях параметров и расходов подтангенциальное выражение в уравнении (III 69) в силу малости дает основание для приближения  $\operatorname{tg} x \approx x$ . Тогда вместо (III 69) будет

$$q^* = \frac{2\beta_1}{\Phi_0^*} (\beta_1 z^* + \beta_2). \quad (\text{III.80})$$

Рис 19 Зависимость  $\beta_2 = f(\beta_1)$   
Шифр кривых  $q_0/q_m$

Определим область, где такое приближение может быть принято с некоторой заданной погрешностью. Замена тангенциальной функции прямолинейной означает принятие условия  $\operatorname{tg}(\beta_1 + \beta_2) \approx \beta_1 + \beta_2$ . Учитывая также, что  $\beta_2 < \beta_1 + \beta_2$  при положительных

$\beta_1$  и  $\beta_2$ , получаем следующие выражения для граничных условий (III.42):

$$\left. \begin{aligned} q_0' &= \frac{2\beta_1\beta_2}{\Phi_5^*}; \\ 1 &= \frac{2\beta_1(\beta_1 + \beta_2)}{\Phi_5^*}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.81})$$

Из этой системы получаем

$$\left. \begin{aligned} \beta_1 &= \sqrt{\frac{\Phi_5^*(1 - q_0')}{2}}; \\ \beta_2 &= q_0' \sqrt{\frac{\Phi_5^*}{2(1 - q_0')}}. \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.82})$$

Однако фактически

$$\text{tg}(\beta_1 + \beta_2) = (\beta_1 + \beta_2)(1 + \delta), \quad (\text{III.83})$$

где  $\delta$  — допустимая погрешность аппроксимации. Поэтому замена  $\text{tg}(\beta_1 + \beta_2) \simeq \beta_1 + \beta_2$  может считаться допустимой лишь при условии

$$\beta_1 + \beta_2 \leq (\beta_1 + \beta_2)_{\text{кр}}, \quad (\text{III.84})$$

где  $(\beta_1 + \beta_2)_{\text{кр}}$  — критическое значение  $(\beta_1 + \beta_2)$ , при котором допустима указанная замена. Если выполняется условие (III.84), то тем более справедлива замена  $\text{tg} \beta_2 \simeq \beta_2$ . Значение  $(\beta_1 + \beta_2)_{\text{кр}}$  определяется с помощью таблиц тангенсов из соотношения

$$1 + \delta = \frac{\text{tg}(\beta_1 + \beta_2)_{\text{кр}}}{(\beta_1 + \beta_2)_{\text{кр}}}.$$

Подставляя значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  из (III.82) в (III.80), окончательно имеем

$$q^* = (1 - q_0')z^* + q_0'. \quad (\text{III.85})$$

Таким образом, при допустимости указанного приближения получаем простейшие линейные зависимости, отвечающие равномерному притоку воды в скважину по мощности водоносного пласта.

Зная свойства пласта, радиус скважины и величины расхода на его границах, можно оценить значения  $\beta_1$  и  $\beta_2$  по (III.82). Если их сумма дает значение, удовлетворяющее условию (III.84), то аппроксимация возможна с погрешностью  $\delta$ . Для удобства определения величины допускаемой погрешности аппроксимации тангенциальной функции расходограммы, прямолинейной при заданных параметрах пласта, скважины и величины водоотбора, рассчитана номограмма, представленная на рис. 20. Порядок пользования ею показан на примере, входные значения которого даны штриховыми линиями.

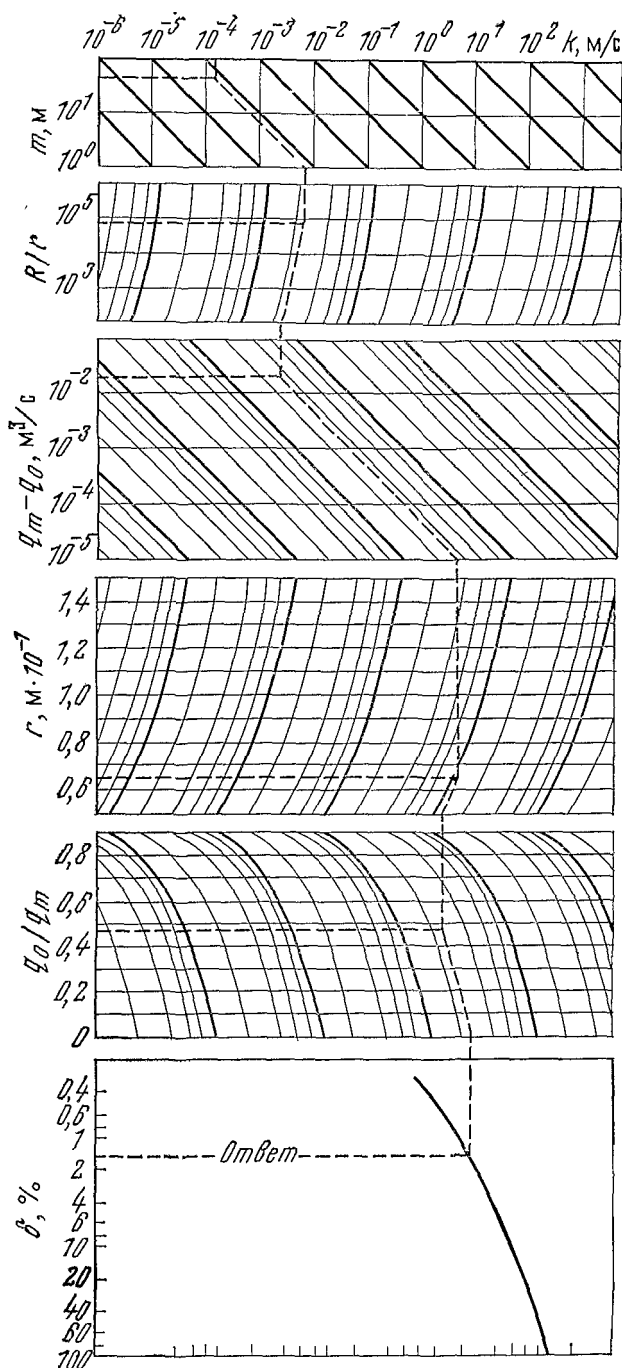


Рис 20 Помогамма для оценки погрешности линейной аппроксимации расходограммы в открытой скважине

Из рассмотрения семейства теоретических кривых и номограммы видно, что для наиболее вероятных значений мощности, дебита, коэффициента фильтрации пластов в неоднородных разрезах при выполнении условий притока, соответствующих данной модели, можно считать, что форма расходограммы отвечает прямолинейному виду с допустимой погрешностью. Аппроксимация реальной расходограммы прямолинейными отрезками будет соответствовать при этом разделению фильтрационного разреза на слои с различными фильтрационными свойствами. Если при заданных входных значениях оказывается, что аппроксимация расходограммы прямолинейными отрезками при  $q_0^* \geq 0$  возможна с неудовлетворительной точностью, то необходимо пересмотреть дробность деления разреза на слои.

Важно отметить, что даже в модели притока такого типа условие Дюпюи нарушается: поток к скважине отклоняется от плоскорадиального. Причиной этого является конечный размер сечения скважины, обуславливающий некоторое ненулевое значение гидравлического сопротивления ствола. Переменная величина расхода осевого потока определяет переменную величину потерь напора по оси  $z$ . Сохранение условия непрерывности давления на границе скважина — пласт деформирует потенциальное и силовое поля в пространстве в соответствии с характером приведенных интегральных уравнений эпюры притока.

### 3. ОБЩЕЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ВОДОПРИТОКА В СКВАЖИНУ ИЗ НЕОДНОРОДНОЙ СРЕДЫ (ОБЩЕЕ УРАВНЕНИЕ РАСХОДОГРАММЫ)

Рассмотрение гидродинамических и гидравлических особенностей формирования водопритоков из неоднородной среды в совершенную по степени вскрытия скважину позволяет составить общее уравнение расходограммы. Предусматривается связать в одной зависимости гидродинамические и гидравлические особенности формирования водопритоков в вертикальном разрезе скважины. В этом смысле общее уравнение расходограммы является синтетическим. Получим его на основе следующих соображений. Сначала будем считать скважину гидродинамически совершенной по характеру и степени вскрытия пластов. Примем, что режим перетекания по стволу неработающей скважины удовлетворяет условиям, определяемым по номограмме (см. рис. 2). Тогда в уравнении (II.34) правомерна замена

$$\left. \begin{aligned} Q_{0j}(r_0, t) &= Q_{0j} = \text{const}; \\ \int_0^{\infty} w_j(r_0, t - \tau) d\tau &= 2 \ln \frac{R}{r_0} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.86})$$

и оно приводится к уравнению Дюпюи [23]

$$S_{0j} = \frac{Q_{0j}}{2\pi (km)_j} \ln \frac{R}{r_0}. \quad (\text{III.87})$$

Примем далее, что режим возбуждения одиночной работающей скважины удовлетворяет условиям, определяемым по номограмме (см. рис. 4). Тогда в уравнении (II.75) правомерна подстановка

$$\left. \begin{aligned} \Delta Q_j(r_0, t) &= \Delta Q_j = \text{const} \\ \int_0^{t=\infty} w(r_0, t - \tau) d\tau &= \ln 2,25 \frac{at}{r_0^2} \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.88})$$

и оно приводится к виду

$$S(r_0, t) = \frac{\Delta Q_j}{4\pi (km)_j} \ln 2,25 \frac{at}{r_0^2}. \quad (\text{III.89})$$

Дебит  $j$ -го пласта в условиях возбуждения скважины равен

$$Q_j = Q_{0j} + \Delta Q_j = \frac{4\pi (km)_j}{2 \ln \frac{R}{r_0}} S_{0j} + \frac{4\pi (km)_j}{\ln 2,25 \frac{at}{r_0^2}} S(r_0, t). \quad (\text{III.90})$$

Однако знаменатель первой дроби равносителен знаменателю второй дроби при достаточно больших  $t$ . Для упрощения задачи будем считать, что условия притока воды в скважину соответствуют установившемуся режиму

$$S_{0j} = H_0 - H_j; \quad S = h_{\pi} - H_0.$$

Поэтому

$$Q_j = \frac{2\pi (km)_j}{\ln \frac{R}{r_0}} (h_{\pi} - H_j). \quad (\text{III.91})$$

Дебит скважины определится как сумма частных дебитов пластов

$$Q = \sum_{j=1}^N Q_j = \frac{2\pi \sum_{j=1}^N (km)_j}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[ h_{\pi} - \frac{\sum_{j=1}^N (km)_j H_j}{\sum_{j=1}^N (km)_j} \right], \quad (\text{III.92})$$

где

$$\frac{\sum_{j=1}^N (km)_j H_j}{\sum_{j=1}^N (km)_j} = H_0;$$

$h_d$  — динамический уровень воды в скважине.

Функция понижения уровня воды в скважине, входящая в уравнения (III.91) и (III.92), обусловлена фильтрационными потерями в породе, т. е. эквивалентна понижению  $S_f$ . В реальных условиях притока воды величина понижения уровня, фиксируемого в скважине, определяется совместным действием многих сопротивлений, в том числе фильтрационным сопротивлением пород, на всем пути движения жидкости. В соответствии с соображениями, изложенными в предыдущих параграфах этой главы, действующее понижение для  $j$ -го пласта будет равно

$$S_j = S_{fj} = h_d - H_j - S_{tj} - S_{vj} - S_{rj} - S_{lj}. \quad (\text{III.93})$$

В целях унификации алгебраических выражений отсчет глубины производится от поверхности земли. Положительное направление оси — вниз, отрицательное — вверх. Поэтому для интервалов скважины с восходящим потоком величины  $S_r$  и  $S_l$  считаются положительными, а с нисходящим — отрицательными. Аналогично для водоотдающих пластов  $S_l$  и  $S_v$  являются величинами положительными, а для водопоглощающих — отрицательными.

В общем случае исследования скважины сложного строения и конструкции функции  $S_t$ ,  $S_v$ ,  $S_r$  и  $S_l$  кусочно непрерывны. Ненулевые значения производных функций  $S_v$  и  $S_r$  будут на интервалах фильтров, а функции  $S_l$  — на глухих интервалах скважины.

Для получения общего уравнения расходограммы как функции приращений водопритокков по глубине скважины поступим следующим образом. Разделим разрез скважины на  $n$  слоев, руководствуясь выделением квазиоднородных интервалов притока по принципу  $\frac{dq}{dz} \rightarrow \text{const.}$  С учетом (III.93) наблюдаемый дебит реальной скважины с распределенными по ее глубине различными сопротивлениями будет равен

$$Q_H = \frac{2\pi \sum_{j=1}^N (km)_j}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[ h_d - H_0 - \frac{\sum_{i=1}^n (km)_i \Delta S_i}{\sum_{i=1}^n (km)_i} \right], \quad (\text{III.94})$$

где  $\Delta S_i = S_{ti} + S_{vi} + S_{ri} + S_{li}$ ;

$Q_H$  — наблюдаемый дебит реальной скважины;  $N$  — число фильтрующих интервалов (пластов) в разрезе скважины.

Осевой расход воды по стволу скважины, измеренный расходомером на глубине  $z'$ , равен наблюдаемому дебиту части разреза мощностью  $z_3 - z'$  ( $z_3$  — глубина забоя)

$$q(z') = Q_H|_{m=z_3-z'} = \frac{2\pi \sum_{i=k-1}^n (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[ h_d - \frac{\sum_{i=k-1}^n (km)_i (H_i + \Delta S_i)}{\sum_{i=k-1}^n (km)_i} \right], \quad (\text{III.95})$$

где  $k$  — номер слоя, подошва которого соответствует глубине  $z'$ .

Это же значение расхода получится, если его рассматривать как разность между суммарным дебитом скважины и дебитом части разреза в пределах глубины от нуля до  $z'$

$$q(z') = Q_n - Q_n|_{m=z'} = Q_n - \frac{2\pi \sum_{i=1}^k (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[ h_{\pi} - \frac{\sum_{i=1}^k (km)_i (H_i + \Delta S)}{\sum_{i=1}^k (km)_i} \right]. \quad (\text{III.96})$$

Уравнение (III.96) выражает в общем виде связь формы расходограммы в реальной скважине с ее гидрогеологическим строением, параметрами и гидравлическими особенностями.

В зависимости от характера работы скважины и водоносных пластов (откачка или налив, водоприток или поглощение) правая часть уравнения (III.96) приобретает знак «плюс» или «минус». Это обуславливается знаком  $Q_n$  (откачка — плюс, налив — минус) и знаком члена в квадратных скобках при условии отсчета глубины  $h_{\pi}$ ,  $H_i$  и  $z$  от поверхности земли с указанными выше положительным и отрицательным направлениями оси. В итоге получается, что при восходящем движении воды по стволу скважины правая часть уравнения (III.96) приобретает знак «плюс», а при нисходящем — «минус». Поэтому для наглядности расходограммы вычерчиваются справа от оси глубин для интервала разреза с восходящим потоком и слева от оси глубин — для интервала разреза с нисходящим потоком. Если взять некоторый разрез, содержащий три водоносных пласта, то в зависимости от соотношения их статических уровней можно получить 29 различных видов расходограмм: 13 — для условий взаимодействия пластов в неработающей скважине и 16 — для условий откачки. На рис. 21 приведены эти гипотетические расходограммы.

Аналогично рассуждая, можно записать общее уравнение разностей расходограммы, под которой формально понимается график разностей между значениями расхода потока воды, зафиксированными в работающей и неработающей скважинах

$$\Delta q(z) = q(z)_{\text{раб}} - q(z)_{\text{нераб}}. \quad (\text{III.97})$$

Физический смысл разностной расходограммы — распределение приращений водоприток в вертикальном разрезе скважины, вызванных сменой гидродинамического состояния водоносной системы. Обычно рассматриваются два состояния: гидродинамическое равновесие, обусловленное взаимодействием водоносных пластов в неработающей скважине, и возбуждение этой системы при откачке, наливе, т. е. состояние работающей скважины. Характеристика гидродинамического взаимодействия пластов при первом состоянии системы дана в разделе 1 главы II, характери-

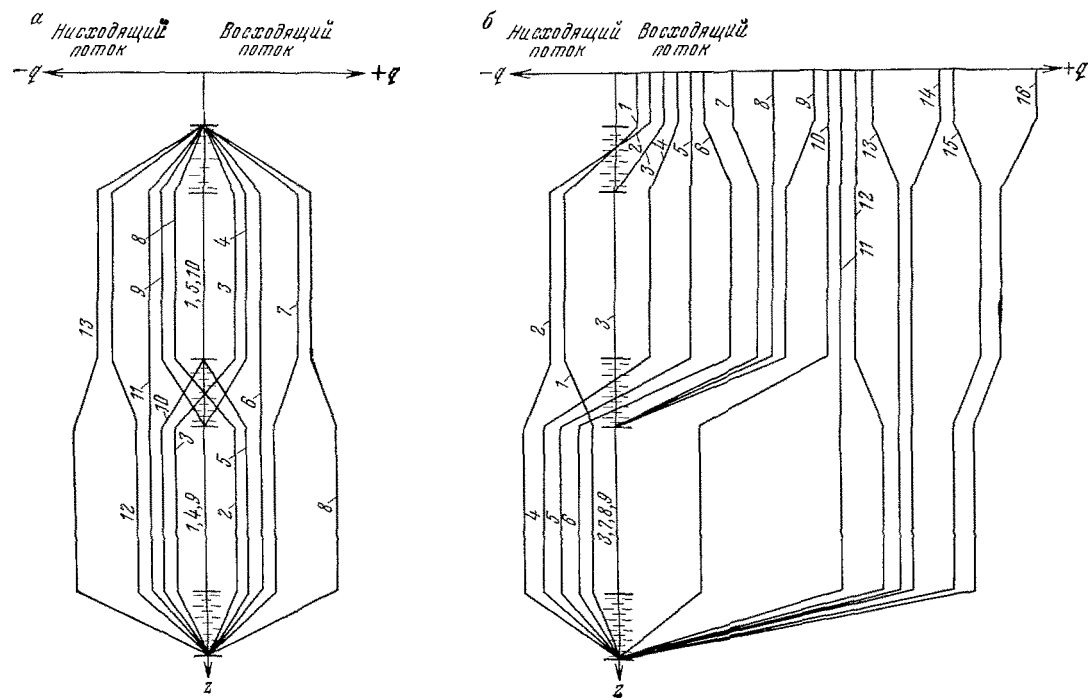


Рис 21 Гипотетические расходограммы для скважины с тремя водоносными пластами с различными соотношениями статических уровней.

а — неработающая скважина; б — работающая скважина



стика гидродинамического взаимодействия пластов при втором состоянии системы, наложенном на уже достигнутое состояние равновесия, — в разделе 2 этой же главы. Таким образом, разностная расходограмма является вертикальной разверткой функции водопритока, соответствующей второму состоянию водоносной системы.

Напомним, что расход осевого потока воды, измеренный расходомером на глубине  $z'$  в неработающей скважине, равен дебиту части разреза мощностью  $z - z'$  в условиях взаимодействия разноталорных пластов по стволу. В частном случае расход и дебит могут быть равны нулю.

Осевой расход потока воды по стволу работающей скважины, измеренный расходомером на той же глубине, по условию решения задачи о водопритоках в работающей скважине, может быть записан в виде суммы

$$q(z') = Q_H|_{m=z-z'} = Q_{0H}|_{m=z-z'} + \Delta Q_H|_{m=z-z'}. \quad (\text{III.98})$$

Таким образом, если обозначить через  $\Delta q(z')$  разность измеренных расходов, зафиксированных на одной и той же глубине при двух состояниях скважины, то

$$\Delta q(z') = \Delta Q_H|_{m=z-z'}. \quad (\text{III.99})$$

или

$$\Delta q(z') = Q_H - \Delta Q_H|_{m=z'}. \quad (\text{III.100})$$

Записав значение  $\Delta Q_H|_{m=z'}$  в виде

$$\Delta Q_H|_{m=z'} = \frac{2\pi \sum_{i=1}^k (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} S_H \quad (\text{III.101})$$

для условий, допускающих принятие  $\Delta Q_j(r_0, t) = \Delta Q_j = \text{const}$ , получим уравнение разностной расходограммы как функцию приращения приращений водопритоков по глубине совершенной работающей скважины в виде (III.100).

Уравнение разностной расходограммы по глубине реальной скважины будет иметь вид

$$\Delta q(z') = Q_H - \frac{2\pi \sum_{i=1}^k (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} \left[ S_H - \frac{\sum_{i=1}^k (km)_i \delta S_i}{\sum_{i=1}^k (km)_i} \right], \quad (\text{III.102})$$

где

$$\delta S_i = \Delta S_{ii} + \Delta S_{vi} + \Delta S_{ri} + \Delta S_{li};$$

$$\Delta S_{ii} = S_{ii}^p - S_{ii}^0; \quad \Delta S_{vi} = S_{vi}^p - S_{vi}^0; \quad \Delta S_{ri} = S_{ri}^p - S_{ri}^0;$$

$$\Delta S_{ii} = S_{ii}^p - S_{ii}^0;$$

$S_{ii}$  — понижение уровня, реально фиксируемое в работающей скважине (индекс «р» обозначает величину потерь напора в работающей скважине, а индекс «0» — в неработающей скважине).

Из рассмотрения уравнений (III.96) и (III.102) можно сделать следующие выводы.

1. При  $(km)_i = 0$  расходограмма или разностная расходограмма имеет вид прямой, параллельной оси  $z$ .

2. Наличие функциональных членов  $S_t$ ,  $S_v$ ,  $S_r$  и  $S_l$  в уравнениях (III.96) и (III.102) объясняет неравномерность распределения величин водопритоков по глубине скважины даже при условии постоянства параметров среды и конструкции скважины.

3. Приращения

$$q(z_k) - q(z_n) = Q_{ni} = \frac{2\pi (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} (h_n - H_i - \Delta S_i); \quad (\text{III.103})$$

$$\Delta q(z_k) - \Delta q(z_n) = \Delta Q_{ni} = \frac{2\pi (km)_i}{\ln \frac{R}{r_0}} (S_n - \delta S_i), \quad (\text{III.104})$$

где  $z_k$  и  $z_n$  — соответственно глубина кровли и подошвы  $i$ -го фильтрующего интервала пород, равны дебиту.

4. Величина гидравлических потерь  $S_t$ ,  $S_v$  и  $S_l$  при стабилизированном дебите пластов не зависит от времени. При рассмотрении гидродинамического процесса с момента возбуждения скважины, а также при возбуждении ее в режиме  $Q = Q(t)$  значения  $S_t$ ,  $S_v$ ,  $S_r$  и  $S_l$  являются также функциями времени.

5. Из совместного решения уравнений (III.104) и (III.89) соотношение для приведения дебитов пластов в условиях реальной скважины к дебитам для случая гидродинамически совершенной скважины, имеющей понижение  $S_n$ , будет иметь вид

$$\Delta Q_i = \frac{\Delta Q_{ni} S_n}{S_n - \Delta S_i}. \quad (\text{III.105})$$

Как видно, (III.105) аналогично (II.98).

## ВЫВОДЫ

1. Интегральная функция водопритока в скважину вдоль фильтрующей поверхности пласта получена на основе применения уравнения Мещерского для движения переменной массы. Она определяется совместным действием гидравлических сопротивлений ствола скважины, прискважинной зоны и пласта с учетом линейного и нелинейного режимов течения в соответствующих областях для пласта, находящегося в зоне транзита; форма расходограммы обусловлена также значениями расхода на его границах.

2. Интегральная функция водопритока в общем случае является нелинейной. Кривизна ее зависит от величины относительного гидравлического сопротивления, равного отношению гидравлического сопротивления ствола скважины к гидравлическому сопротивлению прискважинной зоны и пласта

3. Упрощенный вид функции притока получен для условия выполнения в пределах однородного пласта предпосылки Дюпюи при понижении, соответствующем только фильтрационному сопротивлению породы.

4. Общее уравнение расходограммы по скважине определяется фильтрационными свойствами одновременно работающих пластов, гидравлическими потерями напора в стволе и прискважинной зоне, величинами градиента напора в системе скважина — пласт, а также дифференциацией напоров во взаимодействующих пластах. Для унификации изображения расходограмм и применяемых расчетных формул введена единая система координат и обозначений.

5. Экспериментальные исследования на физических моделях показали принципиальное соответствие полученных решений реально наблюдаемым кривым притока.

## ГЛАВА IV

### ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ НАПОРА

#### 1. ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НАПОРА В СТВОЛЕ СКВАЖИНЫ

Гидравлические потери напора в стволе скважины, относимые к оцениваемому пласту, являются функцией глубины его залегания. Они определяются суммой двух функций:  $S_r$  и  $S_l$ . Функция  $S_r$  представляет собой часть потери энергии потока на преодоление сопротивления трения внутри скважины вдоль ее фильтрующей поверхности. Для отдельного слоя она может быть выражена уравнением (III.12) путем интегрирования в пределах от подошвы до кровли

$$S_r = \int_0^m \frac{\lambda}{2gDW^2} q^2(z) dz. \quad (IV.1)$$

В связи с разбиением разреза на квазиоднородные слои, аппроксимируемые прямолинейными отрезками, функция гидравлических потерь  $S_r$  может быть выражена в виде

$$S_r = \frac{8\lambda [q(z_K)^2 + q(z_n)q(z_K) + q(z_n)^2] m}{3g\pi^2 D^5}. \quad (IV.2)$$

Функция гидравлических потерь  $S_{ri}$ , относимая к рассматриваемому слою, равна

$$S_{ri} = \sum_{k=1}^i \frac{8\lambda_k [q(z_K)^2 + q(z_n)q(z_K) + q(z_n)^2] m_k}{3g\pi^2 D_k^5}, \quad (IV.3)$$

где  $k=1, 2, \dots$ , номера фильтрующих слоев, отсчитываемые от башмака обсадной колонны.

Функция  $S_l$  представляет собой часть потери энергии потока на преодоление сопротивления трения обсадных труб и других непроницаемых интервалов скважины. В работах ряда авторов [25, 47, 69, 116], занимавшихся исследованием гидравлических сопротивлений в скважинах, расчет потерь  $S_l$  осуществляется на основе формулы Дарси — Вейсбаха

$$dS_l = \frac{\lambda q^2(z)}{2gDW^2} dz. \quad (IV.4)$$

В пределах интервалов оценки  $S_l$  расход потока постоянен и функция  $S_{li}$  линейно связана с длиной пути по сумме глухих интервалов скважины выше рассматриваемого слоя

$$S_{li} = \sum_{l=1}^i \frac{8\lambda_l q_l l_l}{g\pi^2 D_l^5}, \quad (IV.5)$$

где  $l=1, 2, \dots$ , — номера непроницаемых слоев, отсчитываемые от конца пьезометра;  $l_1$  — длина  $l$ -го глухого интервала скважины.

Как видно, формула (IV.5) аналогична формуле (IV.3).

Оценка коэффициента трения  $\lambda$  для таких конструкций, как скважина, многими исследователями осуществляется на основе известных представлений о гидравлике напорных трубопроводов цилиндрической формы. Мы также принимаем в качестве основной модели скважину круглого сечения. Кроме того, принимаем, что свойства текущей по ней жидкости стабильны (плотность, вязкость, температура). Даже при этих ограничениях  $\lambda$  является функцией скорости потока. Кроме того, на величину  $\lambda$  оказывает влияние шероховатость поверхности стенок трубопровода (скважины). Принято считать [14] трубу гладкой, если отношение средней высоты выступов (величина абсолютной шероховатости)  $\xi$  к внутреннему диаметру трубы  $D$  равно

$$\varepsilon = \frac{\xi}{D} \leq 17,85 \text{Re}^{-0,875}, \quad (\text{IV.6})$$

где  $\text{Re}$  — критерий Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{\bar{v}D}{\nu} = \frac{1,274q}{D\nu}. \quad (\text{IV.7})$$

Здесь  $\bar{v}$  — средняя скорость движения жидкости на данном участке поперечного сечения;  $\nu$  — кинематическая вязкость.

При  $\text{Re} \geq 2200$ —2300 поток считается турбулентным. При значениях  $\varepsilon$ , удовлетворяющих условию (IV.6), считается, что выступы (шероховатости) скрыты в толще ламинарного пограничного слоя жидкости у стенок. С увеличением значения  $\text{Re}$  толщина ламинарного пограничного слоя уменьшается, выступы шероховатости оголяются и поверхность перестает быть гидравлически гладкой.

В гидравлике технических трубопроводов для характеристики шероховатости стенок характеристику  $\xi$  обычно не применяют, так как средняя высота выступов шероховатости не может полностью характеризовать влияние шероховатости на сопротивление. Поэтому введено понятие «эквивалентная равномернозернистая шероховатость»  $\xi_0$ . Это такая высота выступов, которая создает сопротивление, равное действительному сопротивлению испытуемой модели. Величина  $\xi_0$  устанавливается не измерением выступов, а по данным гидравлических испытаний моделей. Эквивалентная равномернозернистая шероховатость характеризует не только среднюю высоту бугорков шероховатости, но и их форму, распределение по поверхности стенки и т. д. Отношение  $\xi/\xi_0$  может колебаться в значительных пределах. В расчетах гидравлических сопротивлений используется, кроме того, величина приведенной линейной шероховатости  $\xi_1$ , зависящая от средней высоты выступов и прочих характеристик шероховатости. Она также определяется из экспериментальных данных. Во многих случаях в ин-

женерных расчетах можно принимать  $\zeta_1 = 0,1 \zeta_0$  [8]. Для ориентировочных оценок величин  $\zeta_0$  можно воспользоваться табл. 2, заимствованной из работы [8].

Таблица 2

Материал и способ изготовления труб	Состояние труб	$\zeta_0$ , мм
		Пределы изменения Среднее значение
Тянутые из стекла и цветных металлов	Новые, технически гладкие	0,001—0,002
		0,0015
Бесшовные, стальные	Новые и чистые	0,01—0,02
		0,014
Стальные, сварные	Новые и чистые	0,03—0,12
		0,05
То же	С незначительной коррозией после очистки	0,1—0,2
		0,15
»	Умеренно заржавевшие	0,3—0,7
		0,5
»	Старые, заржавевшие	0,8—1,5
		1
»	Сильно заржавевшие или с большими отложениями	2—4
		3
Чугунные	Новые, без покрытия	0,2—0,5
		0,3
»	Бывшие в употреблении	0,5—1,5
		1
»	Очень старые	до 3
Асбоцементные	Новые	0,05—0,1
		0,085
Бетонные	Новые из предварительно напряженного бетона	0,02—0,05
		0,03
»	Новые, центробежные	0,15—0,3
		0,2
»	Бывшие в употреблении	0,3—0,8
		0,5
»	Из необработанного бетона	1—3

Из опыта рассмотрения кавернограмм по окрытому стволу скважины (разрезы сцементированных терригенных и карбонат-

ных пород) можно предполагать значения  $\zeta_1/D > 0,001$ . Большие значения относительной шероховатости свойственны также интервалам ствола скважины, закрепленным фильтрами. Шероховатость обсадных труб зависит от их «возраста», агрессивности вод, и, видимо, во многих случаях также будет превышать указанную величину. На рис. 22 приведена номограмма для оперативной

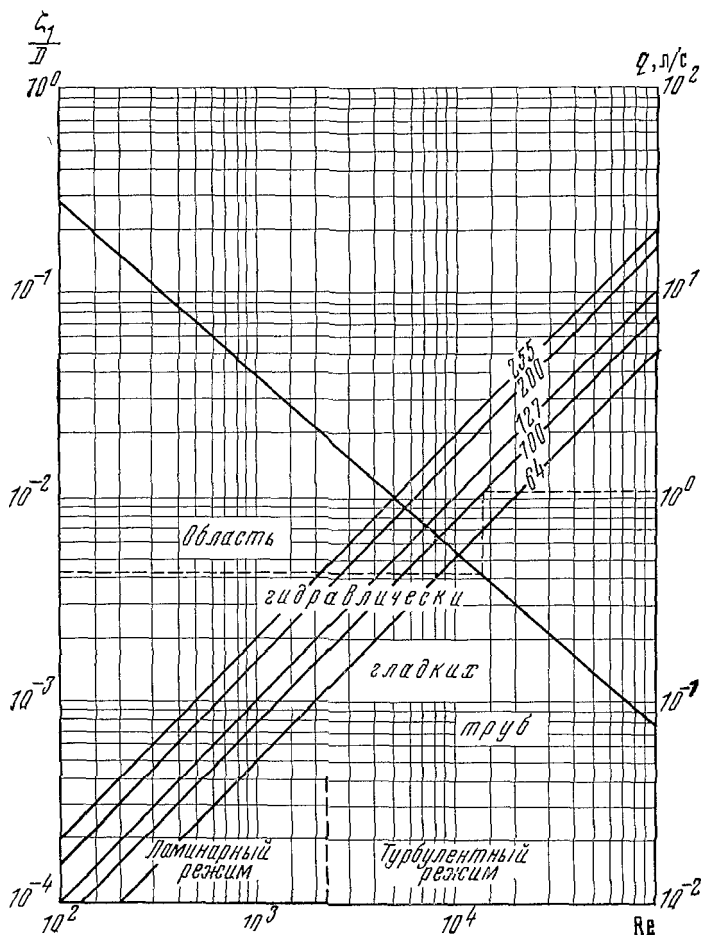


Рис 22 Номограмма для оценки гидравлического режима течения жидкости в скважине

оценки значения  $Re$  по величине расхода потока в скважине различного диаметра, а также для оценки величины максимального расхода в скважине с заданной относительной шероховатостью стенок, при котором ствол скважины может считаться гидравлически гладким. Ориентируясь на минимальное значение относительной шероховатости 0,001, можно полагать, что максимальное

значение  $Re$ , при котором ствол скважины считается гидравлически гладким, не должно превышать  $7 \cdot 10^4$ . При этом максимальный расход для диаметра скважины 100 мм равен 5 л/с. Из этого же рисунка следует, что уже при расходе потока более 0,2 л/с в скважине диаметром 100 мм имеет место турбулентный режим течения.

Для турбулентного режима течения в гидравлически гладкой трубе по [8] коэффициент трения рекомендуется определять из выражения

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \lg \frac{Re}{7}. \quad (IV.8)$$

При необходимости учета шероховатости стенок для расчета коэффициента трения в гидравлике рекомендуется формула [8]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \lg \frac{Re}{Re \frac{\xi_1}{D} + 7}. \quad (IV.9)$$

При  $Re \frac{\xi_1}{D} \ll 7$  формула (IV.9) сводится к формуле (IV.8), при больших значениях  $Re \frac{\xi_1}{D} \gg 7$  коэффициент гидравлического трения не зависит от  $Re$  и формула (IV.9) сводится к формуле

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1,8 \lg \frac{D}{\xi_1}. \quad (IV.10)$$

На рис. 23 приведено семейство кривых  $\lambda = f\left(Re, \frac{\xi_1}{D}\right)$ , построенных по формуле (IV.9). В работе [8] эти кривые сопоставлены с многочисленными экспериментами различных авторов. Из рассмотрения этого рисунка и других результатов многочисленных исследований гидравлики трубопроводов можно сделать вывод, что область шероховатости  $\frac{\xi_1}{D} > 0,01$  является специфической для гидрогеологических скважин. В работах, посвященных исследованию гидравлического трения в трубопроводах, почти отсутствуют сведения о проведении экспериментов с моделями, имеющими такую относительную шероховатость. Поэтому, чтобы воспользоваться формулой (IV.9) для расчета коэффициентов трения, необходимо располагать специальным методом оценки шероховатости  $\xi_1$ . Как отмечено выше,  $\xi_1$  представляет собой величину, пропорциональную высоте выступов шероховатости и учитывающую суммарное влияние характера внутренней поверхности канала на его гидравлическое сопротивление. Она является «суммарным» показателем шероховатости и может быть найдена лишь гидравлическим путем, т. е. на основе обработки опытных данных испытаний представительных образцов трубопроводов. Очевидно, что для исследования скважин такой прием неприемлем.



Мы не занимались исследованием гидравлики вполне шероховатых труб или моделей кавернозного ствола скважины для оценки параметров шероховатости и уточнения применимости приведенных выше формул. Это большая и самостоятельная область исследовательской работы. Следует учитывать, что профиль ствола

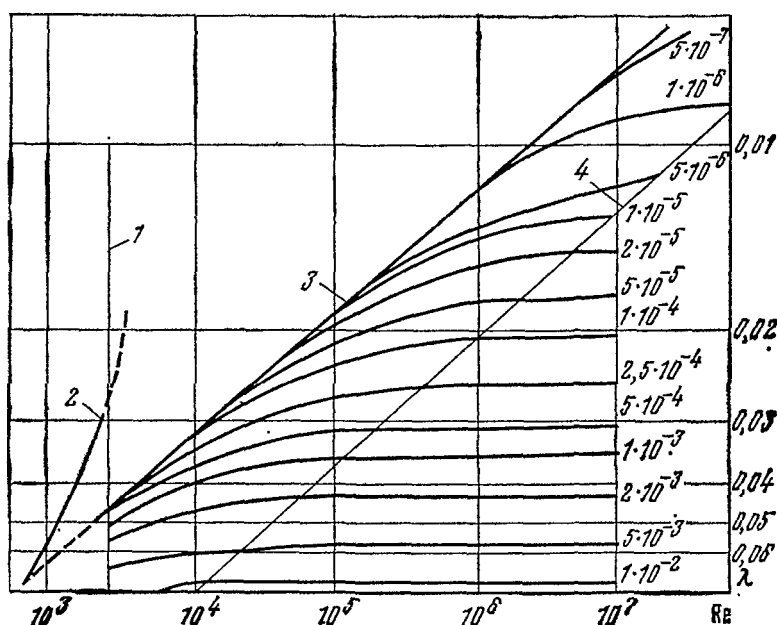


Рис. 23. Семейство кривых  $\lambda = f\left(\text{Re}, \frac{\xi_1}{D}\right)$ . По А. Д. Альтшулю [8].

Шифр кривых  $\frac{\varepsilon}{D}$ . 1 — граница областей ламинарного и турбулентного режимов; 2 — граница ламинарного режима; 3 — прямая гладких труб; 4 — граница квадратичной области  $\left(\text{Re} \frac{\xi_1}{D} < 100\right)$

скважины в настоящее время может быть исследован весьма приближенно. Существующие конструкции каверномеров, микрокаверномеров и профиломеров преследуют в настоящее время несколько иные цели и не могут быть использованы в данной проблеме. Поэтому, видимо, первоочередной задачей должно быть создание конструкций приборов для дистанционных измерений характеристических параметров ствола скважины, осложненного кавернами. Второй задачей может быть создание и исследование моделей скважины с обсадкой фильтрами или открытым стволом, моделирующих шероховатость в диапазоне  $\frac{\xi_1}{D} > 0,001$ , и установление коррелятивных соотношений между значениями коэф-

коэффициентов трения и параметрами шероховатости по кривым специальной кавернометрии или профилометрии, представленных в виде некоторых статистических показателей профиля ствола скважины.

До проведения таких исследований временно, видимо, следует ориентироваться на данные табл. 2, используя экстраполяцию значений  $\frac{\xi_1}{D}$  на основе микрокавернометрии или профилометрии, зарегистрированных в масштабе глубин 1:10 или 1:50 и в масштабе значений 1:1 или 1:2. Более мелкий масштаб может быть применен только при необходимости размещения кривой на диаграмме стандартной ширины.

В связи с этим имеет смысл проанализировать величину погрешности, допускаемой за счет такого малообоснованного выбора величины относительной шероховатости. Из рис. 23 или формулы (IV.9) видно, что даже заметные погрешности в выборе значения относительной шероховатости весьма слабо влияют на значение коэффициента гидравлического трения. Например, изменению относительной шероховатости на порядок соответствует изменение величины коэффициента гидравлического трения в 1,8 раза. Это позволяет пользоваться приведенной выше рекомендацией до создания более обоснованных приемов. В 1950 г. А. Д. Альтшулем [9] была предложена приближенная формула для расчета гидравлических сопротивлений трубопроводов, являющаяся по существу модификацией формулы (IV.9)

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\xi_s}{D} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (\text{IV.11})$$

Эта формула более удобна для расчетов. При условии

$$\text{Re} \frac{\xi_s}{D} \ll 68 \quad (\text{IV.12})$$

она аналогична формуле Блазиуса для коэффициента трения в гидравлически гладких трубах, которая является эмпирическим аналогом формулы (IV.8).

$$\lambda = 0,3164 \text{Re}^{-0,25}. \quad (\text{IV.13})$$

Формула (IV.13) хорошо согласуется с многочисленными опытами, обобщенными в [8], и часто рекомендуется в справочниках по гидравлике [14] для расчетов коэффициентов гидравлического трения. При условии

$$\text{Re} \frac{\xi_s}{D} \gg 68. \quad (\text{IV.14})$$

формула (IV.11) совпадает с формулой Шифринсона для вполне шероховатых труб

$$\lambda = 0,11 \left( \frac{\xi_s}{D} \right)^{0,25}. \quad (\text{IV.15})$$

Выполнив оценку коэффициента гидравлического трения, величину гидравлических потерь напора в пределах фильтрующих интервалов скважины, соответствующую долю этих потерь, отнесенной к рассматриваемому слою, можно определить из выражения (IV.3). Величина гидравлических потерь на глухих интервалах

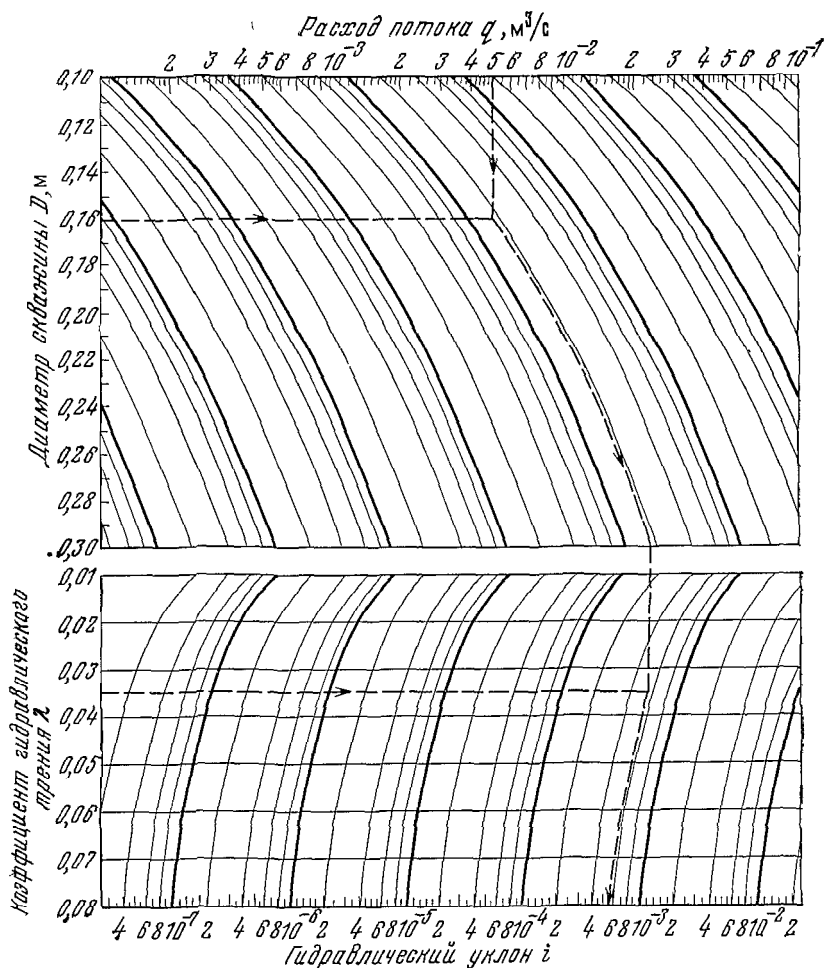


Рис. 24. Номограмма для расчета потерь напора в стволе скважины

лах скважины, также отнесенная к рассматриваемому слою, определится из выражения (IV.5).

Для упрощения вычислений можно воспользоваться номограммой (рис. 24), с помощью которой определяется потеря напора

на 1 м пути потока. Это значение потерь принято называть гидравлическим уклоном

$$i = \frac{\lambda q^2}{2gDW^2}, \quad (\text{IV.16})$$

Поскольку на участке в 1 м в пределах фильтрующего интервала значение расхода можно осреднить, то номограмма оказывается пригодной для расчета потерь  $S_i$  и  $S_{\Sigma}$ .

Г. С. Хованским [125] предложена для расчета гидравлического уклона интересная номограмма, рассчитанная на основании приведенных формул (рис. 25). Эта номограмма, кроме того, позволяет примерно оценить влияние шероховатости на величину гидравлического уклона.

Номограмма состоит из десяти параллельных шкал для следующих величин  $\Delta\zeta_0$ ,  $D$ ,  $\zeta_0 + \Delta\zeta_0$ ,  $I_{\text{л}}$ ,  $i_{\text{т}}$ ,  $I_{\text{т}}$ ,  $i_{\text{л}}$ ,  $v$ ,  $\nu$ ,  $q$ . Шкалы расположены на общей опоре. Величина  $\Delta\zeta_0$  характеризует степень отклонения режима течения жидкости от квадратичного. Если  $\Delta\zeta_0$  мало по сравнению с  $\zeta_0$ , режим течения приближается к квадратичному. Если  $\Delta\zeta_0$  по сравнению с  $\zeta_0$  имеет заметную величину, движение жидкости наблюдается в переходной области. Таким образом, величина  $\Delta\zeta_0$  характеризует влияние вязкости и скорости на величину  $\lambda$ . Это влияние проявляется как некоторое увеличение шероховатости. Для использования номограммы необходимо знать величины  $q$ ,  $\nu$ ,  $D$  и  $\zeta_0$ .

Для определения режима течения,  $v$  и  $i$  по номограмме поступают следующим образом. На шкалах  $v$  и  $q$  отмечают заданные значения этих характеристик. Прямая, соединяющая их, на шкале  $v$  определит значение скорости потока. Так же прямая делит шкалу  $\nu$  на две части, из которых верхняя отвечает ламинарному режиму, а нижняя — турбулентному. Если заданное значение  $\nu$  лежит в нижней части, то режим турбулентный, если в верхней части — ламинарный. Дальнейшее решение задачи зависит от режима течения.

Нетрудно видеть, что при расходах водного потока более 1 л/с в скважинах практически любого диаметра имеет место турбулентный режим. Поэтому рассмотрим схему использования номограммы для данного случая. По пересечению проведенной прямой шкалы  $I_{\text{т}}$  отмечается точка  $I_{\text{т}}$ . Между точкой шкалы  $v$  с найденным значением скорости и точкой шкалы  $\nu$  с заданным значением  $\nu$  проводится вторая прямая. В точке пересечения этой прямой со шкалой  $\Delta\zeta_0$  берется отсчет значения  $\Delta\zeta_0$ . Если прямая не пересекает шкалу  $\Delta\zeta_0$ , то в этом случае берется значение  $\nu$  в 10 или 100 раз больше заданного, а затем отсчет уменьшается во столько же раз. Далее проводится третья прямая между ранее найденной точкой на шкале  $I_{\text{т}}$  и точкой на шкале  $\zeta_0 + \Delta\zeta_0$ , имеющей значение  $\zeta_0 + \Delta\zeta_0$ . Пересечение этой прямой со шкалой  $i_{\text{т}}$  дает искомое значение гидравлического уклона.

Рассмотрим следующий пример:  $q = 10$  л/с,  $\nu = 0,01$  см<sup>2</sup>/с,  $D = 130$  мм. Зададим произвольно два значения  $\zeta_0$ : 1 и 10 мм. Вы-

ясним значение гидравлического уклона и погрешность, обусловленную достаточно произвольным заданием величины эквивалентной равномернозернистой шероховатости. Повторив описанный выше порядок построения прямых, для двух заданных значений  $\zeta_3$  получаем  $i_T$  0,0075 и 0,0104.

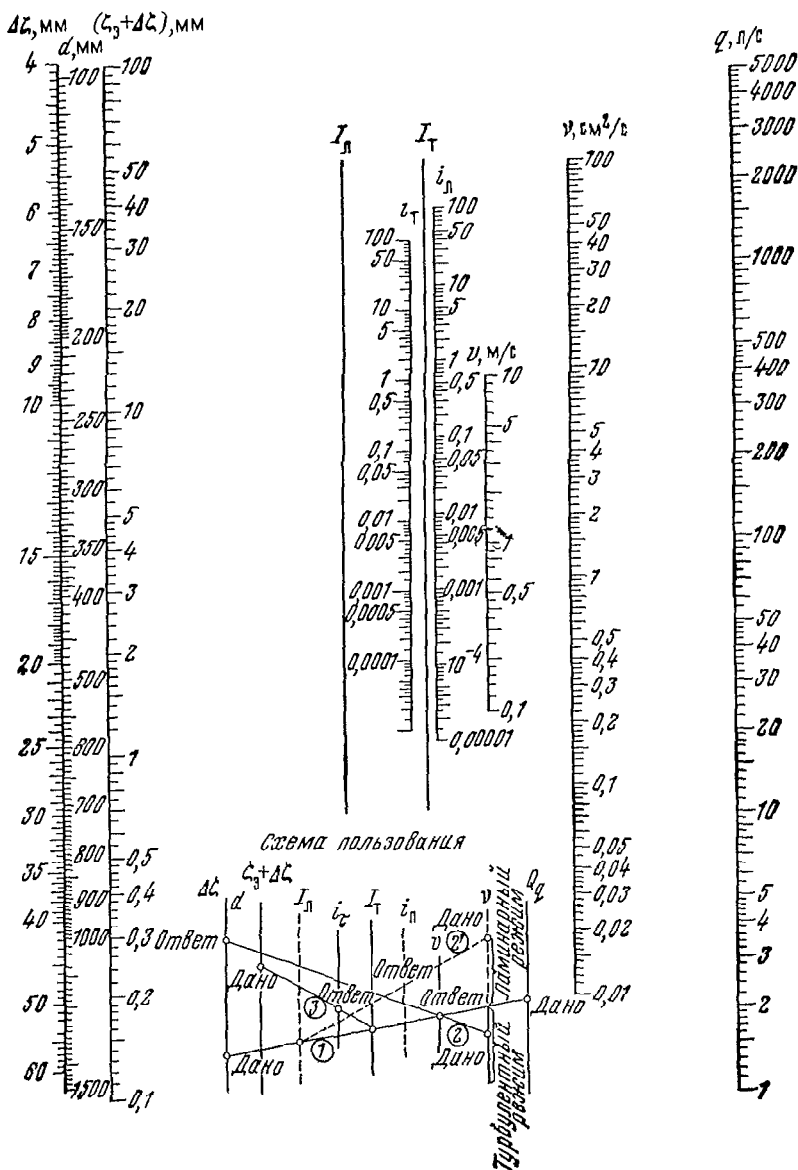


Рис. 25 Номограмма Г С. Хованского для расчета потерь напора в стволе скважины

Таким образом, при изменении величины шероховатости в 10 раз значение уклона изменилось на 38,8%. Это дополнительно свидетельствует о возможности использования данных высокоточной кавернометрии или профилометрии для оценки гидравлических потерь в скважине.

Необходимо отметить также возможность прямого измерения потерь напора в стволе скважины с помощью глубинных манометров. Для этого необходимо использовать манометры, достаточно чувствительные в диапазоне давлений, определяемых высотой столба жидкости в скважине и имеющие точность, близкую к точности уровнемеров. Такая техническая задача усложняется одним важным обстоятельством: прибор, помещенный в скважине, не должен создавать потерь напора, соизмеримых с величиной допустимых погрешностей.

## 2. ОЦЕНКА ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ НАПОРА В ПРИСКВАЖИННОЙ ЗОНЕ

Гидравлические потери напора в прискважинной зоне являются ключевой проблемой опытно-фильтрационных исследований. Отсутствие радикальных способов оценки этих потерь и их исключения из экспериментальных данных обусловило непредставительность результатов испытания пластов с помощью одиночных скважин и переход к методике исследования кустов наблюдательных скважин, расположенных в зоне потенциального поля за границей действия скин-эффекта. Рассмотренные гидравлические аспекты формирования интегральной функции водопритока в работающую скважину позволяют снова обратиться к этой проблеме.

Как отмечено выше, реальная форма расходограммы в общем случае может отражать изменчивость в вертикальном разрезе различных составляющих гидравлических сопротивлений, которые не могут быть однозначно диагностированы. Можно допустить также случай, когда неизвестно, какой фильтр находится в скважине и имеется ли он вообще. В этих условиях решение задачи должно строиться на общем формальном принципе. Отсутствие или наличие соответствующих сопротивлений должно отразиться в оцениваемых величинах сопротивления или потерь напора.

Таким общим принципом, свободным от субъективных факторов, может служить прием, основанный на кусочной аппроксимации фактических расходограмм прямолинейными отрезками с заданным предельным отклонением. Разбиение расходограммы соответствует расчленению разреза на слои (макропотоки второго порядка), в пределах которых удовлетворительно выполняется условие  $\frac{dq}{dz} \rightarrow \text{const.}$  Это тем более обеспечивает условие  $\frac{dS_f}{dz} \rightarrow 0$ .

Таким образом, в основу схематизации разреза положена физическая модель притока, соответствующая второму частному случаю (см. гл. III, раздел 2).

В соответствии с этой моделью притока скин-эффект скважины в границах выделенного слоя определяется сопротивлениями  $\varphi_{ci}$ ,  $\varphi_{vi}$  и  $\varphi_{ti}$ . Сопротивление  $\varphi_{ci}$  задано внутренним диаметром ствола скважины, который может быть измерен непосредственно. Таким образом, задача сводится к определению параметра  $\alpha_2$ , зависящего от сопротивлений  $\varphi_{vi}$  и  $\varphi_{ti}$ , и уже затем к установлению потери напора на этих сопротивлениях.

Алгоритм решения этой задачи предусматривает следующую реализацию. На основе уравнения (III.57) находим  $\alpha_2$  и затем

$$\varphi_t + \varphi_v = \frac{\varphi_c}{\alpha_2^2}. \quad (\text{IV.17})$$

Индекс « $i$ » у соответствующих величин, обозначающий их принадлежность к оцениваемому слою, для упрощения записи опускаем.

Функция потерь напора, образованная в результате совместного действия сопротивлений  $\varphi_t$  и  $\varphi_v$  согласно схеме на рис. 10 будет равна

$$S_{tv}(r_0, z) = S_f + S_s + S_t + S_v - \varphi_f \frac{dq}{dz} = (\varphi_t + \varphi_v) \left( \frac{dq}{dz} \right)^2. \quad (\text{IV.18})$$

Заменяя  $\frac{dq}{dz}$  выражением из уравнения (III.57), определяем средневзвешенное значение потерь напора для рассматриваемого слоя

$$\begin{aligned} S_{tv}(r_0) &= \frac{1}{m} \int_0^m S_{tv}(r_0, z) dz = \\ &= \frac{\varphi_c}{m} \int_0^m \left[ \frac{(q_m - q_0 \operatorname{ch} \alpha_2 m) \operatorname{ch} \alpha_2 z + q_0 \operatorname{sh} \alpha_2 m \operatorname{sh} \alpha_2 z}{\operatorname{sh} \alpha_2 m} \right]^2 dz \quad (\text{IV.19}) \end{aligned}$$

Найденное таким образом значение потерь напора равно сумме потерь на всех сопротивлениях в пределах от  $r=r_0$  до  $r=r_t$ . Разность

$$S_H(r_0) - S_{li} - S_{ri} - S_{tvi}(r_0) = S_i(r_t) \quad (\text{IV.20})$$

равна действующему понижению для данного слоя на расстоянии  $r_t$  от скважины. Действующее понижение для данного слоя на стенке скважины  $r=r_0$  связано с найденным соотношением

$$S_i(r_0) = S_i(r_t) \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{\ln \frac{R}{r_t}}. \quad (\text{IV.21})$$

В условиях неустановившегося режима фильтрации

$$S_i(r_0, t) = S_i(r_t, t) \frac{\ln \frac{2,25at}{r_0^2}}{\ln \frac{2,25at}{r_t^2}}. \quad (\text{IV.22})$$

Формулы для приведенного дебита, соответствующего условиям работы гидродинамически совершенной скважины, имеющей понижение  $S_n$ , при неустановившемся режиме примут вид

$$\Delta Q_i(r_0, t) = \frac{\Delta Q_{ni}(r_0, t) S_n(r_0, t) \ln \frac{2,25at}{r_t^2}}{S_i(r_t, t) \ln \frac{2,25at}{r_0^2}} \quad (\text{IV.23})$$

и при установившемся режиме

$$\Delta Q_i(r_0) = \frac{\Delta Q_{ni}(r_0) S_n(r_0)}{S_i(r_t)} \frac{\ln \frac{R}{r_t}}{\ln \frac{R}{r_0}}. \quad (\text{IV.24})$$

Значение  $S_{tv}(r_0)$  для макропотока первого порядка, состоящего из  $n$  слоев, определится как средневзвешенное по мощности значение из  $n$  значений  $S_{tv}(r_0)$ , определенных по (IV.19)

$$S_{tvj}(r_0) = \frac{\sum_{i=1}^n S_{tvi}(r_0) m_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (\text{IV.25})$$

Аналогично для скважины, состоящей из  $N$  макропотоков первого порядка, будем иметь

$$S_{tv}(r_0) = \frac{\sum_{j=1}^N S_{tvs}(r_0) m_j}{\sum_{j=1}^N m_j}. \quad (\text{IV.26})$$

Вычисление потерь напора  $S_{tv}(r_0)$ , используя прием кусочно-прямолинейной аппроксимации реальной расходограммы, производится следующим образом.

При формальной аппроксимации реальной расходограммы отрезками прямых возможность нахождения  $\alpha_2$  путем совмещения их с теоретическими кривыми ограничена. Уплотнение шкалы шифров в области малых значений  $\alpha_2^*$  и естественный разброс точек измерения не позволяют получить удовлетворительную точ-



ность при таком способе Поэтому для оценки  $\alpha_2$  необходим специальный прием.

Предварительно по наблюдаемой последовательности дискретных значений расхода строится осредняющая расходограмма (тренд) для всей скважины. Отдельные точки с ураганными значениями из рассмотрения исключаются. При построении тренда выполняются необходимые правила осреднения экспериментальных данных, учитывающие погрешность их получения. Считая теперь, что каждое значение расхода на тренде определено достоверно, производим разбивку его на такое число отрезков, при котором величина отклонения прямых, соединяющих их краевые значения, от линии тренда, не превышает достигнутую предельную абсолютную или относительную погрешность измерения. Достигнутая при этом величина прогиба, выраженного в относительных единицах, может быть оценена из подсчета средневзвешенных расходов в пределах выделенного слоя

$$\delta = \frac{\bar{q} - \tilde{q}}{\bar{q}}, \quad (\text{IV.27})$$

где  $\bar{q} = 0,5(q_m + q_0)$ ;  $\tilde{q}$  — средневзвешенный расход в пределах слоя, определенный по тренду с помощью планиметрирования

Однако во многих случаях этот прием оценки  $\delta$  может оказаться недостаточно надежным. Например, при формальном разбиении расходограммы на отрезки могут выделяться интервалы с обратной кривизной. Это объясняется неоднородностью свойств в их пределах, условностью их осреднения и субъективностью подхода к выделению квазиоднородных слоев. Однако такое распределение водопритоков относительно аппроксимирующей прямой при  $\frac{dq}{dz} > 0$  не соответствует теоретическому, так как по условию  $\bar{q} > \tilde{q}$ . Поэтому после расчленения тренда на кусочные отрезки значение  $\delta$  проще всего задать равным предельной относительной погрешности измерения, считая его первым приближением.

Запишем теоретическое значение средневзвешенного расхода в пределах выделенного слоя

$$\tilde{q} = \frac{1}{m} \int_0^m q(z) dz = \frac{q_m + q_0}{\alpha_2 m} \operatorname{th} \frac{\alpha_2 m}{2}. \quad (\text{IV.28})$$

С учетом предельной относительной погрешности аппроксимации  $\delta$  значение средневзвешенного расхода, рассчитанного по прямолинейной функции, будет равно

$$\tilde{q} = \frac{q_m + q_0}{2} (1 - \delta). \quad (\text{IV.29})$$

Приравняв (IV.28) и (IV.29), получим следующее трансцендентное уравнение для определения  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = \frac{2 \operatorname{th} \frac{\alpha_2 m}{2}}{m(1-\delta)}. \quad (\text{IV.30})$$

Как видно,  $\alpha_2$  не зависит от значений расхода в пределах слоя и на его границах, но полностью определяется точностью задания величины  $\delta$ .

Рассматривая эту же задачу относительно значения расхода в середине слоя, получим более удобную формулу для оценки  $\alpha_2$

$$\alpha_2 = \frac{\operatorname{Arch} \frac{1}{1-\delta}}{0,5m}. \quad (\text{IV.31})$$

Если предположить, что измерения величины расхода произведены с нулевой погрешностью, то  $\delta$  будет стремиться к величине отклонения от прямой теоретической расходограммы, соответствующей модели притока по пятому частному случаю, рассмотренному в разделе 2 главы III

$$\delta_{\min} = \frac{q_m + q_0 - \frac{2C_1}{\alpha_5} \operatorname{tg} \left\{ \frac{\alpha_5}{2} C_1 \left( \frac{m}{2} + C_2 \right) \right\}}{q_m + q_0}. \quad (\text{IV.32})$$

Таким образом, диапазон поиска  $\delta$  ограничен снизу величиной, определяемой выражением (IV.32).

После нахождения  $\alpha_2$  искомое значение потерь напора  $S_{iv}(r_0)$  может быть подсчитано по формуле

$$S_{iv}(r_0) = \frac{\varphi_c}{\alpha_2^2} \frac{(q_m - q_0)^2}{m^2} \quad (\text{IV.33})$$

или по более точной формуле, полученной на основании (IV.19)

$$S_{iv}(r_0) = \frac{\varphi_c}{\alpha_2 m} \left[ \frac{(q_m - q_0 \operatorname{ch} \alpha_2 m)^2 (\operatorname{sh} 2\alpha_2 m + 2\alpha_2 m)}{4 \operatorname{sh}^2 \alpha_2 m} + \frac{q_0^2 (\operatorname{sh} 2\alpha_2 m - 2\alpha_2 m)}{4} + \frac{4q_0 (q_m - q_0 \operatorname{ch} \alpha_2 m) (\operatorname{ch} \alpha_2 m - 1)}{\operatorname{sh}^2 \alpha_2 m} \right]. \quad (\text{IV.34})$$

Фактически прямолинейный отрезок расходограммы может быть проведен с меньшим или большим отклонением его граничных значений от действительных, так как  $q_m$  и  $q_0$  тоже обладают погрешностью. Поэтому для коррекции полученного результата используется следующая обратная связь.

Запишем функцию  $S_{iv}(r_0, z)$  в виде

$$S_{iv}(r_0, z) = \varphi_c \left[ \frac{(q_m - q_0 \operatorname{ch} \alpha_2 m) \operatorname{ch} \alpha_2 z + q_0 \operatorname{sh} \alpha_2 m \operatorname{sh} \alpha_2 z}{\operatorname{sh} \alpha_2 m} \right]^2 \quad (\text{IV.35})$$

и определим ее значение на кровле слоя

$$S_{iv}(r_0, m) = \varphi_c \left( \frac{q_m \operatorname{ch} \alpha_2 m - q_0}{\operatorname{sh} \alpha_2 m} \right)^2, \quad (\text{IV.36})$$

на подошве слоя

$$S_{tv}(r_0, 0) = \varphi_c \left( \frac{q_m - q_0 \operatorname{ch} \alpha_2 m}{\operatorname{sh} \alpha_2 m} \right)^2 \quad (\text{IV.37})$$

и их разность

$$S_{tv}(r_0, m) - S_{tv}(r_0, 0) = \varphi_c (q_m^2 - q_0^2). \quad (\text{IV.38})$$

Как видно, разность этих значений не зависит от  $\alpha_2$ .

Запишем теперь значение действующего понижения  $S_i(r_l)$  для определения других составляющих потерь напора на кровле слоя

$$S_i(r_l) = S_H - S_{tv}(r_0, m) - S_{lH} - S_{rK}, \quad (\text{IV.39})$$

на подошве слоя

$$S_i(r_l) = S_H - S_{tv}(r_0, 0) - S_{lH} - S_{rH}. \quad (\text{IV.40})$$

Поскольку по условию аппроксимации расходограммы прямолинейными отрезками левые части (IV.39) и (IV.40) равны, то

$$S_{tv}(r_0, m) - S_{tv}(r_0, 0) = S_r, \quad (\text{IV.41})$$

где  $S_r$  — потеря напора на трение внутри скважины в пределах слоя.

Однако  $S_r$  равно

$$S_r = \frac{\lambda}{2gDW^2} \int_0^m q^2(z) dz. \quad (\text{IV.42})$$

Тогда, взяв интеграл в правой части (IV.42) и выразив левую часть через (IV.38), имеем

$$q_m^2 - q_0^2 = \frac{\lambda}{2D\alpha_2 \operatorname{sh}^2(\alpha_2 m)} \{0,25 (q_m^2 + q_0^2) [\operatorname{sh}(2\alpha_2 m) - 2\alpha_2 m] + \\ + q_m q_0 [\alpha_2 m \operatorname{ch}(\alpha_2 m) - \operatorname{sh}(\alpha_2 m)]\}. \quad (\text{IV.43})$$

Используя найденную оценку  $\alpha_2$ , проверяется выполнение тождества (IV.43). При неудовлетворительной сходимости пересматривается исходная величина  $\delta$  и цикл вычислений повторяется.

Однако в связи с тем, что величина левой части (IV.43) зависит от абсолютных значений расхода на границах слоя, измеряемых с некоторой погрешностью, перспективна, видимо, проверка достоверности подбора  $\alpha_2$  путем непосредственного измерения потерь напора на трение в пределах слоя с помощью высокоточного дифманометра\*.  $S_r$  в этом случае будет определяться интегрированием приращений показаний дифманометра в пределах слоя.

Нетрудно видеть, что проверка тождества (IV.43) возможна с точностью задания коэффициента  $\lambda$ .

---

\* Для проведения исследований с указанной целью необходима специальная разработка таких приборов.

Изложенные принципы методики оценки потерь напора  $S_{iv}(r_0)$  еще полностью не разработаны. Она не получила еще необходимого экспериментального обоснования. В настоящее время во ВСЕГИНГЕО проводятся исследования фильтрационных моделей скважин с фильтром для выявления достоверности методики.

### 3. ОЦЕНКА РАДИУСА ПРОЯВЛЕНИЯ СКИН-ЭФФЕКТА

Радиус проявления скин-эффекта, характеризующийся значением  $r_t$ , определим из следующих условий. Поскольку функции  $S_v$  и  $S_t$  являются квадратичными, их можно рассматривать совместно. Сумма их также является квадратичной функцией. Квадратичной является функция  $S_{tr}(r)$  с коэффициентом  $\varphi_v + \varphi_t$ , характеризующим сопротивление потоку в турбулентной области. Заменяем ее некоторой кажущейся функцией  $\bar{S}_t(r)$  с коэффициентом  $\bar{\varphi}_t = \varphi_v + \varphi_t$ . По физическому смыслу коэффициент  $\bar{\varphi}_t$  аналогичен коэффициенту  $\varphi_t$ , но в нем значение коэффициента фильтрации  $\bar{k}_t$  также заменим на кажущееся  $\bar{k}_t$ , обобщенно характеризующее прискважинную зону вместе с фильтром. В этом случае

$$\bar{\varphi}_t = \frac{\varphi_c}{\alpha_2^2}. \quad (\text{IV.44})$$

Коэффициент сопротивления  $\bar{\varphi}_t$  в соответствии с [101] может быть выражен в виде

$$\bar{\varphi}_t = \frac{\frac{r_t}{r_0} - 1}{4\pi^2 \bar{k}_t^2 r_t}, \quad (\text{IV.45})$$

где  $\bar{k}_t$  — коэффициент турбулентной фильтрации жидкости в зоне с радиусом  $r_t$ .

Радиус  $r_t$  соответствует расстоянию от оси скважины до точки сопряжения депрессионных кривых в зонах турбулентного и ламинарного режимов фильтрации. В ней значения градиентов давления равны.

Запишем уравнения для этих депрессионных кривых

$$\bar{S}_t(r) = \bar{\varphi}_t \frac{(q_m - q_0)^2}{m^2}; \quad (\text{IV.46})$$

$$S_t(r, t) = \frac{q_m - q_0}{4\pi (km)} \ln \frac{2,25at}{r^2}. \quad (\text{IV.47})$$

Значения градиентов давления на контуре  $r_t$  равны

$$\left. \frac{\partial \bar{S}_t(r)}{\partial r} \right|_{r=r_t} = - \frac{\bar{\varphi}_t (q_m - q_0)^2}{m^2} \frac{r_0}{r_t (r_t - r_0)}; \quad (\text{IV.48})$$

$$\left. \frac{\partial S_t(r, t)}{\partial r} \right|_{r=r_t} = - \frac{q_m - q_0}{2\pi (km)} \frac{1}{r_t}. \quad (\text{IV.49})$$

Приравняв правые части этих уравнений, получим формулу для оценки величины  $r_t$

$$r_t = r_0 \left[ \frac{2\pi (km) \bar{\varphi}_t (q_m - q_0)}{m^2} + 1 \right]. \quad (\text{IV.50})$$

Значение  $(k, m)$  определяется независимо из анализа функции (IV.47).

## ВЫВОДЫ

1. Гидравлические потери напора в стволе скважины, отнесенные к рассматриваемому пласту, являются функцией глубины его залегания. Они равны сумме потерь в глухих и фильтрующих интервалах скважины. Для практических оценок этих потерь рекомендована номограмма Хованского.

2. Оценка гидравлических потерь в прискважинной зоне осуществляется на основе анализа кусочных расходограмм, аппроксимируемых прямолинейными отрезками. Алгоритм интерпретации предусматривает определение величины коэффициента относительного сопротивления  $\alpha_2$  и величины понижения на расстоянии  $r_t$  от скважины, соответствующем границе зоны нарушения линейного плоскорадиального режима фильтрации.

3. Оценка величины  $r_t$  возможна при исследовании скважины в условиях неустановившегося режима фильтрации.

4. Экспериментальные исследования достоверности оценки коэффициента  $\alpha_2$  и величины  $r_t$  являются первоочередной задачей дальнейших работ.

## ГЛАВА V

### МЕТОДИКА ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ГЛУБИННОЙ РАСХОДОМЕТРИИ

#### 1. ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНОЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Как следует из гл. II, при  $t > 0$  гидродинамический режим скважины и каждого из совместно исследуемых пластов в общем случае возбуждения системы при  $Q = Q(t)$  и  $S = S(t)$  описывается интегралом Дюамеля. Аппроксимация реально наблюдаемых данных с помощью этой зависимости и ее анализ составляют существо методики решения обратной задачи расходометрического исследования скважины в неоднородной среде на стадии неустановившегося режима фильтрации.

При проведении расходометрии в неустановившемся режиме с изменяющимися параметрами возбуждения скважины по  $Q$  и  $S$  в распоряжении исследователя имеется:

1) значение установившегося статического уровня воды в скважине  $H_0$ , соответствующего моменту  $t = 0$ ;

2) значения установившихся дебитов перетока воды по стволу скважины  $Q_{0j}$ , соответствующих условию (II.46);

3) график понижения уровня воды в скважине  $S_n(t)$  с момента возбуждения  $t > 0$ ;

4) график изменения дебита скважины  $Q_n(t)$  и дебитов одновременно исследуемых пластов  $Q_{nj}(t)$  при  $t > 0$ .

В случае возбуждения скважины с постоянным дебитом, как показано в разделе 2 главы II, гидродинамический режим скважины и пластов описывается уравнением Тейса. Это упрощает методику работ по п. 4, так как уже при достаточно малых значениях времени с момента возбуждения скважины дебиты совместно исследуемых пластов становятся независимыми от времени, что позволяет ограничиться разовой их регистрацией.

Решение обратной задачи выполним для общего случая возбуждения скважины и пластов в режиме  $Q_n(t)$ ,  $S_n(t)$ .

Начальными и граничными условиями решения поставленной задачи относительно всего исследуемого разреза скважины и его более мелких подразделений являются:

$$Q_n(r_0, t) = \begin{cases} Q_0(r_0) & \text{при } t = 0; \\ Q(r_0, t) & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Индексы « $j$ » и « $i$ », обозначающие принадлежность функции к соответствующему объекту, здесь и в нижеследующих выкладках для упрощения записей опускаются.  $Q_0(r_0)$  — любое фиксируемое значение дебита перетока, в том числе нуль. Именно такими усло-

виями характеризуется работа системы разнонапорных водоносных пластов, соединенных скважиной до начала возбуждения, поскольку по ее стволу всегда происходят установившиеся перетоки из одних пластов в другие. В случае равенства статических уровней таких перетоков не наблюдается и тогда  $Q_0(r_0) = 0$

В любом случае полагая, что при  $t=0$  водоносный пласт работал при установившемся режиме, последний по отношению к рассматриваемому неустановившемуся режиму можно принять за нулевые начальные условия

$$\Delta Q(r_0, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ \Delta Q(r_0, t) & \text{при } t > 0; \end{cases}$$

$$S(r_0, t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0, \\ S(r_0, t) & \text{при } t > 0. \end{cases}$$

Именно такие условия были приняты при решении прямой задачи в гл II

В традиционных методах проведения и обработки опытно-фильтрационных исследований возмущающих скважин в неустановившемся режиме предусматривается выполнение условия  $Q = \text{const}$ . Это достигается либо заданием постоянной производительности насосных устройств, либо путем осреднения реальных графиков  $\Delta Q_n(r_0, t)$  в области малых значений времени при достаточно большой общей длительности возбуждения и относительно небольших отклонениях значений дебита от средней величины. При получении закономерных изменений дебита скважины ими либо пренебрегают, либо приводят опытные данные к требуемому виду  $Q = \text{const}$ , используя различные математические приемы преобразования реальных функций  $S = S_n(t)$ ,  $Q = Q_n(t)$  в некоторые производные функции  $S^* = S^i(t)$ ,  $Q^* = \text{const}$

Существует несколько способов выполнения такого преобразования [24, 62, 129, 142]. В большей части их при вычислении преобразованных функций используется параметр «преобразованного» понижения или «преобразованного» времени наблюдения. Этот прием не очень удобен, поскольку затрудняет возможность анализа реального неустановившегося режима и изучения характера неоднородности заскважинного пространства. Последнее удобно проводить путем анализа зависимости в масштабе реального времени наблюдения и линейного понижения. Этому условию в большей мере отвечает способ обработки данных гидродинамического режима, основанный на представлении нестационарной фильтрации в области изображений по Лапласу [26]. При постепенном характере изменения функций  $S = S(r_0, t)$ ,  $Q = Q_n(r_0, t)$  и достаточной длительности наблюдения он может быть применен также для обработки расходометрических исследований водоносных систем при неустановившемся возбуждении скважины. Необходимо отметить также приемы обработки данных гидродинамического режима с переменными  $S$  и  $Q$ , учитывающие возможность аналитического выражения функции  $Q =$

$= Q_{\text{п}}(r_0, t)$ , и на этой основе получения точного решения интеграла Дюамеля [20, 23, 90, 135, 147].

Таким образом, для обработки данных гидродинамического режима совместно исследуемых пластов методом расходомерии возмущающей скважины может быть применен в принципе любой из методов решения обратной задачи. При выборе следует лишь учитывать особенности этих методов, обеспечивающие их успешное применение в конкретном случае.

Для реализации решения обратной задачи используется алгоритм, полученный на основе применения выражений (II.55), (II.61) и (II.127) для описания работы скважины, пластов и слоев при их совместном исследовании в неустановившемся режиме при нулевых начальных условиях. После определения гидравлических потерь напора в скважине и прискважинной зоне и выражения функции действующего понижения в этих уравнениях по (IV.22), исходное уравнение (без применения индексов) будет иметь вид

$$S(r_t, t) = \frac{1}{4\pi km} \int_0^t w(r_t, \tau) \Delta Q_{\text{н}}(r_0, t - \tau) d\tau. \quad (\text{V.1})$$

Интервал прослеживания экспериментальных функций  $(0, t)$  разбивается на ряд точек:  $t_0=0, t_1, t_2, \dots, t_n=t$ . Тогда уравнение (V.1) для каждого из обозначенных моментов времени можно записать так:

$$S(r_t, t) = \frac{1}{4\pi km} \left[ \int_0^{t_1} w(r_t, \tau) \Delta Q_{\text{н}}(r_0, t - \tau) d\tau + \right. \\ \left. + \int_{t_1}^{t_2} w(r_t, \tau) \Delta Q_{\text{н}}(r_0, t - \tau) d\tau + \dots + \int_{t_{n-1}}^{t_n} w(r_t, \tau) \Delta Q_{\text{н}}(r_0, t - \tau) d\tau \right]. \quad (\text{V.2})$$

Для момента времени  $t=t_1$  при малости отрезков разбиения интервала наблюдений

$$S(r_t, t_1) = \frac{1}{4\pi km} \int_0^{t_1} w(r_t, \tau) \Delta Q_{\text{н}}(r_0, t_1 - \tau) d\tau \simeq \frac{\Delta Q_{\text{н}}(r_0, \bar{t}_1)}{4\pi km} \int_0^{t_1} w(r_t, \tau) d\tau, \quad (\text{V.3})$$

где  $\bar{t}_1$ —некоторое среднее значение в интервале  $(0, t_1)$ ;  $\Delta Q_{\text{н}}(r_0, \bar{t}_1)$ —значение дебита, соответствующее времени  $\bar{t}_1$ .

Составляя аналогичные выражения для других моментов времени и обозначая

$$A_i = \frac{1}{4\pi km} \int_{t_{i-1}}^{t_i} w(r_t, \tau) d\tau, \quad (\text{V.4})$$





Путем дифференцирования уравнения (V.8) получаем систему уравнений для определения  $A_i$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^i A_k \Delta Q_H(r_0, \bar{t}_{i-k+1}) \Delta Q_H(r_0, \bar{t}_{i-l+1}) + A_l \left[ \sum_{i=1}^n \Delta Q_H^2(r_0, \bar{t}_{i-l+1}) + \alpha \right] = \\ = \sum_{i=1}^n S(r_i, t_i) \Delta Q_H(r_0, \bar{t}_{i-l+1}) \quad (\text{V.9})$$

при  $l = 1, 2, \dots, n, l \leq i$ .

Получилась система линейных уравнений, которая до  $n=60$  легко может быть решена на современных ЦВМ\*.

Таким образом, в результате получаем преобразованные графики изменения понижения в масштабе реально наблюдаемого времени для каждого оцениваемого водоносного объекта неоднородной системы, соответствующие условию возбуждения каждого из них при постоянном дебите, равном единице. Уравнения этих графиков для различных объектов при принятой схематизации фильтрационного разреза будут иметь вид

$$S^*(r_i, t) = \frac{1}{4\pi km} \left[ -Ei \left( -\frac{r_i^2}{4at} \right) \right]. \quad (\text{V.10})$$

Дальнейшая интерпретация зависимостей (V.10) общеизвестна [17]. При значениях аргумента менее 0,1 [15, 17, 133, 150], что для случая исследования одиночной скважины выполняется в первые минуты, они приводятся к уравнениям прямой в координатах  $S^* - \lg t$

$$S^*(r_i, t) = \frac{0,183}{km} \lg \frac{2,25at}{r_i^2}. \quad (\text{V.11})$$

Определив угловой коэффициент  $C$  и начальную ординату  $A_0$  этих прямых, получаем расчетные формулы для оценки индивидуальных параметров слоев и пластов, принимая последние как квазиоднородные, или приведенных параметров всей исследуемой системы

$$km = \frac{0,183}{C}; \quad (\text{V.12})$$

$$\lg \frac{1a}{r_i^2} = \frac{A_0}{C} - 0,35; \quad (\text{V.13})$$

$$\lg a = \frac{A_0}{C} + 2 \lg r_i - 0,35. \quad (\text{V.14})$$

---

\* Математическая разработка изложенного способа решения обратной задачи была выполнена А. А. Плетневым [37]. Программа на языке АЛГОЛ-60 по данному алгоритму составлена З. К. Добрыниной.

Нетрудно заметить, что если гидродинамический режим работы взаимодействующих пластов соответствует условию  $\Delta Q_H(r_0, t) = \text{const}$ , а это возможно при возбуждении скважины с постоянной производительностью и выполнении условия (II.75), преобразованные функции изменения понижений будут равны действующему понижению, деленному на  $\Delta Q_H$ , т. е.

$$S^*(r_t, t) = \frac{S(r_t, t)}{\Delta Q_H(r_0)} = \frac{1}{4\pi km} \left[ -Ei \left( -\frac{r_t}{4at} \right) \right]. \quad (\text{V.15})$$

Это обстоятельство может быть учтено в методике работ, что позволит ограничиться разовой регистрацией расходограммы после наступления критического времени возбуждения скважины по условию (II.75).

Проверка алгоритма решения обратной задачи расходомерии в неуставившемся режиме при общем случае возбуждения скважины выполнена на тестовом примере, в качестве которого использовано теоретическое решение для функции понижения при линейном изменении дебита скважины [23]. На основании приведенного в этой работе уравнения и таблиц вспомогательных функций рассчитана функция  $S=S(t)$  для заданных параметров водоносного горизонта и дебита, изменяющегося линейно в течение 1 сут от 10 до 50 м<sup>3</sup>/сут. Эти данные были подвергнуты обработке по приведенному выше алгоритму. Исходные кривые и результирующая функция  $S^* = f(\lg t)$  приведены на рис. 26. Расчет водопроницаемости и пьезопроводности по формулам (V.12) и (V.14) дал значения:  $km = 984$  м<sup>2</sup>/сут,  $a = 1,1 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут при заданных для расчета соответственно 1000 м<sup>2</sup>/сут и  $1 \cdot 10^6$  м<sup>2</sup>/сут. Таким образом, можно считать доказанной возможность использования приведенного алгоритма в обратной задаче расходомерии при неуставившемся режиме возбуждения скважины и пластов.

После оценки  $km$  и  $\frac{a}{r_t^2}$  можно выполнить также оценку приведенных напоров подземных вод (статических уровней) каждого пласта. При этом исходим из следующих соображений. Установившийся режим можно рассматривать как некоторый предельный случай неуставившегося режима. Таким предельным случаем неуставившегося режима, принимаемого за установившееся состояние перетока, является выполнение условия (II.29). Для этого состояния водообмен между пластами по стволу скважины правомерно записать с помощью уравнения Дюпюи

$$Q_{0j}(r_0) = \frac{2\pi (km)_j S_{0j}(r_t)}{\ln R/r_t}, \quad (\text{V.16})$$

где

$$S_{0j}(r_t) = H_0 - H_j - \Delta S_j^0;$$

$$\frac{R}{r_t} = 1,5 \sqrt{\frac{a_t}{r_t^2} t_0};$$

$\Delta S_i^0$  — сумма гидравлических потерь напора в скважине и околоскважинной зоне с радиусом  $r_i$  в условиях перетекания воды по скважине при восстановленном уровне гидродинамического равновесия.

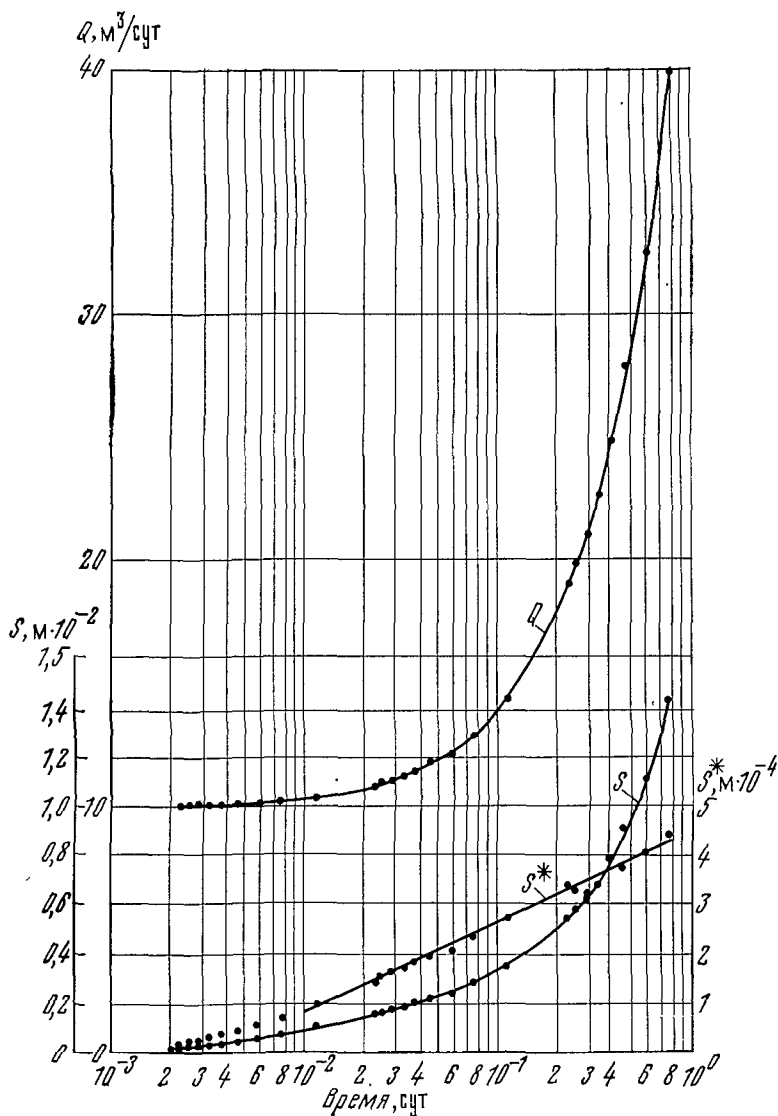


Рис. 26. Пример контрольной проверки алгоритма интерпретации экспериментальных функций  $Q=Q(t)$  и  $S=S(t)$

Зная величины установившихся дебитов перетока между пластами  $Q_{0j}(r_0)$  и время нахождения скважины в покое после бу-

рения  $t_0$ , находим из (V.16) значения индивидуальных статических уровней пластов по формуле

$$H_j = H_0 - \frac{Q_{0j}(r_0) \ln \frac{R}{r_t}}{2\pi (km)_j} - \Delta S_j^0 \quad (\text{V.17})$$

или проще

$$H_j = H_0 - S_{0j}(r_t) - \Delta S_j^0, \quad (\text{V.18})$$

где

$$\Delta S_j^0 = S_{ij} + S_{rj} + S_{ivj}(r_0).$$

Нетрудно видеть, что если при восстановленном уровне воды в скважине не наблюдается перетоков между пластами, то их статические уровни равны статическому уровню, непосредственно измеренному в скважине.

## 2. ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНОЙ ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

В рамках рассматриваемой задачи, ограниченной анализом возмущения, наложенного на данное состояние гидрогеологической системы, под установившимся режимом возбуждения скважины понимается такое его состояние, при котором изменения уровня воды в скважине (при неизменном дебите) находятся в пределах точности средств измерения или не имеют направленного характера. При таком понимании установившегося режима его можно представить как некоторое предельное состояние неустановившегося режима, при котором водоприток к скважине удовлетворительно описывается уравнением Дюпюи. Тогда из уравнения (II.79) при  $t > t_{кр}$  получим

$$S_j(r_0) = \frac{\Delta Q_j(r_0) \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi (km)_j}. \quad (\text{V.19})$$

Выразив  $S_j(r_0)$  по формуле (IV.21), вместо (V.19) будем иметь

$$S_j(r_t) = \frac{\Delta Q_j(r_0) \ln \frac{R}{r_t}}{2\pi (km)_j}. \quad (\text{V.20})$$

При взаимодействии разнонапорных пластов в одной скважине по ее стволу происходят установившиеся перетоки, которые могут быть также выражены в виде

$$H_0 - H_j - \Delta S_j^0 = \frac{Q_{0j}(r_0) \ln \frac{R}{r_t}}{2\pi (km)_j}. \quad (\text{V.21})$$

Складывая правые и левые части уравнений (V.20) и (V.21), получим

$$h_{\pi} - H_l - \Delta S_l = \frac{Q_J(r_0) \ln \frac{R}{r_t}}{2\pi (km)_J}, \quad (\text{V.22})$$

где  $\Delta S_J$  аналогично  $\Delta S_l^0$  в условиях откачки.

Уравнения (V.20) и (V.22) устанавливают линейную связь между величиной водопритока и снижением уровня с коэффициентом пропорциональности, равным

$$\rho_l = \frac{2\pi (km)_J}{\ln \frac{R}{r_t}}. \quad (\text{V.23})$$

Коэффициент  $\rho_J$  является физическим аналогом удельного дебита для гидродинамически совершенной скважины с радиусом  $r_t$ . В свою очередь удельный дебит линейно связан с величиной водопроницаемости коэффициентом пропорциональности

$$f = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r_t}}. \quad (\text{V.24})$$

Таким образом, формулы (V.20) и (V.22) могут быть использованы для оценки суммарного и индивидуальных значений водопроницаемости при наличии способа определения или задания коэффициента  $f$ . Физическое содержание этого коэффициента обуславливается величинами  $R$  и  $r_t$ .

Величина  $R$  характеризует расстояние, на которое распространяется влияние откачки из скважины, т. е. с течением времени границы области влияния откачки будут соответствовать пространственным границам водоносного горизонта. Однако в практических расчетах радиус влияния принимается конкретной величиной, определяемой размерами той области, где нарушение гидродинамического равновесия еще может быть зафиксировано измерительными приборами. Радиус влияния в общем виде является функцией нескольких переменных

$$R = f(T, km, \mu, S, \gamma),$$

где  $T$  — продолжительность возбуждения;  $\mu$  — водоотдача пород;  $\gamma$  — граничные условия, определяемые геометрией потока, наличием областей дополнительного питания и др.

Расчетной формулы для оценки радиуса влияния в общем случае не существует. В конкретных гидрогеологических условиях его определяют по данным кустовых откачек. Область депрессии при откачке является в большей или меньшей степени асимметричной, что зависит от первоначального уклона свободной или пьезометрической поверхности подземных вод и других причин. Границы ее весьма условны, так как переход из области

депрессии к области, где уровень можно считать непониженным осуществляется по экспоненциальному закону. Во избежание неопределенности при установлении величины радиуса влияния в подобных случаях, а также для упрощения гидрогеологических расчетов В. Н. Щелкачевым [140] предложено пользоваться «приведенным» радиусом влияния. Он представляет собой радиус условной окружности, описанной вокруг скважины, по периметру которой происходит равномерное питание водоносного горизонта, полностью возмещающее фактический отбор воды при неизменных условиях откачки. О сохранении водного баланса в этих условиях свидетельствует установившийся характер движения. Понятие «приведенный радиус влияния» позволяет перейти от сложных условий притока воды к скважине к простой схеме строго радиального в плане движения воды и равномерного по окружности питания водоносного горизонта, т. е. к условиям, для которых уравнения Дюпюи (V.19), (V.20) и (V.22) являются достаточно точными. Таким образом, при известных параметрах водоносных пород

$$f = \frac{Q_n}{S(r_i) KM}. \quad (V.25)$$

По этим же соображениям оценка коэффициента  $f$  может быть проведена по формуле

$$f = \frac{2\pi}{\ln \left( 1,5 \sqrt{\frac{a}{r_i^2} T} \right)}, \quad (V.26)$$

полученной из условия замены квазистационарной фильтрации, установившейся в контуре влияния, ограниченном приведенным радиусом, где принимается [15]

$$\frac{2,25aT}{R^2} \rightarrow 1.$$

Строго говоря, значение коэффициента  $f$  при оценке водопроводимости совместно исследуемых пластов следовало бы рассматривать как функцию глубины. Однако в практических расчетах водопроводимости различных элементов изучаемой системы по методике расходомерии возмущающей скважины при установившемся режиме он принимается постоянным не только в разрезе, но и по площади месторождения. Это объясняется прежде всего невозможностью дифференцированной оценки его значения при проведении работ по этой методике, а также допустимым пределом погрешностей за счет использования некоторого интегрального значения данного коэффициента.

Тогда из совместного решения двух уравнений (V.26), записанных для всего водоносного комплекса и оцениваемого объекта, имеем

$$(km)_i = \frac{\Delta Q_{ni}(r_0) S(r_i) KM}{Q_n S_i(r_i)}. \quad (V.27)$$

Как видно, оценки  $(km)_i$  и  $(km)_j$  по этой формуле являются относительными мерами распределения по разрезу общей величины водопроводимости с коэффициентом пропорциональности

$$(km)_i = \frac{\rho_i}{\rho} KM. \quad (V.28)$$

В зависимости от направления дальнейшего использования этих оценок в расчетах по формуле (V.28) могут участвовать значения  $KM$ , определенные как разными методами, так и с различной степенью осреднения водопроводимости по площади: кусту, месторождению и т. п.

Указанный принцип интерполяции водопроводимости для различных оцениваемых элементов неоднородных водоносных систем может быть применен после выполнения основных видов опытно-фильтрационных исследований на участке. Поэтому на практике большей частью приемлема формула

$$(km)_i = \frac{\Delta Q_{ni}(r_0)}{S_i(r_t) f}, \quad (V.29)$$

где  $f$  — задается приближенно на основании обобщения опытных данных на участке, а также из условия допустимости погрешности такого приближения при проведении исследования скважины при относительно небольшой интенсивности возбуждения.

Ниже приведены численные значения коэффициента  $f$  в зависимости от отношения  $R/r_t$ :

$R/r_t$	$5 \cdot 10^2$	$10^3$	$2 \cdot 10^3$	$6 \cdot 10^3$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$	$10^6$	$10^7$
$f = \frac{2\pi}{\ln R/r_t}$	1,0	0,91	0,83	0,73	0,68	0,63	0,58	0,55	0,46	0,39

Как видно, с ростом отношения  $R/r_t$  значения коэффициента  $f$  убывают по экспоненциальному закону. Если учесть, что величина  $r_t$  зависит от квадрата дебита, то при исследовании скважины с относительно небольшим дебитом приближенно можно полагать  $R/r_t \rightarrow R/r_0$ . Тогда для оценки вероятных значений  $f$  можно воспользоваться более оперативным способом, например использовать формулу аналогичную (V.26)

$$f = \frac{2\pi}{\ln \left( 1,5 \sqrt{\frac{a}{r_0^2 T}} \right)}, \quad (V.30)$$

при задании коэффициента  $a$  по справочным данным для исследуемого типа пород. Так, при вариациях в изменении преезопроводности на два порядка значения  $f$  будут отличаться примерно на 25%. Этот способ полностью аналогичен приему, предложенному Е. Е. Керкисом [66] и Н. Н. Биндеманом [15] для региональной оценки водопроводимости соответственно пористых и трещиноватых водоносных горизонтов по результатам откачек



из одиночных скважин. Изложенные приемы оценки возможных пределов изменения коэффициента  $f$  были применены нами при разведке нескольких месторождений подземных вод в Кузнецком бассейне. В результате обобщения данных для этого района установлено, что изменения коэффициента  $f$  находятся в пределах 0,4—0,7. Более узкие пределы изменения  $f$  связаны с большей определенностью гидрогеологических условий на различных месторождениях. Так, для участка Красноярские песчаники (район г. Кемерово), где водоносность связана с трещиноватыми песчаниками пермского возраста, коэффициент  $f$  изменяется в пределах 0,45—0,55. Для юрских отложений Тутуяесской мульды (район г. Мыски), представленных трещиноватыми конгломератами, среднее значение  $f$  было принято равным 0,45 с погрешностью  $\pm 10\%$ .

Таким образом, основные принципы методики проведения исследований и обработки экспериментальных данных по методу расходомерии возмущающей скважины при установившемся режиме, обеспечивающие возможность оценки водопроводимости различных слоев с заданной предельной погрешностью, предусматривают эмпирический способ задания коэффициента  $f$  и определение значения  $\rho_i$  при минимально возможном возбуждении оцениваемого объекта. Это в случае, если скважина исследуется при одном понижении уровня, как обычно практикуется. Если исследуется скважина при нескольких ступенях возбуждения, определение индивидуальных значений водопроводимости может быть выполнено более строго.

Для этого рассмотрим основные причины, определяющие форму кривых дебит — понижение, называемых индикаторными диаграммами. Они отражают закон изменения сопротивления фильтрующей жидкости и характеризуют суммарные потери напора по скважине при движении ее в породах через фильтр. Эти сопротивления частично охарактеризованы при рассмотрении прямой задачи о водопитоках в реальную скважину (см. гл. III). Здесь отметим, что поскольку индикаторная диаграмма фиксирует суммарный эффект потери напора, его можно представить в виде слагаемых. Часть потери напора, связанная с фильтрацией в породах, зависит от изменчивости гидрогеологических условий в плане, влияющих в совокупности на значение потерь напора при заданной величине водоотбора. Наблюдая установившийся характер водопитока, нельзя, естественно, судить о изменчивости сопротивления фильтрующей среды в направлении от скважины. Информация для анализа изменчивости условий фильтрации в геологической среде содержится в графиках прослеживания уровня при неустановившемся режиме. По мере расширения депрессии вовлекаются все более отдаленные области и в случае нали-

---

\* Аргументированный анализ формы индикаторных диаграмм проведен Э. А. Грикевичем (Э. А. Грикевич. Определение зоны нарушения линейного закона фильтрации по данным откачек в напорных условиях — Изв. АН ЛатССР, 1966, № 6 (227), с. 47—57).

чия зон с резким различием емкостных, фильтрационных свойств или источников пополнения отбираемой воды на графиках прослеживания появляются изломы, свидетельствующие об изменении условий фильтрации. Гидрогеологическому анализу таких исследований посвящен ряд работ [17, 104]. Нас же интересуют гидравлические предпосылки, определяющие форму индикаторной диаграммы (для напорных условий). Если в водоносных породах, фильтре и скважине вода движется ламинарно, то по закону Гагена—Пуазейля сопротивление пропорционально скорости в первой степени. Отсюда следует, что при ламинарном движении независимо от числа и вида сопротивлений в контуре питания индикаторная диаграмма выражается прямой линией с постоянным угловым коэффициентом. Именно этим условиям течения соответствует уравнение Дюпюи, а угловой коэффициент индикаторной прямой равен удельному дебиту. Постоянство удельного дебита, кроме того, характеризует среду как однородную в пределах развившейся депрессии, а скважину — как гидродинамически совершенную.

Критерием установления того или иного режима течения воды в горных породах может служить число Рейнольдса ( $Re$ ). Для его определения предложен ряд формул [112], в соответствии с которыми устанавливаются различные критические значения параметра  $Re$ , отличающиеся более чем на порядок. Столь существенные расхождения связаны с условиями его определения в применявшихся экспериментальных моделях. В соответствии с предложенными формулами для оценки  $Re$  [68, 71, 100, 107, 112, 128, 136, 139] этот параметр определяется, помимо свойств фильтрующей среды и жидкости, скоростью фильтрации. Последняя, как известно, зависит от величины напорного градиента. В условиях естественной фильтрации градиент напора обычно очень небольшой и выражается тысячными долями. Поэтому скорости фильтрации здесь малы и видимо должен преобладать ламинарный режим течения.

Как отмечал Н. К. Гирицкий [44], ламинарный режим сохраняется во всех случаях при коэффициенте фильтрации меньше 50 м/сут, при 125 м/сут отклонение линейного закона охватывает очень незначительную область вокруг скважины при откачке и лишь при коэффициенте фильтрации порядка 1000 м/сут зона отклонения становится относительно большой, но все же остается незначительной по сравнению с размерами всей депрессионной воронки. И. А. Скабалланович [107] приводит пример, когда ламинарность потока не нарушалась при откачке из сильнотрещиноватых известняков с коэффициентом фильтрации 500—800 м/сут. Ссылаясь на работы многочисленных исследователей, П. П. Климентов и Г. Б. Пыхачев [68] отмечают, что в самых разнообразных фильтрующих породах от поровых до трещиноватых и карстовых, как правило, имеет место ламинарный режим течения. Отклонения от линейного закона фильтрации отмечаются только в узколокальной сравнительно небольшой зоне вокруг выработки

вследствие резкого изменения гидравлического градиента. При малых диаметрах скважины и больших понижениях уклоны и скорости в центральной части депрессионной воронки вследствие увеличения плотности струй потока могут оказаться очень большими и движение воды станет турбулентным.

Выразим закон изменения скорости фильтрации по направлению радиуса депрессионной воронки на основании уравнений Дарси и Дюпюи

$$v = \frac{Q_n(r_0)}{2\pi r m} = \frac{kS(r_t)}{r \ln \frac{R}{r_t}} \quad \text{при } r \geq r_t, \quad (\text{V.31})$$

т. е. скорость фильтрации в ламинарном режиме изменяется по гиперболическому закону, достигая максимального значения при  $r = r_t$ .

Приняв необходимым выполнение условия  $v \leq v_{кр}$  при  $r_t \approx r_0$ , очевидно следует соответствующим образом стремиться к уменьшению  $Q_n(r_0)$  или  $S(r_0)$ , что взаимосвязано. При известных параметрах среды можно было бы установить количественные критерии для выполнения этого условия, например на основании формулы Ф. И. Котяхова [71].

Из рассмотрения гл. IV следовало, что потери напора в интервалах течения жидкости через фильтр и по скважине пропорциональны примерно квадрату скорости потока. Отсюда сумма потерь напора, характеризующая его значение на индикаторной диаграмме, даже при условии выполнения для различных пластов соотношения  $v \leq v_{кр}$ , будет состоять из слагаемых, пропорциональных скорости (расходу) потока в первой и второй (примерно) степенях. Таким образом, суммарное значение потерь напора, фиксируемое в скважине при откачке и определяющее ординату индикаторной диаграммы, в общем случае является сложной алгебраической функцией и зависит не только от дебита оцениваемого объекта, но и от расхода потока по стволу скважины. Приведено много исследований экспериментальных функций потерь напора в моделях и реальных скважинах и соответственно предложено большое число эмпирических формул для описания индикаторных диаграмм [112]. Наиболее распространенной и физически аргументированной является двучленная формула Келлера

$$S = aQ + bQ^2, \quad (\text{V.32})$$

где  $a$  — коэффициент, характеризующий сопротивление потока в интервале с ламинарным режимом течения;  $b$  — коэффициент, характеризующий сопротивление потока в интервале с турбулентным режимом.

Если коэффициенты  $a$  и  $b$  уравнения (V 32) рассматривать как некоторый эквивалент сопротивления в соответствующем режиме течения, то нетрудно заметить, что с физической точки зрения для одного и того же участка течения должно выполняться

условие  $a < b$ . Однако, как следует из предыдущего изложения, они должны соответствовать различным участкам течения. Поэтому коэффициент  $a$  в большей степени должен определяться сопротивлением фильтрующих пород, а коэффициент  $b$  — сопротивлением прифилтровой части и ствола скважины. В этом случае должно выполняться соотношение  $a > b$ . Фактические индикаторные кривые подтверждают это положение.

Выразим в уравнениях (III.103) и (III.104) величину фиксируемого понижения уровня для данного объекта и фиксируемого положения уровня в скважине как

$$h_{\pi} - H_i = \frac{Q_{ni}(r_0) \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi (km)_i} + \Delta S_i; \quad (V.33)$$

$$S_{\pi}(r_0) = \frac{\Delta Q_{ni} \cdot \ln \frac{R}{r_0}}{2\pi (km)_i} + \delta S_i. \quad (V.34)$$

Как видим, эти уравнения и уравнение (V.32) аналогичны. Действительно, первый член в правой части уравнений (V.33) и (V.34) пропорционален дебиту пласта в первой степени. Коэффициент пропорциональности — сопротивление пород. Второй член этих уравнений равен сумме гидравлических потерь. Часть потерь, обусловленная входным сопротивлением, в среднем определяется дебитом пласта во второй степени. Часть потерь напора на трение внутри скважины, поскольку коэффициент гидравлического трения зависит от скорости (числа Рейнольдса), пропорциональна величине расхода в степени 1,8—1,9. При этом заметим, что значение потерь напора вдоль фильтрующей поверхности скважины зависит от расхода, изменяющегося в диапазоне от нуля (случай единственного или наиболее глубокозалегающего пласта) до значения суммарного дебита скважины. Значение расхода, определяющее величину потерь напора в глухой части скважины, равно (случай единственного пласта) или больше дебита рассматриваемого пласта. Таким образом, несколько меньшее значение показателя степени компенсируется увеличением абсолютной величины основания. Если условно принять коэффициент гидравлического трения постоянным, то потеря напора внутри скважины будет также пропорциональна квадрату расхода. Однако в отличие от уравнения Келлера, квадратичный член этого уравнения в общем случае зависит от величины, превышающей значение дебита рассматриваемого пласта.

Таким образом, аналогия уравнений индивидуальных индикаторных диаграмм совместно исследуемых пластов с уравнением Келлера носит прежде всего формальный характер. Эта аналогия будет полной при условии анализа функций понижений за вычетом потерь напора внутри скважины

$$h_{\pi} - H_i - S_{li} - S_{ri} = f(Q_{ni}) \quad (V.35)$$

$$S_{\text{н}}(r_0) - \Delta S_{\text{л}} - \Delta S_{\text{г}} = f(\Delta Q_{\text{н}}). \quad (\text{V.36})$$

В этом случае коэффициент  $b$  будет суммарно характеризовать сопротивление заскважинной зоны при турбулентном режиме и сопротивление фильтра.

Отсюда становится очевидной методика интерпретации индивидуальных индикаторных диаграмм совместно исследуемых пластов. На первом этапе по экспериментальным данным  $h_{\text{д}}$  и  $Q_{\text{г}}(r_0)$  строятся индикаторные диаграммы и путем графоаналитической интерполяции и экстраполяции полученных экспериментальных графиков находятся значения индивидуальных статических уровней  $H_{\text{г}}$  [34].

Для нахождения индивидуальных значений статических уровней водоносных пластов можно применить два приема: графический и расчетный. Графический способ основывается на визуальном осреднении наблюдаемой зависимости дебит пласта — динамический уровень воды в скважине и экстраполяции ее до пересечения с осью динамических уровней, руководствуясь тем, что вычерченная таким образом индикаторная кривая может иметь параболическую форму, переходящую в прямую вблизи оси  $h_{\text{д}}$ . При  $Q_{\text{н}}(r_0) = 0$  получаем  $h_{\text{д}} = H_{\text{г}}$ . Очевидно также, что если наблюдаемая часть индикаторной диаграммы охарактеризована двумя опытными точками, то экстраполяция ее не может идти иначе как по прямой со всеми вытекающими последствиями для точности. Задача существенно облегчается в том случае, когда наблюдаемые значения дебитов пласта имеют разные знаки. Например, при уровне динамического равновесия рассматриваемый пласт может участвовать в водообмене как поглощающий, а при откачке в связи со снижением уровня до значений  $h_{\text{д}} > H_{\text{г}}$  он может создавать водоприток. Соединение прямой линией двух наименее отдаленных от оси  $h_{\text{д}}$  точек даст, очевидно, в пересечении с ней значение статического уровня, наиболее совпадающее с истинным.

Если наблюдаемая часть индикаторной диаграммы охарактеризована более чем двумя точками, то для расчета  $H_{\text{г}}$  может быть применен также аналитический способ, основанный на методе наименьших квадратов или решения интерполяционного многочлена Лагранжа [34]. Однако в распоряжении исследователя обычно редко бывает более трех точек наблюдения. Как показывает опыт, графический способ оказывается вполне надежным и ввиду большей простоты предпочтительным.

С определением статического уровня индикаторная диаграмма для оцениваемого объекта становится полностью определенной для интервала заданных возмущений.

Проверка правильности проведенной экстраполяции (интерполяции) может быть проведена по выполнению следующего ба-

лансового соотношения на различных уровнях экстраполированного участка

$$Q_{\Pi}(r_0) = \Sigma Q_{\Pi i}(r_0). \quad (V.37)$$

Кроме того, при правильном определении индивидуальных значений статических уровней, должно удовлетворяться условие динамического равновесия, фиксируемое в скважине положением  $H_0$ . При расчете его, очевидно, необходимо использовать значения, наименее искаженные наличием дополнительных сопротивлений. Расчетный уровень динамического равновесия водоносного комплекса по данным расходографии равен

$$H_{\text{ор}} = \frac{\sum \frac{Q_{0j}(r_0) H_j}{H_0 - H_j}}{\sum \frac{Q_{0j}(r_0)}{H_0 - H_j}}. \quad (V.38)$$

Если в результате расчета  $H_{\text{ор}}$  выполняется тождество  $H_0 \equiv \equiv H_{\text{ор}}$  или расхождение может считаться удовлетворительным, то экстраполяцию наблюдаемых частей индикаторных диаграмм можно считать достаточно надежной.

На основе выполненных построений, а также используя оценку  $\Delta S_j^0$  по расходограмме для неработающей скважины, получаем следующую расчетную формулу для  $km_j$  или более мелких подразделений фильтрационного разреза

$$(km)_j = \frac{Q_{0j}(r_0)}{(H_0 - H_j - \Delta S_j^0) f}. \quad (V.39)$$

Однако, как показывает практика, точность регистрации расходограмм в неработающих скважинах обычно ниже требуемых значений. Поэтому более строгая интерпретация возможна при использовании исправленных значений динамических уровней на всех ступенях возбуждения скважины путем внесения поправок только на величину потерь напора внутри скважины. Последние определяются более надежно как по расходограммам, так и измерением с помощью глубинного манометра или дифманометра. В этом случае уравнение индикаторной диаграммы более строго отвечает двучленному уравнению Келлера, которое можно записать для имеющихся данных в виде

$$h_{\text{ди}} - H_j = a_j Q_{\Pi j}(r_0) + b_j Q_{\Pi j}^2(r_0), \quad (V.40)$$

где

$$h_{\text{ди}} = h_{\text{д}} - S_{1j} - S_{rj}.$$

Определим значение первой производной

$$\frac{\partial h_{\text{ди}}}{\partial Q_{\Pi j}(r_0)} = a_j + 2b_j Q_{\Pi j}(r_0). \quad (V.41)$$

Как видно, (V.41) является прямой линией. Из графика первой производной, построенной по имеющимся данным, определяем при  $Q_{нj}(r_0) = 0$  значение коэффициента  $a_j$

$$a_j = \frac{\ln \frac{R}{r_0}}{2\pi (km)_j} \quad (V.42)$$

и коэффициента  $b_j$

$$b_j = \frac{\frac{\partial h_{ди}}{\partial Q_{нj}(r_0)} - a_j}{2Q_{нj}(r_0)}. \quad (V.43)$$

Как видно, для построения этого графика необходимо минимум три экспериментальных точки  $h_{ди}$  и  $Q_{нj}(r_0)$ , т. е. две ступени возбуждения скважины.

Как следует из (V.42), для оценки водопроводимостей получаем формулу

$$(km)_j = \frac{1}{a_j f}. \quad (V.44)$$

При известных  $a_j$  и  $b_j$  найдем  $H_j$  из (V.40)

$$H_j = h_{ди} - a_j Q_{нj}(r_0) - b_j Q_{нj}^2(r_0). \quad (V.45)$$

Контроль правильности выполненных определений, как и выше, проводится по (V.37) и (V.38), а также по условию удовлетворения тождеству

$$KM = \Sigma (km)_i, \quad (V.46)$$

где значение приведенной водопроводимости определяется независимо по результатам опытной откачки.

### 3. ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАГИРУЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ВОДОПРИТОКА К ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЕ

Решение обратной задачи расходометрического каротажа реагирующей скважины основано на использовании уравнения (II.159) с уточненным физическим смыслом величины  $l$ . Исходными данными для интерпретации являются функции  $S_p(l, t)$ ,  $\Delta Q_{нj}(\rho_0, t)$  в реагирующей скважине и суммарный дебит возмущающей скважины, причем при проведении исследований предусматривается обеспечить условие  $Q_{нj} = \text{const}$ . Необходимым и достаточным условием решения задачи является получение этих данных при двух различных ступенях возбуждения возмущающей скважины. Соответственно имеем систему

$$\left. \begin{aligned} S'_p(l, t) &= \frac{Q'_n}{4\pi KM} \int_0^t w(L_j, \tau) d\tau + \\ &+ \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q'_{nj}(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau; \\ S''_p(l, t) &= \frac{Q''_n}{4\pi KM} \int_0^t w(L_j, \tau) d\tau + \\ &+ \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q''_{nj}(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau. \end{aligned} \right\} \quad (V.47)$$

Совместное решение этих уравнений приводит к уравнению

$$S_p^0(l, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t Q_{nj}^0(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau, \quad (V.48)$$

где

$$\begin{aligned} S_p^0(l, t) &= S'_p(l, t) \cdot Q''_n - S''_p(l, t) \cdot Q'_n; \\ Q_{nj}^0(\rho_0, t) &= Q''_n \cdot \Delta Q'_{nj}(\rho_0, t) - Q'_n \cdot \Delta Q''_{nj}(\rho_0, t); \end{aligned}$$

Один и два штриха обозначают соответственно первый и второй циклы возбуждения. В каждом цикле отсчет времени ведется с начала реагирования.

Решение уравнения (V.48) на основе экспериментальных функций  $S_p^0(l, t)$  и  $Q_{nj}^0(\rho_0, t)$  можно осуществить приемами, аналогичными изложенным в разделе 1. Однако параметры, полученные в этом случае, будут соответствовать, как нетрудно заметить, параметрам, установленным для возмущающей скважины без учета искажающего влияния гидравлических потерь внутри скважины и в заскважинной зоне.

Поэтому решение уравнения (V.48) носит вспомогательный характер для определения ядерной функции, отвечающей фактическим условиям работы пластов в реагирующей скважине.

Представим (V.48) в виде суммы интегралов в пределах временного интервала  $(0, t)$ , как это было выполнено в разделе 1

$$\begin{aligned} S_p^0(l, t) &= \frac{1}{4\pi (km)_j} \left[ \int_0^{t_1} Q_{nj}^0(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau + \right. \\ &+ \int_{t_1}^{t_2} Q_{nj}^0(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau + \dots + \left. \int_{t_{n-1}}^{t_n} Q_{nj}^0(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau \right]. \end{aligned} \quad (V.49)$$

Для момента времени  $t_1$  при малости отрезков разбиения временной шкалы можно принять



$$S_p^0(l, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^{t_1} Q_{nj}^0(\rho_0, t - \tau) \omega_j(\rho_0, \tau) d\tau =$$

$$= \frac{Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1)}{4\pi (km)_j} \int_0^{t_1} \omega_j(\rho_0, \tau) d\tau, \quad (V.50)$$

где  $\bar{t}_1$  — некоторое среднее значение  $t$  в интервале  $0-t_1$ .

Выписывая аналогичные соотношения для других моментов времени и обозначая через

$$A_{ji} = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_{t_{i-1}}^{t_i} \omega_j(\rho_0, \tau) d\tau \quad \text{при } i = 1, 2, \dots, n, \quad (V.51)$$

получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} S_p^0(l, t_1) &= Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1) \cdot A_{j1}; \\ S_p^0(l, t_2) &= Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_2) A_{j1} + Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1) \cdot A_{j2}; \\ &\dots \dots \dots \\ S_p^0(l, t_n) &= Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_n) \cdot A_{j1} + Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_{n-1}) A_{j2} + \dots + Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1) A_{jn}. \end{aligned} \right\} \quad (V.52)$$

Решая эту систему относительно  $A_{j\mu}$ , получаем

$$\left. \begin{aligned} A_{j1} &= \frac{S_p^0(l, t_1)}{Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1)}; \\ A_{j2} &= \frac{S_p^0(l, t_2) - A_{j1} Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_2)}{Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1)}; \\ &\dots \dots \dots \\ A_{jn} &= \frac{S_p^0(l, t_n) - A_{j1} Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_n) - A_{j2} Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_{n-1}) - \dots - A_{j,n-1} Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_2)}{Q_{nj}^0(\rho_0, \bar{t}_1)}. \end{aligned} \right\} \quad (V.53)$$

Коэффициенты  $A_{j\mu}$  по определению являются откликом в изменении уровня в реагирующей скважине на временных интервалах  $(0, t_1)$ ,  $(0, t_2)$  и т. д. в результате реакции данного пласта на единичное изменение режима, вызванное взаимодействием с другими пластами в данной же скважине. Следовательно, сумма коэффициентов  $A_{j\mu}$  в пределах некоторого временного интервала  $(0, t_h)$  будет характеризовать изменение уровня в реагирующей скважине в данном временном интервале при условии возбужде-

При определении коэффициентов  $A_{j\mu}$  может быть применен метод регуляризации аналогично (V 9).

ния рассматриваемого пласта в этой же скважине с дебитом, равным единице

$$S_{pi}^{0*}(\rho_0, t_k) = \sum_{i=1}^k A_{ji} \quad (V.54)$$

или равноценно

$$S_{pi}^{0*}(\rho_0, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \omega_j(\rho_0, \tau) d\tau. \quad (V.55)$$

Принимая пласт горизонтальным, однородным и бесконечным, (V.55), можно записать также в виде

$$S_{pi}^{0*}(\rho_0, t) = \frac{1}{4\pi (km)_j} \left[ -Ei\left(-\frac{\rho_0^2}{4a_j t}\right) \right]. \quad (V.56)$$

При значениях аргумента менее 0,1 эта функция, как отмечено выше, достаточно точно может быть аппроксимирована логарифмической функцией

$$S_{pi}^{0*}(\rho_0, t) = \frac{0,183}{(km)_j} \lg \frac{2,25a_j t}{\rho_0^2}, \quad (V.57)$$

которая в координатах  $S_{pi}^{0*} - \lg t$  является прямой линией. Угловый коэффициент  $C_p$  и начальная координата  $A_p$  этой прямой дают возможность оценить фактические параметры пласта, вскрытого реагирующей скважиной и возбуждаемого в результате взаимодействия с другими пластами по ее стволу. Эти параметры, как отмечено выше, будут осложнены гидравлическими сопротивлениями ствола реагирующей скважины, ее фильтров и зафильтровой зоны

$$(km)_j = \frac{0,183}{C_p}, \quad (V.58)$$

$$\lg \frac{a_j}{\rho_0^2} = \frac{A_p}{C_p} - 0,35. \quad (V.59)$$

Определение ядерной функции на основе коэффициентов  $A_{ji}$  является ответственной операцией в методике обработки данных расходомерии реагирующей скважины. Производные функции  $S_p^0$  и  $Q_p^0$ , на основе которых выполняется расчет, обычно небольшие. Поэтому при значительном разбросе точек на графике  $S_{pi}^{0*} - \lg t$  имеет смысл пересчитать значения коэффициентов  $A_{ji}$  по результатам полученных значений параметров  $(km)_j$  и  $\frac{a_j}{\rho_0^2}$ , а также применить при обработке производных функций

$S_p^0(l, t)$  и  $Q_u^0(\rho_0, t)$  интегральный метод Г. И. Баренблатта [26]. По результатам определения параметров в соответствии с

этим методом также осуществляется расчет коэффициентов  $A_{ji}$  для выбранных моментов разбиения исходной временной шкалы. Определение значений коэффициентов  $A_{ji}$  двумя методами следует рассматривать как прием методического контроля, в результате которого делается вывод о представительности полученных величин или необходимости принятия средних значений.

После нахождения коэффициентов  $A_{ji}$  выражение для второго интеграла в правой части (V.47) можно представить в виде суммы и рассчитать фактическую функцию  $\zeta_{nj}(\rho_0, t)$ , которая по определению является функцией взаимовозбуждения пластов в реагирующей скважине, вызванного их различной реакцией на возбуждение возмущающей скважины

$$\begin{aligned}\zeta_{nj}(\rho_0, t) &= \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{nj}(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau \simeq \\ &\simeq \sum_{i=1}^n \Delta Q_{nj}(\rho_0, \bar{t}_i) A_{ji}.\end{aligned}\quad (V.60)$$

При проведении исследований по методу расходомерии реагирующей скважины временные функции изменения осевого перетока измеряются на фиксированных глубинах на непроницаемых интервалах скважины. Перед началом опыта ( $t=0$ ) и в конце его на каждой ступени возбуждения производится регистрация детализированной расходограммы по мощности фильтрующих интервалов. По полученным расходограммам приемами, изложенными в разделе 2 главы IV, определяется значение функции  $\zeta_j(\rho_t, t)$  для времени, соответствующего регистрации рассматриваемой расходограммы, где  $\rho_t$  аналогично  $r_t$  для возмущающей скважины. Значения расхода при расчете функции  $\zeta_j(\rho_t, t)$  для моментов времени  $t < t_n$  берутся путем интерполяции закономерности, выявленной по временным функциям перетекания. После выполнения указанных определений имеем

$$\zeta_j(\rho_t, t) = \sum_{i=1}^n \Delta Q_{nj}(\rho_0, \bar{t}_i) \cdot A'_{ji}, \quad (V.61)$$

где

$$A'_{ji} = \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_{t_{n-1}}^t w_j(\rho_t, \tau) d\tau.$$

Функция  $\zeta_j(\rho_t, t)$  определена в соответствии с разбиением временной шкалы. Теперь остается определить новые значения коэффициентов  $A_{ji}$ , обозначенных  $A'_{ji}$ . Эта операция полностью аналогична описанной выше. В результате получаем функцию

$$\zeta_j^*(\rho_t, t_k) = \sum_{i=1}^k A'_{ji}, \quad (V.62)$$

которая приводится к логарифмическому виду

$$\zeta_j^*(\rho_i, t) = \frac{0,183}{(km)_j} \lg \frac{2,25a_j t}{\rho_{ij}^2}, \quad (V.63)$$

и позволяет определить истинные параметры пластов по формулам (V.58) и (V.59). Расчет параметров целесообразно продублировать с использованием также интегрального метода Г. И. Баренблатта [26] применительно к функциям  $\zeta_j(\rho_i, t)$  и  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, \bar{t}_i)$ .

Определим далее значения  $L$  и функции индивидуальных срезов уровней пластов от возбуждения возмущающей скважины. Иными словами, в результате нижеследующего решения единственная рассматриваемая реагирующая скважина в неоднородной среде будет условно представлена в виде куста ярусных пьезометров в соответствующем слое неоднородной исследуемой системы.

Вернемся к системе (V.47). С учетом (V.61) для двух циклов возбуждения получаем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{Q'_H}{4\pi KM} \int_0^i w(L_j, \tau) d\tau &= S'_p(l, t) - \sum_{i=1}^n \Delta Q'_{пj}(\rho_0, \bar{t}_i) A'_{ji}; \\ \frac{Q''_H}{4\pi KM} \int_0^t w(L_j, \tau) d\tau &= S''_p(l, t) - \sum_{i=1}^n \Delta Q''_{пj}(\rho_0, \bar{t}_i) A'_{ji}. \end{aligned} \right\} \quad (V.64)$$

В таком виде выражения (V.64) согласно определению обозначают конечную величину изменения уровня данного пласта, имеющего параметры (V.58), на момент  $t=t_n$  на расстоянии  $L_j$  от возмущающей скважины, условно считая, что пласт вскрыт ею и возбуждается изолированно от остальных.

Представляя (V.64) как функцию времени, например, на момент  $t_k$  с начала реагирования, будем иметь для двух циклов возбуждения

$$\left. \begin{aligned} S^*(L_j, t_k) &= \frac{1}{Q'_H} \left[ S'_p(l, t_k) - \sum_{i=1}^k \Delta Q'_{пj}(\rho_0, \bar{t}_i) A'_{ji} \right]; \\ S^*(L_j, t_k) &= \frac{1}{Q''_H} \left[ S''_p(l, t_k) - \sum_{i=1}^k \Delta Q''_{пj}(\rho_0, \bar{t}_i) A'_{ji} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (V.65)$$

С учетом логарифмической аппроксимации получим уравнения этих функций

$$S^*(L_j, t) = \frac{0,183}{KM} \lg \frac{2,25at}{L_j^2}. \quad (V.66)$$

Очевидно, что графики  $S^*(L_j, t)$  для двух циклов возбуждения скважины должны совпадать, что может служить критерием точности выполнения работ и опыта.

Определив угловой коэффициент  $C_L$  и начальную ординату  $A_L$  прямой  $S^* - \lg t$ , находим

$$KM = \frac{0,183}{C_L}; \quad (V.67)$$

$$\lg \frac{a}{L_j^2} = \frac{A_L}{C_L} - 0,35. \quad (V.68)$$

Из формул (V.67) и (V.68) следует, что графики  $S^*(L_j, t)$  для различных пластов должны быть параллельны.

В результате произведенных трансформаций наблюдаемых показателей гидродинамического поля достигнута схематизация разреза в виде системы изолированных пластов. Поэтому значение приведенной пьезопроводности водоносного комплекса в точке вскрытия его реагирующей скважиной может быть оценено по формуле

$$a = \left[ \prod_{j=1}^N a_j^{(km)_j} \right]^{\frac{1}{KM}}. \quad (V.69)$$

Тогда

$$\lg L_j = 0,5 \lg a - \frac{A_{Lj}}{2C_{Lj}} + 0,175. \quad (V.70)$$

По условию

$$\frac{a}{L_j^2} = \frac{a_j}{l^2}$$

можно контролировать точность выполненных расчетов.

Таким образом, истинная функция снижения уровня для оцениваемого пласта при условии, что только он один вскрыт наблюдательной (реагирующей) скважиной, отстоящей от возмущающей скважины на расстоянии  $l$ , определится по формуле

$$S_j(l, t) = Q_n S^*(L_j, t) \quad (V.71)$$

или по формуле

$$S_j(l, t) = Q_n S_j^*(l, t), \quad (V.72)$$

которая обозначает, что этот пласт вскрыт в единственном числе также и возмущающей скважиной.

Сравнение  $l$  и  $L_j$  может служить мерой гидравлической связи исследуемых скважин на уровне водоносных пластов. Равенство  $l \simeq L_j$  может свидетельствовать о том, что обеими скважинами вскрыты идентичные однородные в плане и гидравлически несвязанные пласты. При  $l \neq L_j$  имеет место неоднородность фильтрационного разреза на уровне залегания водоносного пласта. Причем, если  $L_j > l$ , фильтрационные свойства водоносного пласта в направлении от реагирующей скважины к возмущающей либо

ухудшаются, либо пласт ею не вскрыт, либо интенсивность и продолжительность возбуждения малы для возмущения его в точке размещения реагирующей скважины. При обратном соотношении, т. е. при  $L_j < l$ , будет соответственно обратная картина изменчивости фильтрационных свойств. Рассмотрим несколько гипотетических примеров.

Пример 1. На рис. 27 показан предельный случай. Обе скважины вскрывают по два водоносных пласта. Однако при откачке одной из них (возмущающей) в другой (реагирующей) срезка уровней не наблюдается. В этом случае  $S_p(l, t) = 0$ . Одновременно второй интеграл в уравнении (V.47) будет равен нулю, так как  $\Delta Q_{pi}(p_0, t) = 0$ . Тогда первый интеграл также должен быть равен нулю. Это возможно при условии  $\frac{2,25at}{L_j^2} \rightarrow 1$ . Отсюда

$$L_j \approx 1,5 \sqrt{at}.$$

Пример 2. На рис. 28 обе совершенные по конструкции скважины вскрывают два однородных пласта с равными водопроницаемостью и пьезопроводностью. Снижение уровня в реагирующей скважине является качественным указанием на взаимодействие скважин. Однако в этом случае  $S_p^0(l, t)$  в (V.48) будет равно нулю, так как  $\Delta Q_{pi}(p_0, t) = 0$  при  $S_{p1}(l, t) = S_{p2}(l, t)$ . Выпол-

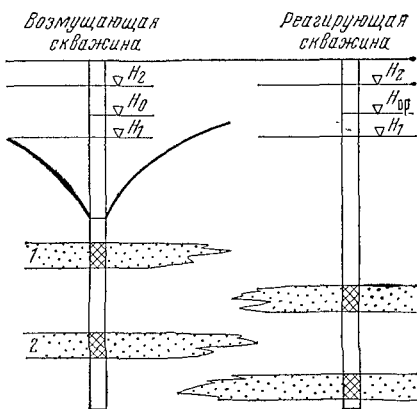


Рис. 27. Схема взаимодействия двух скважин (к примеру 1)

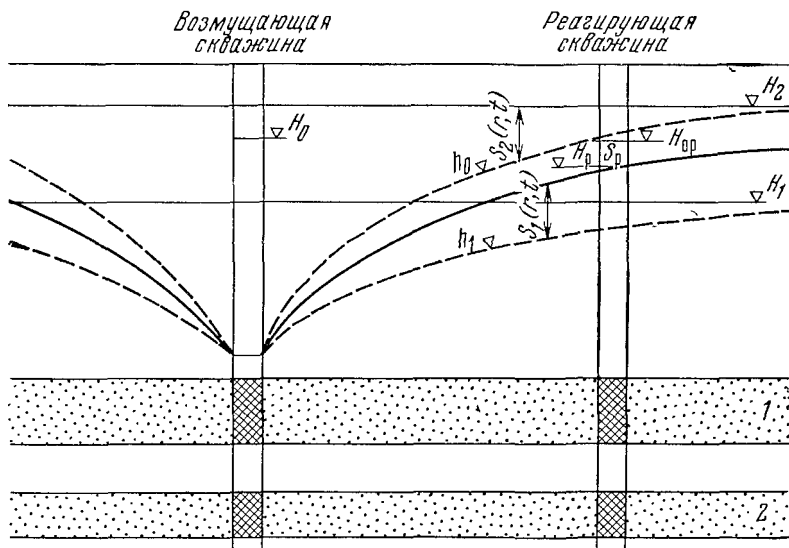


Рис. 28. Схема взаимодействия двух скважин (к примеру 2)

нить оценку параметров по формулам (V.58), (V.59) невозможно. Поэтому, пользуясь графиком  $S_p(l, t)$ , можно оценить суммарную водопроводимость и пьезопроводность. Разделив полученное значение водопроводимости на число водоносных пластов, получим их индивидуальные оценки.

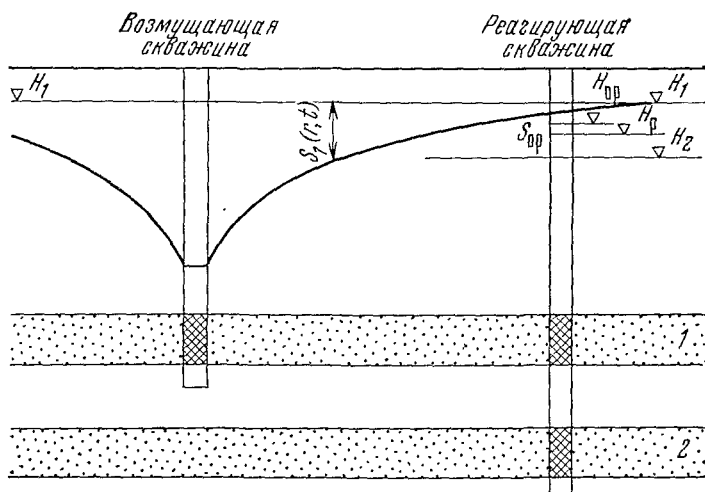


Рис. 29. Схема взаимодействия двух скважин (к примеру 3)

Пример 3. На рис. 29 возмущающая скважина вскрывает один, а реагирующая — два водоносных пласта. При откачке в реагирующей скважине уровень снижается и изменяется интенсивность перетока между пластами. Оценка параметров соединенных пластов осуществляется по формулам (V.58), (V.59) и (V.70). При данной схеме взаимодействия скважин значения  $S^*(L_j, t)$ , вычисленные по (V.65) для первого и второго пластов, будут различны, так как значения  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, t_i)$  для них имеют противоположные знаки. Соответственно различными будут значения  $L_j$ . Даже при условии равенства параметров пластов и наличии гидравлических окон между ними получится, что  $L_1 \leq l < L_2$ . При чем для показанной на рис. 29 схемы функция  $S^*(L_j, t)$  для первого пласта будет стремиться к нулю, что возможно при  $L_1 \rightarrow \infty$ .

Функции  $S^*(L_j, t)$  могут быть непосредственно использованы для коррекции временных графиков прослеживания уровня в наблюдательных скважинах, имеющих дефекты в конструкции. Например, гидрогеологический разрез содержит два водоносных пласта (горизонта). Опытный куст оборудован на нижний пласт. Однако в наблюдательной скважине надежной изоляции верхнего пласта не достигнуто. В этом случае истинная функция снижения уровня в данной наблюдательной скважине, соответствующая объекту исследования, может быть определена по формуле (V.71). Если после расчета параметров пласта по этой функции получится, что они обеспечивают также равенство (V.72), то это дополнительно означает, что исследуемый пласт гидравлически изолирован. Об этом будут также свидетельствовать значения  $L_j$ .

В результате определения параметров пластов, совместно исследуемых в реагирующей скважине, могут быть оценены также:

значения их статических уровней. Для этого используется формула, подобная (V.17), в которую подставляются значения дебита пласта в реагирующей скважине при  $t=0$ , или формула (V.18).

#### 4. ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАГИРУЮЩЕЙ СКВАЖИНЫ ПРИ УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ ВОДОПРИТОКА К ВОЗМУЩАЮЩЕЙ СКВАЖИНЕ

Рассматривая установившийся водоприток к возмущающей скважине в радиусе вызванной ею депрессии как предельное состояние неустановившегося режима, для двух ступеней возбуждения имеем систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} S'_p &= \frac{Q' \ln \frac{R}{l}}{2\pi KM} + \frac{\Delta Q'_{пj} \ln \frac{R_p}{\rho_0}}{2\pi (km)_j} ; \\ S''_p &= \frac{Q'' \ln \frac{R}{l}}{2\pi KM} + \frac{\Delta Q''_{пj} \ln \frac{R_p}{\rho_0}}{2\pi (km)_j} , \end{aligned} \right\} \quad (V.73)$$

где  $R_p$  — приведенный радиус влияния от взаимного возбуждения пластов в реагирующей скважине в результате изменения интенсивности перетока между ними. Для различных ступеней откачки  $R_p$  принимаются равными.

Решение этих уравнений приводит к уравнению

$$S_p^0 = \frac{Q_{пj}^0 \ln \frac{R_p}{\rho_0}}{(2\pi km)_j}, \quad (V.74)$$

где

$$\begin{aligned} S_p^0 &= S'_p Q'' - S''_p Q', \\ Q_{пj}^0 &= \Delta Q'_{пj} Q'' - \Delta Q''_{пj} Q'. \end{aligned}$$

Откуда

$$(km)_j = \frac{Q_{пj}^0}{S_p^0 - f}, \quad (V.75)$$

где коэффициент  $f$  оценивается приемами, аналогичными описанными в разделе 2 этой главы. Однако в большинстве случаев значение его будет все же неопределенным. Поэтому возможности этого метода целесообразно ограничить нахождением относительных оценок  $(km)_j$ , т. е. величин удельного дебита, отвечающих условиям Дюпюи

$$\rho_j = (km)_j f = \frac{Q_{пj}^0}{Q_p^0}. \quad (V.76)$$



Полученное значение  $Q$ , может быть далее использовано для оценки положений статических уровней водоносных пластов, вскрытых реагирующей скважиной, величин срезок уровней в условиях реагирования при различных ступенях возбуждения и изучения на этой основе степени гидравлической взаимосвязи их с опытной скважиной. При исследовании наблюдательных скважин опытных кустов эти данные могут быть использованы для

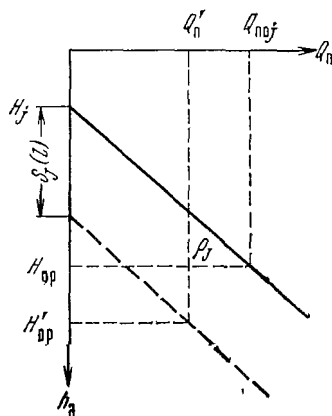


Рис 30 К определению  $H_j$  и  $S_j(l)$  по результатам расходомертии реагирующих скважин

изучения пространственной анизотропии фильтрационных свойств пород.

Величина  $H_j$  водоносных пластов определяется с помощью приема, показанного на рис. 30. На координатной сетке с осями  $Q_n$  и  $h_d$  через точку с координатами  $Q_{поф}$  и  $H_{ор}$  проводится прямая, имеющая угловой коэффициент  $\rho_j$ . Точка пересечения этой прямой с осью  $h_d$  будет соответствовать искомому значению  $H_j$ . Контроль правильности оценок  $H_j$  выполняется приемами, также описанными в разделе 2 этой главы.

Для определения индивидуальных срезок в условиях реагирования рассмотрим гидродинамическую обстановку в реагирующей скважине, вскрывшей разрез с несколькими водоносными пластами. Как отмечено выше, в этих условиях установив-

шийся в скважине уровень воды при отсутствии каких-либо возмущений в пределах области влияния соответствует состоянию динамического равновесия напоров вскрытых пластов. Его положение в скважине поддерживается установившимися по стволу перетоками из одних пластов в другие. Если статический уровень водоносных пластов расположен выше уровня гидродинамического равновесия, они отдают воду в скважину, если ниже — поглощают ее. Этот уровень, обозначавшийся выше как  $H_{ор}$ , для удобства будем условно называть уровнем динамического равновесия нулевой генерации.

При откачке из возмущающей скважины вследствие гидравлической связи и образования депрессионной воронки в реагирующей скважине установится новый уровень, который будет ниже первоначального уровня  $H_{ор}$ . Стабилизация уровня воды в реагирующей скважине на новой отметке не сопровождается необходимостью отбора воды на поверхность, а осуществляется за счет изменения величин перетоков, уравнивающих его положение. Этот новый равновесный уровень воды в реагирующей скважине, соответствующий первой ступени откачки, будем называть уровнем динамического равновесия первой генерации  $H'_{ор}$  и т. д.

Рассмотрим такой гипотетический пример. Реагирующая сква-

жина вскрывает два водоносных пласта с разными статическими уровнями. При установившемся уровне  $H_{ор}$  по ее стволу происходит переток из одного пласта в другой. Допустим, что один из этих пластов (отдающий) заведомо не связан с возмущающей скважиной, но при откачке уровень в реагирующей скважине снижается. В связи с тем, что отдающий пласт не имеет гидравлической связи с возмущающей скважиной, срезки его статического уровня не произойдет, и в соответствии со снижением уровня в скважине должно наблюдаться увеличение притока из этого пласта. Поскольку уровень воды в реагирующей скважине соответствует состоянию динамического равновесия, то эта вода должна быть полностью поглощена вторым пластом. Для того чтобы сохранить баланс действующих сил, следует предположить срезку статического уровня второго пласта, что одновременно будет свидетельствовать о существовании фильтрационной связи этого пласта с возмущающей скважиной. Если нанести значения дебитов перетока в условиях реагирования на индикаторную кривую, то наблюдаемая точка  $(Q'_{п2}, H'_{ор})$  расположится под индикаторной кривой. Для водоносного пласта, не имеющего гидравлической связи с возмущающей скважиной, данная точка попадает на индикаторную кривую. Это является общим правилом решения задачи об установлении гидравлической связи различных пластов с реагирующей скважиной.

Для определения величин срезок статических уровней, участвующих в опыте пластов, поступают следующим образом. На график индикаторной кривой соответствующего пласта наносят точку с координатами  $Q'_{пj}, H'_{ор}$ . Считая далее, что величина удельного дебита водоносного пласта не зависит от высоты статического уровня, что вполне справедливо при небольших понижениях, какие в данном случае имеют место, через наблюдаемую точку проводим линию, параллельную индикаторной кривой (в данном случае это отрезок прямой). Отрезок  $S_j(l)$  на оси ординат (см. рис. 30) определяет величину срезки для каждого пласта, соответствующую данной ступени откачки. Если с момента регистрации расходограммы при уровне  $H_{ор}$  до рассматриваемых исследований произошли некоторые изменения в положении уровней (сезонные колебания, дренаж и т. п.), необходимо ввести коррекцию в положение индикаторной кривой путем смещения точки с координатами  $Q_{пож}, H_{ор}$  на величину отмеченных изменений.

На рис. 40 приведены пример таких исследований и результаты определения связи водоносных зон скв. 39 и возмущающей скв. 41, расположенной от первой на расстоянии 190 м (см. рис. 33 и 40). Исследования в скв. 39 проводились при установившемся естественном уровне и трех понижениях при откачке из скв. 41. Характер изменения водообмена между водоносными зонами в скв. 39 в соответствии с изменением величины уровня в скв. 41 показан графически (см. рис. 40). Сравнение полученных графиче-

ков (масштаб по оси  $x$  изменен) с индикаторными диаграммами (см. рис. 40) показывает, что для трех верхних зон наблюдаемые точки при уровнях  $H'_{ор}$ ,  $H''_{ор}$ ,  $H'''_{ор}$  расположены под индикаторной диаграммой. Величины срезок при максимальном понижении для них соответственно равны 0,91; 0,68; 0,54 м. Для каждой из двух нижних зон наблюдаемый график  $Q_{пз}=f(H_{ор})$  совпадает с индикаторной кривой, что указывает на отсутствие связи этих зон со скв. 41.

## 5. ПРИНЦИПЫ МЕТОДИКИ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ДАННЫХ ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ ИССЛЕДОВАНИИ СКВАЖИНЫ

Методика комбинированного исследования скважины предусматривает изучение ее как одиночной возмущающей и затем как реагирующей. Полученные результаты анализируются совместно. При комбинированном исследовании устраняются недостатки каждой из вышеописанных методик. Так, методика исследования одиночных возмущающих скважин требует достаточно точной регистрации расходограммы водоносных горизонтов для надежной оценки скин-эффекта, что не всегда можно обеспечить в кавернозных разрезах современными приборами. Методика исследования реагирующих скважин требует проведения работ при двух понижениях, что не всегда возможно по производственным и техническим соображениям, тогда как в методике комбинированного исследования скважины на стадии реагирования требуется лишь один цикл временных измерений расходов осевого потока. На практике применение этой методики может быть различным. Например, изучение скважины в качестве одиночной может быть выполнено совместно с пробной откачкой, а в качестве реагирующей — при использовании ее как наблюдательной при кустовых исследованиях. Можно также применить вариант независимого, или автономного исследования скважины как одиночной непосредственно перед кустовой откачкой или после нее. По ряду технологических соображений этот вариант может оказаться предпочтительным. Возможен еще ряд других комбинаций и вариантов проведения исследований, однако все они предполагают один и тот же набор исходных данных. Порядок проведения исследований и способы возбуждения могут быть разными в конкретных условиях.

В процессе исследования скважины как одиночной предусматривается получение первичных данных и результатов в соответствии с разделами 1 или 2.

В процессе исследования скважины как реагирующей предусматривается получение временных функций или разовых значений динамического уровня и дебитов перетока между пластами (в зависимости от гидродинамического режима возбуждения) при одном понижении уровня в возмущающей скважине путем проведения откачки с постоянной производительностью. В числе исходных данных используются также разовые расходограммы по возмущающей скважине, полученные в условиях неработающего

и работающего состояний (модель 1). Эти исследования проводятся в соответствии с положениями методики исследования одиночных скважин.

В основе интерпретации данных, полученных на стадии неустановившегося режима, используется уравнение (II.159), которое для этого случая целесообразно записать в виде:

$$S_p(l, t) = S_j(l, t) + \frac{1}{4\pi (km)_j} \int_0^t \Delta Q_{pj}(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau. \quad (V.77)$$

Для решения уравнения (V.77) из экспериментальных данных определяется функция  $S_j(l, t)$ . Для этого по результатам исследования данной скважины как одиночной и найденной таким образом оценке  $\rho_j$  (удельный дебит) строится индикаторная диаграмма  $\Delta Q_j = f(S)$ . На эту диаграмму наносится функция  $\Delta Q_{pj} = f(S_p)$ , полученная в результате временных измерений осевого перетока по скважине в процессе реагирования. Каждая точка этой диаграммы имеет координаты  $(\Delta Q_{pj}, S_p, t)$ . Пользуясь далее приемом, как показано на рис. 30, путем последовательного смещения индикаторной диаграммы  $\Delta Q_j = f(S)$  параллельно самой себе вдоль оси  $S$  для общих с функцией  $\Delta Q_{pj} = f(S_p)$  точек определяются значения  $S_j(l, t)$ , соответствующие срезкам для данного пласта на различные моменты времени с начала откачки. Дальнейшая интерпретация полученных данных возможна в двух вариантах в зависимости от модели гидрогеологического разреза.

Модель 1. Возмущающая и реагирующая скважины пересекают слоистую толщу с взаимно коррелируемыми водоносными и непроницаемыми разделяющими пластами. При этом в каждой скважине для исследования открыты одноименные пласты, так что их разрезы тождественны (рис. 31). Для этих условий функция  $S_j(l, t)$  для каждого из водоносных пластов, открытых в обеих скважинах, выражается следующим образом:

$$S_j(l, t) = \frac{\Delta Q_j}{4\pi (km)_j} \int_0^t w_j(l, \tau) d\tau. \quad (V.78)$$

Интерпретация на ее основании записанного уравнения уже изложена и не содержит новых особенностей.

Модель 2. Возмущающая и реагирующая скважины вскрывают неоднородную толщу с некоррелируемыми водоносными и разделяющими пластами (например, разрезы трещинно-карстовых пород) (рис. 31). В этом случае величины  $\Delta Q_j$  в возмущающей скважине не могут быть соотнесены с пластами в реагирующей скважине. Поэтому для интерпретации используется функция

$$\xi_j(\rho_0, t) = S_p(l, t) - S_j(l, t).$$

Для условий проведения исследования при установившемся режиме последовательность интерпретации аналогична. Отличие состоит лишь в том, что используются единичные значения измеряемых характеристик.

По условию II.143 она равна

$$\xi_j(\rho_0, t) = \frac{1}{4\pi(km)_j} \int_0^t \Delta Q_{пj}(\rho_0, t - \tau) w_j(\rho_0, \tau) d\tau. \quad (V.79)$$

Интерпретация полученных экспериментальных функций  $\xi_j(\rho_0, t)$  и  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, t)$  на основании этого уравнения была изложена в разделе 1 и не содержит новых особенностей.

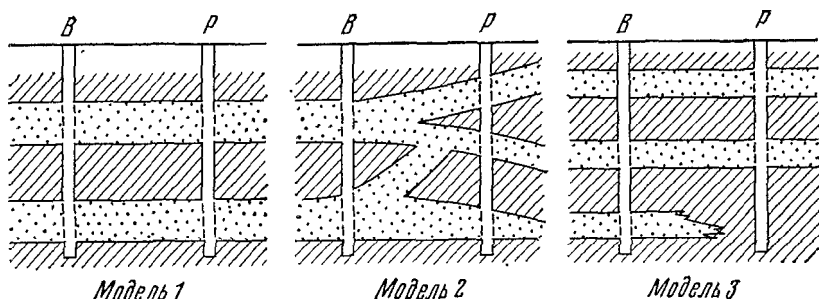


Рис. 31. Гипотетические модели разрезов взаимодействующих скважин  
В — возмущающая скважина; Р — реагирующая скважина

Как показано в разделе 3 главы II, интерпретация этих данных может быть также выполнена на основе уравнений (II.168), что упрощает вычислительные работы.

Очевидно, что для исследования разрезов, соответствующих этой модели, нет смысла дополнительно исследовать возмущающую скважину с помощью расходомерии, что упрощает технологию работ, однако оценки  $(km)_j$  и  $a_j$  по (V.79) будут, видимо, менее точным по сравнению с результатами интерпретации по (V.78). Поэтому при значительных перетоках по стволу реагирующей скважины следует учитывать потери напора по описанной выше методике.

Модель 3. Эта модель гидрогеологического разреза, вскрытого возмущающей и реагирующей скважинами, может соединять элементы предыдущих моделей (рис. 31). Например, в системе из двух водоносных пластов, разделенных непроницаемым слоем, возмущающая скважина оборудована на один водоносный пласт, а в реагирующей открыты оба. В этом случае оценка параметров общего пласта может быть выполнена по способу (V.78), а другого пласта — по способу (V.79).

При выполнении исследований в установившемся режиме фильтрации предусматривается получение разовых расходограмм и единичного значения  $S_j(l)$ . Для гидрогеологического разреза, соответствующего модели 1, это значение равно

$$S_j(l) = \frac{\Delta Q_j \ln \frac{R}{l}}{2\pi(km)_j}. \quad (V.80)$$

Для гидрогеологического разреза, соответствующего модели 2,

$$\xi_j(\rho_0) = \frac{\Delta Q_{\Pi j} \ln \frac{R_p}{\rho_0}}{2\pi (km)_j}, \quad (V.81)$$

где  $(km)_j$  оценивается на основании (V.80) и (V.81) приемами, аналогичными описанным в разделе 2.

Можно привести ряд полезных приложений описанных методик для усовершенствования гидрогеологических работ. Они могут быть использованы, например, для сокращения числа ярусных наблюдательных скважин в опытных кустах, проектируемых для исследования фильтрационных свойств слоистой водоносной системы. В случае обнаружения дефектов в конструкции центральной или наблюдательных скважин при опытно-фильтрационных исследованиях опытных кустов задача может быть решена без реконструкции скважин, если будет применена одна из описанных выше методик. При традиционном ведении работ эти дефекты приводят к браку.

## **6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОДИНОЧНЫХ ВОЗМУЩАЮЩИХ СКВАЖИН НА ОСНОВЕ ГЛУБИННОЙ РАСХОДОМЕТРИИ**

Экспериментальная проверка методики расходомерии одиночных возмущающих скважин при использовании установившегося и неуставившегося режимов возбуждения осуществлялась в натурных условиях. Она преследовала различные цели. Прежде всего в результате экспериментальных исследований важно было получить фактический материал, непосредственно доказывающий правомерность основных теоретических предпосылок расходомерии. Затем необходимо было опробовать методику решения обратной задачи на основании приведенных алгоритмов и выработать определенные приемы их использования. И, наконец, важно было получить доказательства правомерности дифференциальной оценки параметров совместно изучаемых пластов на фактическом материале исследования скважин. Поскольку такая работа проводилась в реальных условиях гидрогеологического производства, материалом для сопоставления и оценки достоверности служили данные, получаемые в процессе рядовых гидрогеологических исследований по традиционной методике.

Обсуждаемые ниже результаты экспериментальных исследований не охватывают всего многообразия природных условий и типов конструкций скважин. Автор ограничил область экспериментирования и затем внедрения метода в производство объектами разведки месторождений подземных вод, приуроченных к трещиноватым и карстующимся породам. Как отмечено выше, в таких природных условиях результаты исследования фильтрационной неоднородности разрезов традиционным методом исследования

гидрогеологических скважин наименее достоверны и восполнение этого пробела путем применения расходомерии представляется наиболее актуальной задачей. По геолого-техническим условиям проводка скважин в подобных отложениях осуществляется в основном с промывкой забоя чистой (технической) водой и ствол скважины либо оставляется открытым, либо закрепляется дырчатými или щелевыми фильтрами с относительно небольшим гидравлическим сопротивлением. Это естественно наложило отпечаток на полноту экспериментального материала.

Следующим этапом экспериментальной проверки метода должно явиться исследование скважин в слоистых водоносных системах, бурение которых часто осуществляется с промывкой забоя глинистым раствором, а ствол закрепляется фильтрами с относительно большим гидравлическим сопротивлением (проводочная намотка, сетки и др.). Такие скважины после бурения и установки фильтров подвергаются деглинизации. На современном этапе (об этом свидетельствует массовое применение расходомерии в качестве контрольного мероприятия) существующие методики и средства деглинизации фильтров еще не обеспечивают равномерного освобождения их и зафильтровой зоны от глинистого колюматирующего материала. Принципиально это не изменяет теоретических основ и методики расходомерии, однако такая особенность может потребовать внесения корректив в прямую и обратную задачу метода, а также в программу экспериментальной его проверки. Например, в силу различной и неравномерной колюматации фильтров водоносные пласты уже не могут рассматриваться как совершенные по степени вскрытия. Очень часто они сразу оборудуются фильтрами не на всю мощность или фильтрами — секциями, помещаемыми в различных частях водоносного горизонта.

В таких условиях использование предпосылки о плоскорадиальном притоке воды к скважине может оказаться слишком грубым и требовать пересмотра основного дифференциального уравнения расходограммы. Эти и ряд других причин побудили нас разделить назначение, экспериментальное и производственное внедрение метода на два направления:

а) изучение водоносных горизонтов, связанных с трещиноватыми и карстующимися неоднородными по проницаемости породами, бурение которых осуществляется с промывкой забоя чистой водой (ствол открыт или закреплен фильтрами с небольшим гидравлическим сопротивлением);

б) изучение водоносных горизонтов, связанных с рыхлыми порово-пластовыми коллекторами, бурение которых осуществляется с промывкой забоя глинистым раствором (ствол закреплен фильтрами с существенным и переменным по вертикали гидравлическим сопротивлением).

Первое направление является основным предметом обсуждения в данной работе.

Необходимо отметить еще одну важную особенность рассматриваемых ниже результатов экспериментальных исследований. Вначале развивалась и внедрялась в производство модификация расходомерии при использовании установившегося режима возбуждения скважины. Она также проходила стадию обоснования путем сопоставления и анализа различных фактических данных. Массовое внедрение в производство этой модификации расходомерии привело к изменению методики гидрогеологических работ — были исключены либо существенно уменьшены объемы поинтервального опробования одиночных гидрогеологических скважин, особенно при разведке водоносных горизонтов, связанных с трещиноватыми и карстующимися породами. Поэтому при последующем опробовании модификации расходомерии одиночных возмущающих скважин в неустановившемся режиме возбуждения критерием достоверности стали уже не столько данные поинтервальных откачек, сколько соответствие индивидуальных и приведенных параметров исследуемой водоносной системы.

Рассмотрим результаты эксперимента исследований на примерах. В первых трех примерах обсуждаются результаты экспериментальных расходометрических исследований при установившемся режиме возбуждения скважин, составляющих один опытный куст. Это дает возможность сопоставить результаты определения параметров по одиночным и наблюдательным скважинам, т. е. осуществить как внутренний контроль методики интерпретации данных расходомерии (сравнение с результатами поинтервального опробования одиночных скважин), так и внешний (сравнение с результатами оценки параметров разреза по наблюдательным скважинам опытного куста). Этот куст был пробурен на участке разведки подземных вод для водоснабжения г. Кемерово (участок Красноярские песчаники). Водоносный комплекс связан с отложениями ильинской свиты  $R_2^{il}$ . Литологический разрез представлен трещиноватыми песчаниками (79 %) и глинистыми алевролитами и аргиллитами (21 %). Иногда присутствуют прослои сцементированных галечников и конгломератов. Песчаники и алевролиты крепкие, в стволе скважины устойчивые. Аргиллиты в большинстве своем также крепкие, но в отдельных случаях при значительной раздробленности неустойчивые.

Сформировавшиеся в дельтовой области отложения отличаются фациальной изменчивостью, вследствие чего корреляция геологических разрезов даже по близрасположенным скважинам невозможна. Дизъюнктивные нарушения в пределах участка отсутствуют, однако в результате складкообразования породы подвергались растрескиванию с образованием сложной системы мелких трещин (скола и разрыва).

Пример 1. На рис. 32 приведены результаты исследования скв. 41 по методике расходомерии при установившемся режиме. Литологический разрез представлен трещиноватыми песчаниками с включением пластов алевролитов, аргиллитов и сцементированных галечников. До глубины 22 м ствол скважины закреплен об-



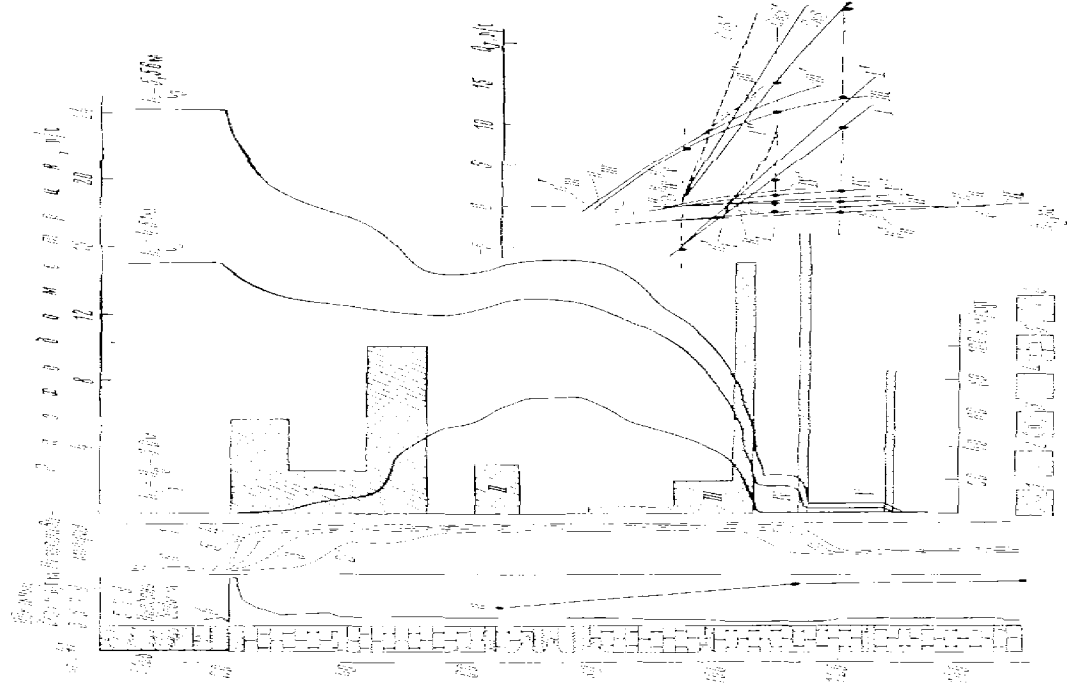


Рис. 32. Разрезная аннотация на основании рис. 11 по системе расположения одноэтажной конструкции  
составлена при проектировании жилого дома.

6 - Местный двор, по разделу 1-1; 5 - Местный двор, по разделу 2-2; 4 - Местный двор, по разделу 3-3; 3 - Местный двор, по разделу 4-4; 2 - Местный двор, по разделу 5-5; 1 - Местный двор, по разделу 6-6.

садной трубой диаметром 6 дюймов. Исследования методом расходомерии проведены при восстановленном уровне динамического равновесия напоров (статический уровень скважины), равном 3,0 м, и двух установившихся понижениях с динамическим уровнем соответственно 4,51 и 5,56 м. Откачка производилась компрессором. По результатам расходомерии получено соответственно три расходограммы. Эти материалы сопоставляются с результатами обычных гидрогеологических наблюдений и данными резистивиметрии.

1. Из анализа формы расходограмм в разрезе скважины выделяется пять водоносных зон. По описанию керна они соответствуют интервалам трещиноватых песчаников. Пачка не трещиноватых глинистых пород (алевролитов и аргиллитов), залегающих в интервале 70—82 м, по данным расходомерии является водопорной, о чем свидетельствует отсутствие изменения расхода воды по скважине на данной глубине. Наличие этой плохо проницаемой пачки пород особенно четко подтверждается расходограммой неработающей скважины, по которой она характеризуется как разделяющий слой между двумя гидродинамическими зонами с различными приведенными напорами в пределах вскрытого водоносного комплекса. Сведения о колебаниях уровня в процессе бурения (см. рис. 32, б) и результаты поинтервальных пробных откачек не позволяют надежно разделить разрез на водоносные и неводоносные участки. По данным резистивиметрии, интервал разреза, включающий основные выделенные зоны, характеризуется интенсивным опреснением электролита, что подтверждает общие границы водоносности. Однако они не дают более конкретных сведений о строении водоносного комплекса.

2. Анализ индикаторных диаграмм выделенных водоносных зон показывает, что зоны I, II и V характеризуются прямолинейной зависимостью дебита от динамического уровня, зоны III и IV — параболической. Индикаторная диаграмма всей скважины также параболическая.

Результаты интерпретации фактических индикаторных диаграмм проверены по формуле (V.38). При этом получено: уровень динамического равновесия, замеренный в скважине до откачки, равен 3,0 м, а рассчитанный по формуле (V.38) — 3,33 м. Эти соотношения вполне удовлетворяют требованиям контроля. Полученные значения индивидуальных статических уровней водосносных зон и их расположение относительно уровня динамического равновесия полностью подтверждаются характером водообмена, фиксируемым в неработающей скважине. В связи с тем что зона III характеризуется ярко выраженной криволинейной формой индикаторной диаграммы, ее статический уровень был рассчитан в соответствии с [34].

3. Индивидуальные значения водопроводимостей выделенных зон подсчитаны по формуле (V.29) без учета гидравлических потерь. Значение коэффициента  $f$  для данного района было принято равным 0,5. Результаты интерпретации приведены в табл. 3.

Таблица 3

Водоносные зоны	Границы, м			Дебит, л/с			Глубина статического уровня по фактическим данным, м	Водопроводимость без учета потерь напора, м²/сут			Потери напора, м			Глубина статического уровня по исправленным данным, м	Водопроводимость с учетом потерь напора, м²/сут		
	Кропля	Подшва	Мощность	В неработающей скважине, $h_D = 3,0$ м	I ступень откачки, $h_D = 4,51$ м	II ступень откачки, $h_D = 6,50$ м		I понижение	II понижение	Средняя	В неработающей скважине	I ступень откачки	II ступень откачки		I понижение	II понижение	Средняя
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I	22	54	32	—5,2	3,1	9,65	3,93	950	1002	976	0,01	0,27	0,42	3,72	1147	1200	1173
II	62	69	7	—1,75	—0,9	—0,8	7,74	97	64	80	0,02	0,33	0,5	6,20	112	79	100
III	81	108	27	6,94	11,3	13,05	1,44	501	413	457	0,06	0,51	0,75	1,62	711	573	642
IV	116	117	1	0,01	1,3	1,75	2,98	147	118	132	0,06	0,51	0,76	2,80	210	167	188
V	130	131	1	0,0	0,3	0,45	3,0	35	30	33	0,06	0,51	0,76	2,80	50	43	46
Общие параметры разреза:																	
по данным расходомерии	—	—	68	—	—	—	3,33	1730	1627	1678	—	—	—	3,08	2240	2062	2149
по данным откачки	—	—	—	0	15,1	24,1	3,0	1728	1630	1679	—	—	—	—	—	—	—
по данным откачки с учетом потерь напора по расходомерии	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,03	0,39	0,57	2,97	2269	2062	2165

Примечания. 1. При съемке готерь нагсра гравито: для интервала 0—69 м,  $\zeta_0 = 0,1$  мм, для 69—131 м,  $\zeta_0 = 0,5$  мм

2. Общие потери напора в скважине подсчитаны по выражению:  $\frac{\sum (km)_j (S_{ri} + S_{lj})}{\sum (km)_j}$ .

3. Суммарный дебит скважины по расходомерии откорректирован по данным откачки.

С помощью номограммы (см. рис. 25) были оценены величины потерь напора в скважине и внесены поправки в значения индивидуальных понижений. После этого по формуле (V.29) подсчитаны значения водопроводимости водоносных зон. Аналогично подсчитана общая водопроводимость разреза. Как видно, сумма водопроводимостей отдельных зон удовлетворительно совпадает с общей водопроводимостью разреза по данным откачки с использованием исправленного значения понижения.

После внесения поправок на величины потерь напора в скважине получены исправленные индикаторные диаграммы. Они обозначены штрихом. Как видно, исправленные индикаторные диаграммы I, II и V водоносных зон хорошо аппроксимируются прямыми. Для других зон они приобрели менее выраженную кривизну. Найденные по этим диаграммам истинные значения статических уровней и водопроводимостей водоносных зон использованы для расчета истинного уровня гидродинамического равновесия данной водоносной системы по формуле (V.38). Он оказался равным 3,08 м. Статический уровень этого же водоносного комплекса после вычитания из наблюдаемого значения величины потерь напора в неработающей скважине, обусловленных перетоком по

стволу, равен 2,97 м. Форма расходограмм выделенных водоносных зон характеризует их как неоднородные. Поэтому, расчленив расходограммы на отрезки, удовлетворительно аппроксимируемые прямыми линиями, был осуществлен дифференцированный расчет водопроводимостей для различных неоднородных интервалов. В результате получен детализированный профиль вертикального распределения водопроводимости (на рис. 32 он показан штриховкой).

4. Сравнение результатов расходомерии с данными поинтервального опробования показывает:

а) при глубине забоя 65 м проведена первая пробная откачка. Открытая часть разреза 22—65 м. Восстановленный уровень воды в скважине 4,3 м. Понижение 4,42 м. Удельный дебит 5,9 л/с·м. В этом интервале по данным расходомерии установлены две водоносные зоны. Расчетный равновесный уровень для этих зон равен 4,2 м, суммарный удельный дебит составляет 6,1 л/с·м при относительно меньшем понижении. При сопоставлении использованы данные опыта;

б) при глубине забоя 113 м проведена вторая пробная откачка. Открытый интервал 22—113 м. Восстановленный уровень воды и

удельный дебит соответственно равны 3,5 м и 9,3 л/с·м. По данным расходомерии равновесный уровень и удельный дебит для этого интервала разреза соответственно равны 3,25 м и 8,68 л/с·м при близких значениях понижения. Здесь также сопоставлены только опытные данные.

5. При проведении опытной откачки из скв. 38 (см. рис. 34) наблюдались уровни в скв. 39 и 41. При дебите откачки 42 л/с в последних скважинах образовались установившиеся срезки соответственно 2,3 и 0,59 м. По этим данным рассчитана водопроводимость разреза по формуле Дюпюи для двух наблюдательных скважин. Она составила 2093 м<sup>2</sup>/сут, что отличается от водопроводимости, рассчитанной по исправленным расходометрическим данным, на 2,7 % (см. табл. 4, графа 18).

Через год после описанных работ была проведена откачка из пробно-эксплуатационной скв. 46-Ц, пробуренной в 3 м от скв. 39. Дебит откачки 125 л/с. По наблюдению за снижением уровня в скв. 41 оценена водопроводимость разреза по способу Джекоба в 2330 м<sup>2</sup>/сут. От полученного значения в обсуждаемом примере эта величина отличается на 8,4 %. Откачка была проведена для опробования методики расходомерии реагирующих скважин. Результаты этого эксперимента обсуждаются в разделе 7.

Приведенные результаты экспериментальных исследований подтверждают достоверность материалов расходомерии для выявления водоносных зон и оценки их параметров. Высокая степень сходимости общих значений водопроводимости разреза (см. табл. 4, графа 11) свидетельствует прежде всего о высокой точности результатов измерения. Высокая степень совпадения общих параметров разреза по исправленным данным опыта, а также по наблюдательным скважинам свидетельствует о принципиально верных предпосылках метода.

Следует обратить внимание на возможность самоконтроля методики учета гидравлических потерь в скважине. Если потери напора определены правильно, то исправленная индикаторная диаграмма должна стремиться к своему предельному положению прямой с угловым коэффициентом, равным

$$\rho = \frac{2\pi (km)_I}{\ln \frac{R}{r_0}}.$$

Допустим, что потери напора обусловлены только гидравлическими особенностями ствола скважины, которые могут быть комплексно охарактеризованы значением эквивалентной шероховатости. Если при оценке потерь напора принято, что значение эквивалентной шероховатости ствола скважины больше истинного, то, очевидно, что исправленная индикаторная диаграмма приобретет обратную кривизну. Это свидетельствует о необходимости уменьшения пересмотра величины эквивалентной шероховатости. Такой прием самоконтроля методики исправления индикаторных

диаграмм возможен при наличии не менее трех точек наблюдения на кривых. На рис. 32 показан результат использования заведомо завышенных значений шероховатости стенок скважины для учета потерь напора при исправлении индикаторных диаграмм зон I и III. Принято  $\zeta_0 = 1$  мм. Это привело к хорошо выраженному искривлению первично прямолинейной индикаторной диаграммы I водоносной зоны. Она приобрела вид, обычно свидетельствующий о неправильно проведенном опыте (пунктирная линия). При этом же значении  $\zeta_0$  (1 мм) исправленная диаграмма III водоносной зоны удовлетворительно аппроксимируется прямой. Однако принять такое значение нельзя, так как оно не обеспечивает исправления индикаторных диаграмм вышележащих зон, в частности зоны I. Учитывая данные кавернометрии, свидетельствующие о более сложном профиле ствола скважины ниже 69 м, для интервала 0—69 м было принято  $\zeta_0 = 0,1$  мм, а для интервала 69—150 м —  $\zeta_0 = 0,5$  мм. В этом случае исправленные индикаторные диаграммы водоносных зон I, II и V удовлетворительно аппроксимируются прямыми линиями, а индикаторные диаграммы зон III и IV становятся более пологими, занимая промежуточное положение между индикаторными диаграммами при  $\zeta_0 = 0,1$  мм и  $\zeta_0 = 1$  мм для всего ствола скважины.

Указанный способ самоконтроля нельзя считать универсальным, поскольку при этом выявляется лишь влияние особенностей поверхности ствола скважины на кривизну индикаторной диаграммы. Могут быть случаи, когда произвольное увеличение шероховатости не приводит к заметному обратному искривлению индикаторной диаграммы. Этот вопрос еще недостаточно исследован, однако, очевидно, что без учета изменений в призабойной зоне полного выравнивания индикаторной диаграммы получить нельзя. Поэтому указанный прием самоконтроля с варьированием значением эквивалентной шероховатости целесообразно применять пока только в тех водоносных зонах, где получены первичные прямолинейные индикаторные диаграммы.

Таким образом, на основании данных расходомерии можно дать дифференцированную оценку распределения водопроводимости пород и напоров подземных вод в вертикальном разрезе. При расчете этих характеристик по фактическим измерениям получают кажущиеся значения, опосредованные условиями залегания и совместным исследованием с другими водоносными зонами, а при расчетах по исправленным индикаторным диаграммам — значения параметров, приближающиеся к истинным. Сравнение истинных и кажущихся характеристик показывает, что последние занижаются тем больше, чем глубже залегает оцениваемый пласт и, очевидно, чем больше дебит вышележащих пластов.

Пример 2. На рис. 33 приведен пример аналогичных исследований в скв. 39, расположенной в том же районе. Исследования проводились при восстановленном уровне воды и трех понижениях с помощью выпусков.



Скважина пробурена до глубины 150 м. До глубины 18 м ствол скважины закреплен обсадной трубой диаметром 127 мм, ниже ствол открыт. В связи с обрушением стенок скважины расходомертические исследования проведены только до глубины 123 м. При этом фиксируется приток с забоя, т. е. по степени вскрытия нижней водоносной зоны скважину следовало бы считать песовершенной. Поскольку рассмотрение этих примеров имеет только методическое значение, для упрощения расчетов будем условно считать, что нижняя зона имеет подошву на глубине 123 м, т. е. вскрыта на полную мощность. То же относится и к зоне I, частично перекрытой обсадными трубами.

1. По графикам расходомертии в разрезе выделяются четыре водоносные зоны. Они соответствуют наиболее трещиноватым интервалам разреза, описанным по данным бурения, но более конкретно их границы устанавливаются по данным расходомертии. Как и в предыдущем примере, хорошо выделяется непроницаемая пачка аргиллитов, разделяющая разрез на две гидродинамические зоны с приведенным уровнем напора соответственно ниже и выше равновесного уровня.

Данные резистивиметрических исследований скважины при восстановленном уровне свидетельствуют об интенсивном опреснении электролита, вызванном восходящим перетоком воды по стволу, но по ним нельзя судить о строении водоносного комплекса.

2. Индикаторные диаграммы выделенных водоносных зон II и IV могут быть аппроксимированы прямыми линиями. Индикаторные диаграммы зон I и III и всей скважины имеют криволинейную форму. Результаты интерпретации данных расходомертии по скв. 39 приведены в табл. 4. Расчеты и проверка параметров выполнены аналогично предыдущему примеру.

3. Сравнение результатов расходомертии с данными поинтервального опробования скважины показывает:

а) при глубине забоя примерно 38 м скважина начала фонтанировать. Первое определение дебита самоизлива дало значение 2,75 л/с. Интервал опробования охватывает 19 м по мощности водоносной зоны I. Водоприток с 1 пог. м мощности водоносной зоны равен 0,14 л/с·м;

б) второе измерение дебита самоизлива произведено при глубине забоя 51 м, что соответствует нижней границе водоносной зоны I. Дебит равен 4,6 л/с. Водоприток с 1 пог. м мощности составляет 0,13 л/с·м. Сопоставив эти цифры, получаем, что водоприток с 1 пог. м из верхней части водоносной зоны в 1,1 раза больше, чем из нижней. Значения водопроницаемости этих интервалов по данным расходомертии находятся в соотношении 1,2:1;

в) при глубине забоя 85 м проведена пробная откачка. Опробованный интервал охватывает I, II и часть III водоносной зоны, что показывает, как часто наугад выбираются интервалы опробования сложных разрезов. Удельный дебит этого интервала скважины по данным пробной откачки равен 5,14 л/с·м при пониже-

Водоносные зоны	Границы, м			Дебит, л/с				Глубина статического уровня по фактическим данным, м
	Кровля	Подощва	Мощность	В неработающей скважине, $h_d = -2,07$ м	I ступень выпуска, $h_d = -2,07$ м	II ступень выпуска, $h_d = -1,23$ м	III ступень выпуска, $h_d = -0,38$ м	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	18	51	33	-1,2	1,78	4,25	9,53	-1,91
II	65	70	5	0,07	0,34	0,60	1,25	-2,18
III	80	98	18	0,33	0,98	1,48	1,92	-2,28
IV	119	123*	4	0,80	1,04	1,17	1,30	-3,0
Общие параметры разреза:								
по данным расходо-								
метрии	—	—	60	—	—	—	—	-2,05
по данным откачки	—	—	—	0	4,14	7,5	14,0	-2,07
по данным откачки с	—	—	—	—	—	—	—	—
учетом потерь напора по								
расходометрии								

\* Подошва зоны принята по фактической глубине забоя скважины

Примечание. При оценке потерь напора принято: для интервала  $0-18$  м  $\xi_0 = 0,1$  мм, для

нии  $4,02$  м, по фактическим данным расходометрии он примерно равен  $7,5$  л/с·м при понижении  $1,69$  м;

г) при глубине забоя  $130$  м выполнено еще одно определение удельного дебита при самоизливе. Он получился равным  $9,0$  л/с·м. Интервал исследования охватывает все водоносные зоны, выделенные методом расходометрии. Расчетное значение удельного дебита этого интервала по данным расходометрии составило  $8,64$  л/с·м;

д) при глубине забоя  $150$  м была проведена вторая пробная откачка с понижением  $2,14$  м, которая дала значение удельного дебита  $8,2$  л/с·м.

4. Выше отмечено, что скв. 39 и 41 служили наблюдательными при проведении опытной откачки из скв. 38 (см. рис. 34). Расчет суммарной водопроводимости разреза по формуле Дюпюи для двух наблюдательных скважин дал значение  $2093$  м<sup>2</sup>/сут. Это на  $9,6$  % больше среднего значения водопроводимости разреза, полученного по данным расходометрии для двух ступеней понижения с учетом гидравлических потерь напора в скв. 39. Без учета потерь напора эта разность составила бы  $23,5$  %.

Пример 3. На рис. 34 приведены результаты исследования скв. 38 (тот же район). Скважина пробурена до глубины  $150$  м. До глубины  $21$  м ствол скважины закреплен обсадной трубой



Таблица 4

Водопроницаемость без учета потерь напора, м <sup>2</sup> /сут				Потери напора				Глубина статического уровня по исправленным данным, м	Водопроницаемость с учетом потерь напора, м <sup>2</sup> /сут			
I понижение	II понижение	III понижение	Средняя	В неработающей скважине	I ступень выпуска	II ступень выпуска	III ступень выпуска		I понижение	II понижение	III понижение	Средняя
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1288	1120	1097	1168	0,01	0,03	0,12	0,41	—1,92	1380	1310	1450	1380
117	109	121	116	0,01	0,04	0,13	0,45	—2,18	130	129	165	141
281	276	167	241	0,01	0,05	0,14	0,46	—2,40	320	284	224	276
104	76	51	77	0,01	0,05	0,15	0,46	—2,22	119	93	70	94
1790	1581	1436	1602	—	—	—	—	—2,03	1948	1816	1909	1891
1790	1542	1430	1587	—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	0,01	0,03	0,12	0,42	—2,07	1949	1800	1909	1886

18—123 м  $\xi_0 = 0,2$  мм

диаметром 6". Далее скважина пробурена коронкой диаметром 111 мм. В этом интервале ствол открыт Геологический разрез представлен песчаниками с редкими прослойками алевролитов и аргиллитов. Породы устойчивые, трещиноватые.

Исследования методом расходографии проведены при восстановленном уровне воды в скважине и двух установившихся понижениях при откачке компрессором.

1. По результатам исследований в разрезе скважины выделено шесть водоносных зон. По степени вскрытия водоносного комплекса скважина является несовершенной, так как фиксируется приток с забоя. Как и в предыдущем примере, для упрощения расчетов, а также в связи с неопределенностью нижней границы условно считаем скважину совершенной по степени вскрытия. Принимаем, что нижняя граница зоны VI совпадает с забоем скважины.

Интерпретация расходограмм и индикаторных диаграмм проведена изложенными ранее приемами, а результаты даны в табл. 5;.

2. Сопоставление результатов выделения водоносных зон по расходограммам с данными резистивиметрии очень хорошо показывает преимущества описываемого метода. Данные элементарных гидрогеологических наблюдений в процессе бурения косвенно

Таблица 5

Водоносные зоны	Границы, м			Дебит, л/с			Глубина статического уровня по фактическим данным, м	Водопроницаемость без учета потерь напора, м <sup>2</sup> /сут			Потери напора, м			Глубина статического уровня по исправленным данным, м	Водопроницаемость с учетом потерь напора, м <sup>2</sup> /сут		
	Кровля	Подолова	Мощность	В неработающей скважине, $h_d = -0,91$ м	I ступень откачки, $h_d = 1,94$ м	II ступень откачки, $h_d = 3,61$ м		I понижение	II понижение	Средняя	В неработающей скважине	I ступень откачки	II ступень откачки		I понижение	II понижение	Средняя
I	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
I	21	34	13	-4,85	-1,8	2,2	2,7	185	270	227	0,01	0,61	1,29	1,8	234	378	306
II	41	55	14	1,3	9,0	13,0	-1,39	467	451	459	0,04	1,18	2,20	-1,18	779	858	818
III	71	85	14	0,55	4,25	5,7	-1,30	224	197	210	0,07	1,40	2,60	-1,10	420	451	435
IV	97	105	8	1,2	2,35	3,0	-3,85	70	69	70	0,08	1,49	-2,67	-1,90	139	161	150
V	121	123	2	0,15	0,65	1,0	-1,70	30	32	31	0,08	1,51	2,70	-1,25	61	77	69
VI	141	145,5	9	1,65	2,75	3,0		67	52	60	0,09	1,52	2,71	-4,0	134	123	136
Общие параметры разреза:																	
по данным расходомерии																	
по данным откачки																	
по данным откачки с учетом потерь напора по расходомерии																	
			60					1043	1071	1057				1,06	1767	2048	1914
				0	17,2	27,9	-0,91	1043	1068	1055							
											0,05	1,2	2,23	-0,96	1750	2080	1915

Примечание. При оценке потерь напора принято для интервала 0—21 м  $\xi_0 = 0,1$  мм, для 21—145,5 м  $\xi_0 = 0,2$  мм.

подтверждают результаты дифференциации гидрогеологического разреза по расходомерии. Так, график колебания уровня (рис. 34) фиксирует его увеличение на интервале 0—60 м, что соответствует выводам о глубине статических уровней водоносных зон I и II. При глубине забоя 78 м начался самоизлив. Этот факт подтверждается расчетом положения равновесного уровня для трех верхних водоносных зон. Он должен находиться на высоте 0,16 м выше поверхности земли.

Выделение различных зон в разрезе скважины подтверждается графиками удельных дебитов по мере углубления забоя (рис. 34, б). Характерна форма графика расхода самоизлива (рис. 34, в), полученного по мере проходки зоны IV, который подтверждает значение ее мощности, установленное по расходограммам.

3. Как отмечено выше, из скв. 38 проводилась опытная откачка. Данные об установившихся дебите и уровня в скв. 38 и наблюдательных скв. 39 и 41 на 24/I 1963 г. приведены в табл. 6.

Общая водопроницаемость разреза по формуле Дюпюи для двух наблюдательных скважин составила 2093 м<sup>2</sup>/сут. Общая водопроницаемость этого разреза по данным расходомерии в скв. 38, определенная как средняя для двух понижений с учетом потерь напора равна 1914 м<sup>2</sup>/сут, эта величина отличается от предыдущего значения на 8,5 %. Интересно обратить внимание на то, что без учета потерь напора разница составляет 49,5 %. Это более чем в два раза превосходит аналогичную разницу в значениях

по скв. 39. В обоих случаях были приняты одинаковые величины эквивалентной шероховатости поверхности скважины. Причина большего влияния гидравлических потерь в скв. 38 заключается в том, что она пробурена одним диаметром (111 мм), а скв. 39 имеет телескопическую конструкцию, поэтому в наиболее водообильной части разреза ее диаметр больше (131 мм).

Пример 4. Обсуждаем результаты исследования скв. 6-Д по методике установившегося и не установившегося режимов. Такое сопоставление выполнено также с целью уточнения методики проведения расходометрических исследований и интерпретации данных наблюдения. Кроме того, при подобном сопоставлении может быть выявлено преимущество одной из методик.

Скважина 6-Д пробурена в пермо-триасовых отложениях восточной части Кузнецкого каменноугольного бассейна. Разрез

Таблица 6

Данные опытной откачки из скв. 38

Номер скважины	Глубина, м	Статический уровень, м	Динамический уровень, м	Понижение, м	Дебит, л/с	Удельный дебит, л/с·м	Расстояние до скв. 38, м
38	150	-0,32	4,66	4,98	39,42	7,91	
39	150	-0,71	1,59	2,30			175
41	150	3,45	4,04	0,59			330



представлен трещиноватыми породами: песчаниками, алевролитами, аргиллитами. В отличие от вышерассмотренных примеров в скв. 6-Д часть ствола закреплена фильтром. Он представляет собой трубу диаметром 127 мм, перфорированную сверлом 10 мм, скважность его составляет 10—15 %. По разбросу точек на расходограммах можно прийти к выводу, что за фильтром имеются каверны и он прилегает к стенке скважины не плотно. Бурением вскрыты высоконапорные воды с отметкой установившегося уровня выше поверхности земли. По данным расходомерии в разрезе выделено четыре водоносных зоны с существенно различными статическими уровнями, что создает сложные условия взаимодействия по стволу скважины при восстановленном уровне гидродинамического равновесия и возбуждении с различной интенсивностью. Рассмотрение расходограмм, полученных при четырех ступенях возбуждения скважины, представляет самостоятельный интерес (рис. 35).

При восстановленном уровне гидродинамического равновесия напоров по стволу скважины наблюдается восходящий переток между водоносными зонами II и I и нисходящий — между зонами III и IV. Это объясняется соотношением равновесных уровней между указанными группами водоносных зон и равновесным уровнем всей системы.

При возбуждении скважины с помощью непродолжительных выпусков ( $h_{д2}—h_{д4}$ ) зон I и IV остаются поглощающими. Однако величины поглощения уменьшаются в связи со снижением понижения (избыточного напора) в этих зонах. В зонах II и III величины понижения увеличиваются, что сопровождается ростом значения водопритоков. Интересно отметить, что даже в условиях возбуждения скважины водовыпуском сохраняется нисходящий переток между зонами III и IV. По мере увеличения понижения приток из водоносной зоны III раздваивается: часть его поступает в зону IV, а часть изливается на поверхность земли. Разделение притока из этой зоны четко фиксируется пересечением расходограмм с осью глубин. С увеличением понижения точка пересечения смещается вниз по глубине.

Наблюдаемая картина взаимодействия водоносных зон при возбуждении легко объясняется взаимным расположением их статических уровней относительно динамического уровня в скважине. При максимальном ( $h_{д5}$ ) возбуждении скважины с помощью откачки, когда динамический уровень оказался ниже статических уровней всех водоносных зон, наблюдался восходящий поток по всей скважине, складывающийся из суммы притоков.

Фактические значения дебитов водоносных зон и динамического уровня при различных ступенях возбуждения на момент регистрации расходограммы использованы для построения индикаторных диаграмм. Для водоносных зон I и II и всей скважины они имеют криволинейный характер. Даже после учета потерь напора они сохранили существенную кривизну. На основании имеющихся данных это может быть объяснено тем, что установив-

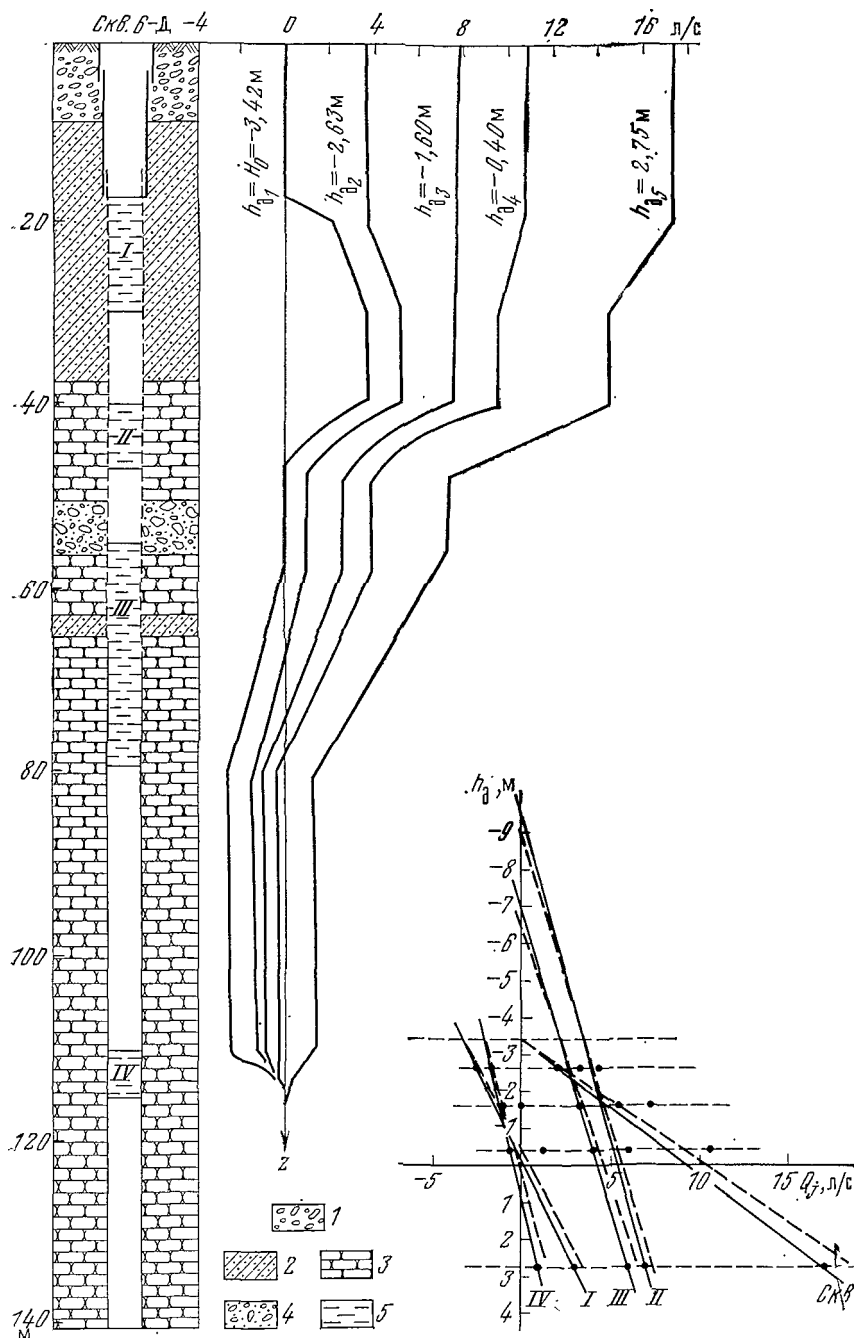


Рис. 35. Исследование скв. 6-Д по методике расходомерии одиночной возмущающей скважины при установившемся режиме возбуждения.

Пунктирными линиями показаны исправленные индикаторные кривые.

1 — галечники; 2 — алевриты; 3 — песчаники; 4 — конгломераты; 5 — водоносные зоны

шийся режим, по крайней мере при водовыпусках, не был достигнут. Такое объяснение полностью согласуется с материалами расходомерии этой скважины по методике неустановившегося режима. Последнее возбуждение скважины откачкой ( $h_{д5}$ ) было также непродолжительным, но более интенсивным. Расходомерические измерения проведены в начальный период наступления стабилизации уровня и дебита, поэтому данное возбуждение более целесообразно использовать для количественных расчетов параметров по формулам для установившегося движения.

Параметры водоносных зон по данным расходомерии на данном этапе исследований представлены в виде значений удельного дебита. Это сделано с целью избежания ошибок, связанных с необходимостью использования эмпирического значения коэффициента  $f$  в расчетной формуле (V.29) для установившейся фильтрации. Результаты расчета приведены в табл. 7, из которой видно, что сходимость суммарных значений удельных дебитов достаточно хорошая. Однако это свидетельствует прежде всего о достаточной точности данных измерения. Достоверность абсолютных значений параметров по формуле (V.29), соответствующей условиям установившейся фильтрации, при использовании среднего эмпирического значения коэффициента  $f$  для района работ, как показывают данные в графах 17—20, таким путем не может быть достигнута.

Фактические материалы исследования скв. 6-Д по методике расходомерии при неустановившемся режиме приведены на рис. 36. Эти исследования проведены при восьми циклах возбуждения скважины: два выпуска, две откачки и четыре восстановления уровня после каждого возбуждения. Возбуждения и восстановления имели различную продолжительность: от 6 до 40 ч. Ни один из циклов исследования скважины не был доведен до стабилизации уровня и дебитов. При планировании эксперимента во время выпусков предусматривалось возбуждение скважины в режиме  $Q=Q(t)$ ,  $S=S(t)$ . Для этого устье скважины было специально оборудовано оголовником с двумя боковыми отводами на различной высоте. Пропускная способность боковых отводов была меньше возможного для данного понижения дебита скважины. Это обеспечивало наблюдение постепенно снижающегося в оголовнике динамического уровня. Для измерения осевых расходов воды по скважине была использована гирлянда из четырех расходомеров, установленных соответственно выше каждой водоносной зоны. Использование гирлянды преследовало цель: а) получения возможно большего числа точек наблюдения на временном графике прослеживания дебитов; б) измерения расходов с возможно большей точностью, что достигается фиксированным расположением приборов во время всего цикла возбуждения скважины. Измерения уровня воды в скважине осуществлялись с помощью электроуровнемера. Полученные в результате наблюдений графики прослеживания уровня воды в скважине и дебитов

Водоносные зоны	Границы, м			Дебит, л/с				
	Кровля	Подоща	Мощность	В неработающей скважине, $h_{\text{д}} = -3,42$ м	I понижение, выпуск, $h_{\text{д}} = -2,63$ м	II понижение, выпуск, $h_{\text{д}} = -1,60$ м	III понижение, выпуск, $h_{\text{д}} = -0,40$ м	IV понижение, отсачка, $h_{\text{д}} = 2,75$ м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
I	19	30	11	-3,4	-1,6	0	1,2	3,0
II	40	47	7	3,4	4,2	5,4	6,0	7,0
III	57	81	24	2,2	2,6	3,3	4,0	6,0
IV	110	115	5	-2,2	-1,8	-1,2	-0,6	1,0
Общие параметры разреза: по данным расходомерии			47					
по данным откачки				0	3,4	7,5	10,6	17,0
по данным откачки с учетом потерь напора по даным расходомерии								

(общего и водоносных зон) для всех последовательных циклов возбуждения скважины приведены на рис. 36.

На примере материалов первого цикла исследования с выпуском рассмотрим основные положения методики интерпретации данных расходомерии в общем случае возбуждения скважины в неустановившемся режиме. Для этого цикла возбуждения на рис. 36 построены экспериментальные зависимости  $S=f(\lg t)$  и  $Q=f(\lg t)$  с учетом потерь напора по формуле (II.97). Как видно, исходное состояние этих зависимостей имеет довольно сложную форму. При построении использовано 30 точек наблюдений, неравномерно распределенных на временной шкале.

При рассмотрении этих графиков можно заметить, что с увеличением времени наблюдения они имеют тенденцию к стабилизации значений. Кажущаяся стабилизация значений дебитов наступает, однако, не одновременно для всех зон, что может свидетельствовать о различии условий притока воды к скважине по различным зонам. По общему графику  $Q=f(\lg t)$  можно считать, что она наступает при времени наблюдения более 1000 мин. Такое же значение времени наступления стабилизации можно получить из рассмотрения графика  $Q_1=f(\lg t)$ . Для водоносной зоны II дебит стабилизируется начиная с 550 мин. Для водоносных зон III и IV стабилизации дебитов не наблюдается, хотя спустя 1000 мин темп его изменения существенно уменьшается; однако эти изменения находятся в пределах точности измерения суммарного дебита скважины.

Таблица 7

Глубина статического уровня по фактическим данным, м	Потери напора, м					Глубина статического уровня по исправленным данным, м	Удельный дебит, л/с·м			
	В неработающей скважине	I понижение	II понижение	III понижение	IV понижение		I понижение	II понижение	III понижение	IV понижение
10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
—0,15	0,01	0,04	0,14	0,22	0,43	0,40	2,37	2,01	1,64	1,11
—9,5	0,03	0,07	0,24	0,38	0,70	—8,90	1,06	1,24	0,97	0,65
—6,95	0,03	0,07	0,24	0,38	0,80	—6,5	0,53	0,68	0,68	0,67
0,75	0,03	0,07	0,24	0,38	0,80	0,20	0,53	0,62	0,60	0,59
—3,11						—3,46	4,5	4,56	3,89	3,02
—3,42							4,3	4,12	3,51	2,76
	0,02	0,06	0,19	0,31	0,61	—3,44	4,54	4,55	3,89	3,05

Принимая условно режим фильтрации установившимся на конечных значениях времени наблюдения, подсчитаны значения удельных дебитов: I зона — 1,0 л/с, II зона — 0,71 л/с, III зона — 0,33 л/с, IV зона — 0,56 л/с, общий — 2,64 л/с.

Как видно, полученные значения удельных дебитов вполне соответствуют данным, полученным при целенаправленном исследовании этой скважины по методике установившегося режима, заданного откачкой на IV ступени понижения.

Таким образом, адекватность этих опытов можно считать вполне обеспеченной. Временной ход изменения дебитов и уровня убеждает нас в справедливости отмеченной выше причины наблюдаемых форм индикаторных диаграмм и значений удельных дебитов в предыдущих экспериментах. Она состоит в невыполнении условия установившегося режима при выпусках и наличии плановой неоднородности водоносных зон, проявляющейся в различные моменты времени. Можно даже считать, что в рассматриваемом опыте были достигнуты более близкие к установившемуся режиму условия фильтрации, чем при IV ступени понижения. Об этом свидетельствуют более низкие значения удельного дебита I—IV зон. При этом разница в значениях хорошо согласуется с временным ходом графиков  $S_j(t)$ .

Используя указанные 30 точек наблюдения на временных графиках прослеживания, рассчитаны функции  $S_j = f(t)$  при  $\alpha = 0; 1; 10$ , которые изображены на рис. 36 в масштабе  $S^* - \lg t$ .



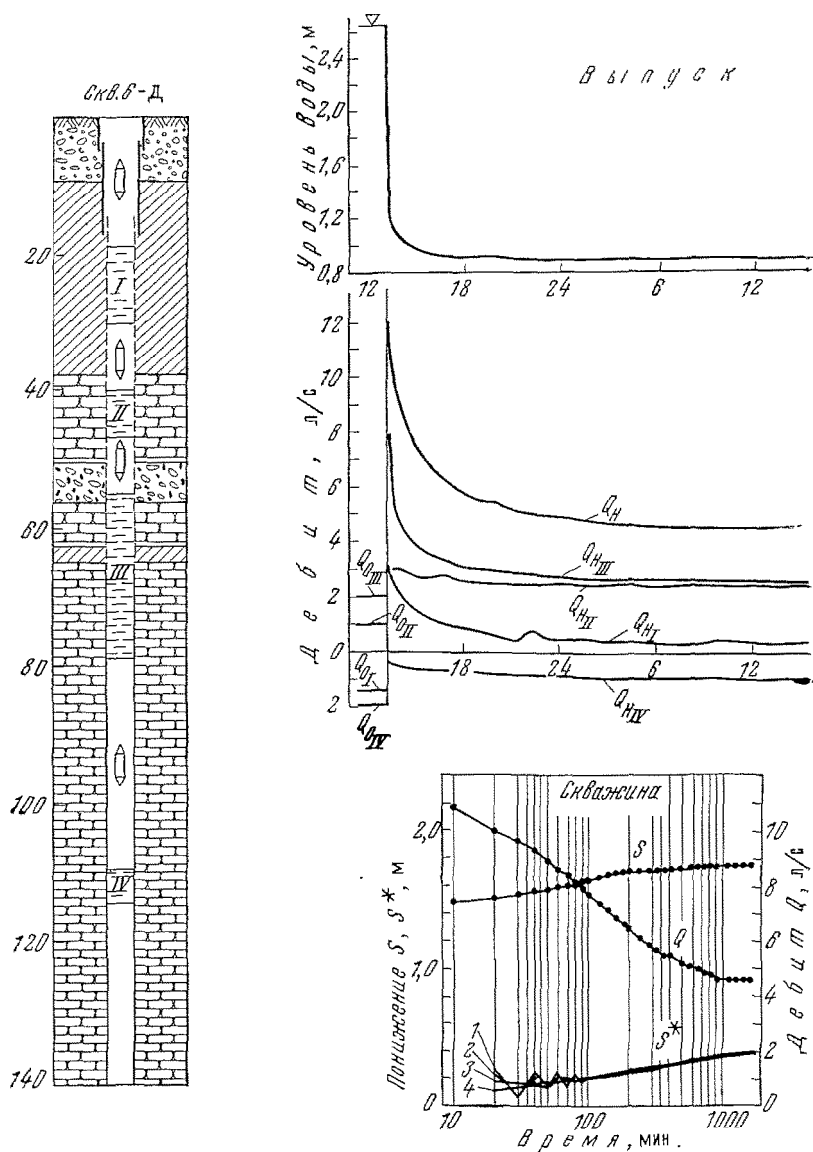
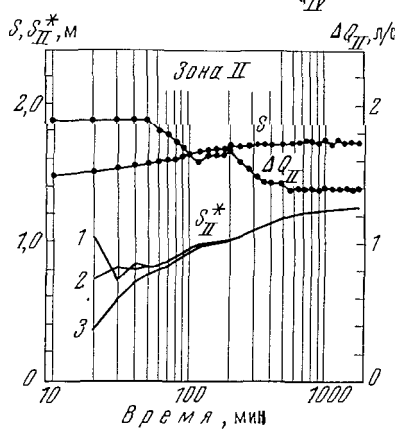
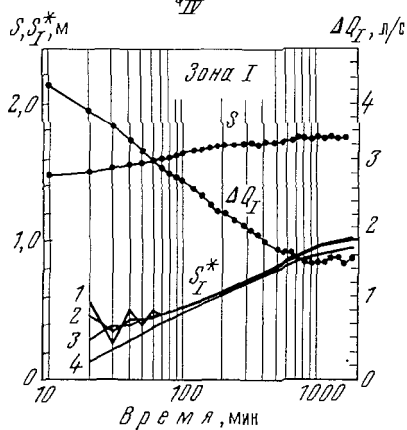
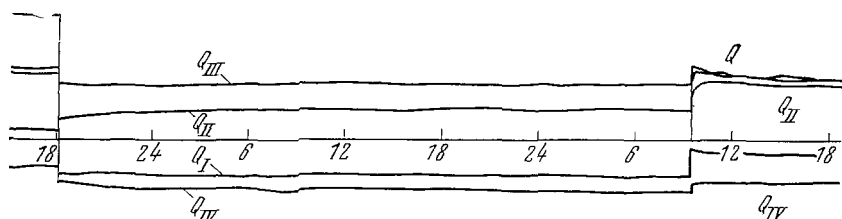


Рис. 36. Экспериментальные исследования скв. 6-Д по методике расходомерной одиночной возмущающей скважины при неустановившемся режиме возбуждения: 1 —  $\alpha=0$ ; 2 —  $\alpha=1$ ; 3 —  $\alpha=10$ ; 4 —  $\alpha=100$ ; 5 — положение расходомеров в скважине



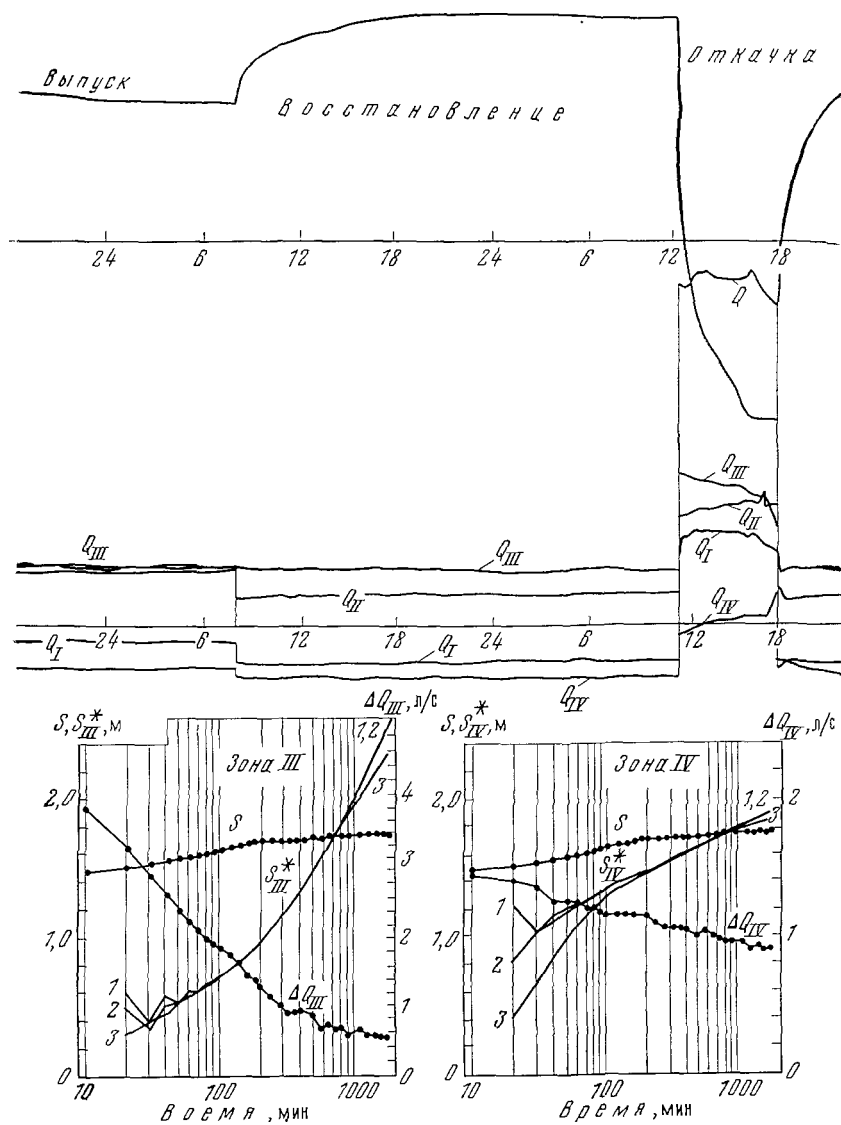
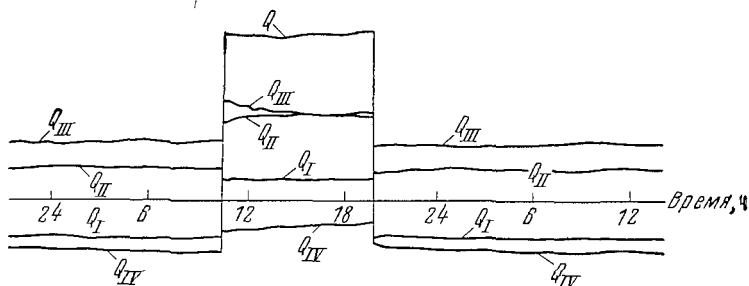
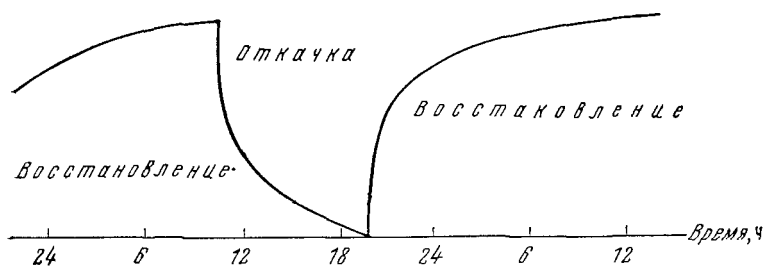


Рис. 36. Продолжение



Как видно, при значениях времени более 100 мин на них без особых трудностей могут быть выделены представительные участки для аппроксимации их прямолинейными отрезками. Отметим также, что на всех графиках отсутствуют участки стабилизированных значений понижений  $S^*$ , хотя при больших значениях времени темп изменения понижений для зон I и II заметно уменьшается. Для водоносной зоны III график  $S_{III}^*$ , наоборот, имеет тенденцию к увеличению изменения понижения, что отразилось на значении удельного дебита, указанного выше. Эти данные свидетельствуют о возможной плановой неоднородности фильтрационных свойств в пределах рассматриваемых зон: для зоны II они улучшаются, а для зоны III — ухудшаются с удалением от скважины, что дополнительно подтверждает правильность установления причины получения криволинейных индикаторных диаграмм в опыте расходомерии по методике установившегося движения, но с использованием непродолжительных возбуждений.

Существенной особенностью в методическом отношении является отсутствие стабилизированных участков на графиках  $S_j$  и  $S'$ , хотя фактически такая стабилизация наблюдалась. Можно предположить, что наблюдаемая стабилизация была ложной и обусловлена характером изменения дебита и понижения в предшествующий период. Выравнивание функции дебита во всем временном интервале исключило эту неоднозначность и наметило

тенденцию к стабилизации для зон I, II, IV при больших значениях времени.

При использовании коэффициента регуляризации, равного 1 и 10, замечен эффект некоторого сглаживания расчетных графиков: они все более и более обнаруживают тенденцию к видоизменению с переходом в один или несколько прямолинейных отрезков. Следует отметить, что получение прямой линии во всем временном интервале исследования, что можно, вероятно, достичь, используя большие  $\alpha$ , не обязательно. Форма графика прослеживания зависит также от многих гидрогеологических причин (неоднородности, границ), рассмотрение которых может быть специальной задачей. Стремление добиться максимального сглаживания графика  $S^1 = f(\lg t)$  путем задания больших  $\alpha$  может привести к искажению причинно-следственных связей, отображаемых этой функцией. Поэтому выбор  $\alpha$  должен регламентироваться только необходимостью обеспечить достаточные технические условия для нахождения представительного участка графика с целью аппроксимации его прямолинейным отрезком.

Графики прослеживания дебитов водоносных зон после остановки скважины показывают, что режим перетока по стволу стабилизируется достаточно быстро. Это согласуется с выводами гл. II о поведении дебитов пластов при возбуждении скважины с постоянным дебитом. В данном случае он равен величине дебита установившегося излива, взятой с обратным знаком. Объем свободной части ствола скважины ввиду малости можно не учитывать. Поэтому данные восстановления можно рассматривать как частный случай возбуждения скважины с постоянным дебитом.

Второй цикл возбуждения скважины на самоизливе с меньшим, чем первый, дебитом полностью повторил уже выявленный характер поведения графиков прослеживания. Последовавший за ним цикл восстановления уровня оказался аналогичным предыдущему циклу восстановления.

Все эти данные использованы для расчета водопроводимости зон и всего разреза по формуле (II.12). Результаты приведены в табл. 8. Для расчетов параметров использованы участки графиков прослеживания уровня при больших значениях времени.

Последующие циклы возбуждения скважины откачками не внесли ничего существенно нового. Все данные о дебитах и уровнях использованы для расчета водопроводимости зон и всего разреза по методике, изложенной в разделе I. Поскольку перед каждой сменой режима работы скважины не достигнуто полной стабилизации уровня, при расчете параметров учтено наложение мнимо продолжающегося неустановившегося режима. При этом использован простейший графоаналитический способ сложения течений, сущность которого сводится к следующему.

Смену режима работы скважины можно рассматривать как задание ей противоположно направленного и равного возбуждения без изменения предыдущего режима. Так, если скважина работала с постоянным дебитом и в некоторый момент остано-

Таблица 8

Вид возмущения	Восстановимость, %/сут									
	АМ		$\langle \Delta m \rangle_1$		$\langle \Delta m \rangle_2$		$\langle \Delta m \rangle_3$		$\langle \Delta m \rangle_4$	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Выброс	105,9	105,3	34,3	34,3	49,4	49,4	49,4	49,4	29,8	29,8
Восстановление	114,9	92,0	42,0	42,0	28,6	35,7	15,5	12,4	21,7	17,3
Выброс	123,7	93,7	44,6	33,7	37,2	49,1	10,9	8,2	19,8	15,0
Восстановление	108,6	84,2	39,2	30,4	33,6	43,4	9,3	7,2	19,4	15,0
Отказ	100,5	95,2	36,6	34,7	23,6	25,0	24,1	22,8	14,9	14,1
Восстановление	219,7	105,8	81,0	39,0	26,4	54,7	52,6	25,3	31,4	15,1
Отказ	122,9	81,9	46,6	28,7	26,1	42,4	21,3	13,1	22,8	14,1
Восстановление	151,0	84,1	53,0	29,0	27,6	50,5	28,2	15,4	22,3	12,2
Средняя восстановимость	122,4	92,8	47,2	32,9	31,6	43,5	21,6	14,5	22,9	16,1
Средняя арифметическая погрешность, ± %		8,5		7,6	18,7			26,8		20,2

лена, то складывающуюся ситуацию после остановки скважины можно принимать за проведение налива с постоянным расходом, равным дебиту откачки, в эту продолжающуюся работать с постоянным дебитом скважину. Если режим работы скважины до остановки был установившимся, то мнимый налив обеспечивает зеркальное отображение режима откачки, которое с течением времени должно обеспечить восстановление первоначального статического уровня. Если режим работы скважины не достиг стабилизации уровня, то режим мнимого налива не даст обратного воспроизводства режима откачки, а будет лишь некоторым наложением на мнимо продолжающийся неустановившийся режим откачки.

Если предшествующий и последующий режимы работы скважины относятся к общему случаю возбуждения с переменным уровнем и дебитом, то аналогичные рассуждения остаются полностью справедливыми. Однако методически наложение их удобно учитывать, используя преобразованные функции  $S_j^*(t)$  для режима откачки и восстановления, принимая за  $t=0$  начало пуска и остановки скважины. Отметим, что в расчетах функции  $S_j^*(t)$  по восстановлению необходимо использовать значения реально наблюдаемых дебитов. Применение такого способа учета наложения течений возможно только при условии использования описанной методики преобразования реальных функций, не изменяющейся временной шкалы. Существует много других способов учета предыдущей работы скважины при оценке параметров. Многие из них могут быть применены для обработки расходометрических данных. Мы ограничились одним способом, так как он логично вытекает из решения прямой задачи расходометрии в неустановившемся гидродинамическом режиме возбуждения пластов и сохраняет возможность анализа временного хода функции уровня. Однако рекомендовать этот способ для использования в массовых работах нельзя, так как известны более точные методы [24, 129].

На рис. 37 показан гипотетический ход графика изменения понижения для случая работы скважины при откачке с постоянным дебитом и последующей ее остановке и восстановлении уровня. НО — участок изменения уровня воды в скважине при откачке; ОО' — участок изменения уровня при мнимо продолжающейся откачке; ОВ — реально наблюдаемый график восстановления уровня после прекращения откачки; ОВ' — график восстановления уровня с поправкой на предшествующий неустановившийся режим. Приращение  $\Delta h$  относительно горизонтальной линии соответствует снижению уровня под действием мнимо продолжающейся откачки после остановки скважины.

Для случая, когда предшествующий режим достиг практической стабилизации, эти приращения в интервале наблюдения за восстановлением будут близки к нулю. Чтобы исключить действие мнимо продолжающегося снижения уровня, их следует вычитать из значений наблюдаемого уровня при восстановлении. Исправ-

ленный график будет иметь вид  $OB'$ . Затем этот график перестраивается на другом бланке с координатами  $S - \lg t$  (за  $t=0$  принимается момент остановки скважины) и обрабатывается в соответствии с рассмотренной методикой.

Изложенное выше относительно наложения возмущений для случая откачки и последующего восстановления справедливо также для любого другого числа последовательных смен режимом работы скважины. В этом случае поправки  $\Delta h$  последовательно вводят от первого возбуждения во второе и т. д., используя каждый раз в качестве графика уровня предшествующего режима исправленный график, построенный как показано на рис. 37. Если предшествующим режимом при таком последовательном рассмотрении графиков уровня является восстановление, то в этом случае поправка  $\Delta h$  прибавляется к значениям уровня, зафиксированным при откачке.

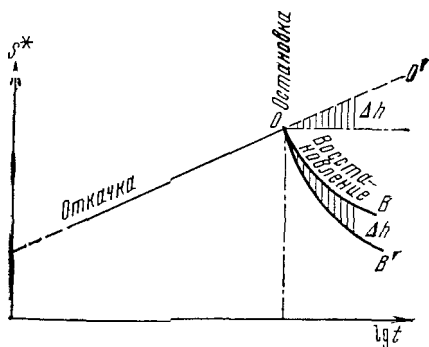


Рис. 37. Учет предшествующего режима работы скважины

Следует учитывать, что в связи с экспоненциальным характером изменения графиков  $S^*(t)$  действие предшествующих режимов ослабляется тем сильнее, чем большее время отделяет их от рассматриваемого.

В табл. 8 приведены значения параметров водоносных зон, полученные без учета и после учета предшествующего режима работы скважины. Как видно, средняя арифметическая погрешность исправленного значения водопроводимости различных зон по сумме всех возбуждений скважины колеблется в пределах 7,6—26,8 %. Полученные значения погрешностей не являются мерой точности метода, так как различные последовательные возмущения были неравнозначны по интенсивности и продолжительности. Можно отметить, что значения водопроводимости водоносных зон (за исключением зоны III) имеют тенденцию к уменьшению от опыта к опыту, что, очевидно, связано с погрешностями использования графоаналитического способа последовательного учета наложения течений. Этот пример рассмотрен с целью подтверждения правильности основных методических положений интерпретации данных расходомерии при неустановившемся режиме возбуждения скважины. В практических работах по данному методу предусматривается проведение исследований только при одном возбуждении — откачке. Поэтому в последующих примерах будут использованы специальные приемы выявления достоверности метода.

Пример 5. На рис. 38 приведены результаты исследования скв. 82-У по методике расходомерии в неустановившемся ре-



жиме. Скважина пройдена в пермских отложениях восточной части Кузнецкого бассейна. Разрез представлен трещиноватыми песчаниками, алевролитами. Скважина пробурена с отбором керна, но без проведения поинтервальных гидрогеологических исследований. Глубина забоя 100 м. До глубины 16,5 м опущена обсадная труба. Скважина 82-У пробурена как наблюдательная в опытном кусте. В процессе пробной откачки получена расходограмма, по которой установлена неравномерность обводнения разреза.

Для проведения описываемых расходометрических исследований была изготовлена гирлянда из четырех расходомеров, которые были установлены на глубине 15, 32, 46 и 54 м. Таким образом, оценке подлежали интервалы 16,5—32; 32—46; 46—54 м. Ниже глубины 54 м водопритока не наблюдалось. По измерениям в неработающей скважине зафиксировано наличие нисходящего перетока воды из верхнего в нижние интервалы разреза. Для возбуждения скважины использован эрлифт. Возбуждение задано с постоянным дебитом. В процессе откачки велись наблюдения за уровнем и расходом потока на глубине стояния расходомеров. Результаты приведены на рис. 38.

Эти данные, так же как и данные предыдущего примера, подтверждают теоретические положения о гидродинамическом режиме пластов в работающей с постоянным дебитом скважине. Следует обратить внимание на временной график дебита второго интервала. С момента пуска скважины его дебит постепенно возрастал и через 50 мин произошла инверсия (смена знака). По значениям параметров данный интервал разреза может быть отнесен к слабопроницаемому по сравнению с соседними. Это предопределило запаздывание развития депрессии в его пределах в первый период работы скважины.

В табл. 9 приведены результаты расчета водопроводимости и статических уровней исследованных интервалов разреза. Расчет выполнен для цикла наблюдений при откачке без учета и с учетом гидравлических потерь в скважине. Контроль полученных оценок по сходимости с общими параметрами разреза дает удовлетворительные результаты. Эта же скважина была использована как наблюдательная в период опытно-эксплуатационной откачки из центральной скважины 8-Ц. Расстояние между этими скважинами 5,4 м. Дебит откачки 84,9 л/с. Продолжительность откачки 27 сут. По графику восстановления уровня в скв. 82-У после прекращения откачки из скв. 8-Ц также была проведена оценка водопроводимости разреза, составившая 970 м<sup>2</sup>/сут. Как видно, это значение удовлетворительно совпадает с общей водопроводимостью разреза по расходометрическим данным.

Пример 6. На рис. 39 приведены результаты исследования скв. 15-И по методике расходометрии в неуставившемся режиме (1969 г.). Скважина пройдена в пермских отложениях центральной части Кузнецкого бассейна при разведке подземных вод для водоснабжения г. Белово. Разрез представлен трещиноватыми

песчаниками, алевролитами, реже аргиллитами. По данным расходомерии в неработающей скважине перетока воды по стволу не наблюдалось.

В 1965 г. скважина была исследована методом расходомерии с использованием установившихся возбуждений. По материалам исследования в разрезе выделены четыре водоносные зоны. Эти сведения были использованы для установки гирлянды расходомеров с расположением приборов выше каждой водоносной зоны.

С помощью мотопомпы МП-800 произведена откачка с заданной постоянной производительностью. Выполнены два цикла откачки и соответственно два цикла восстановления уровня. На рис. 39 приведены графики изменения уровня в скважине и дебитов скважины и зон во время откачки и восстановления, а также расходограмма по скважине, полученная во время первой откачки. При рассмотрении данных наблюдений прежде всего

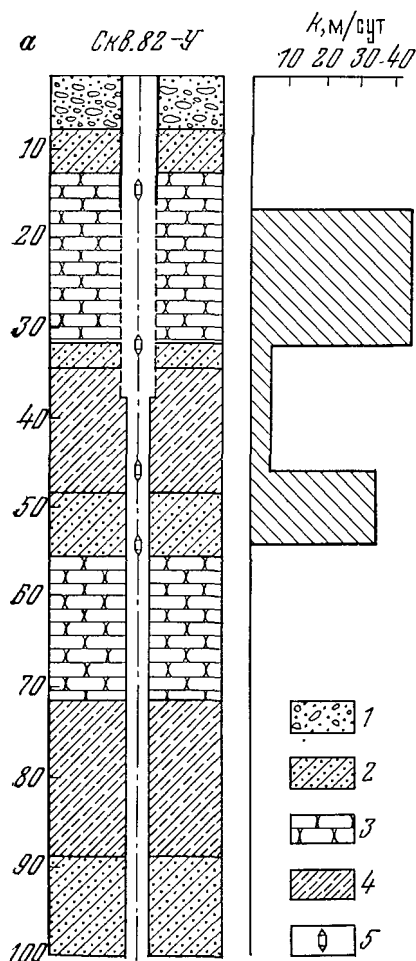


Рис. 38. Результаты экспериментальных исследований скв. 82-V по методике расходомерии одиночной возмущающей скважины при неустановившемся режиме возбуждения.  
а — схема измерений и профиль проницаемости; б — временные функции дебитов; 1 — гравелиты; 2 — алевролиты; 3 — песчаники; 4 — глинистые алевролиты; 5 — положение расходомеров в скважине



# Восстановление

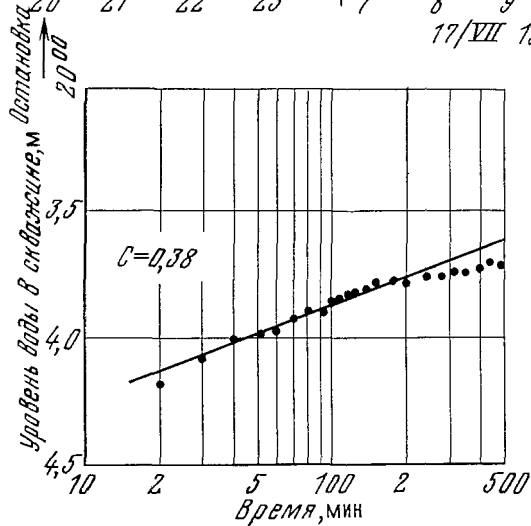
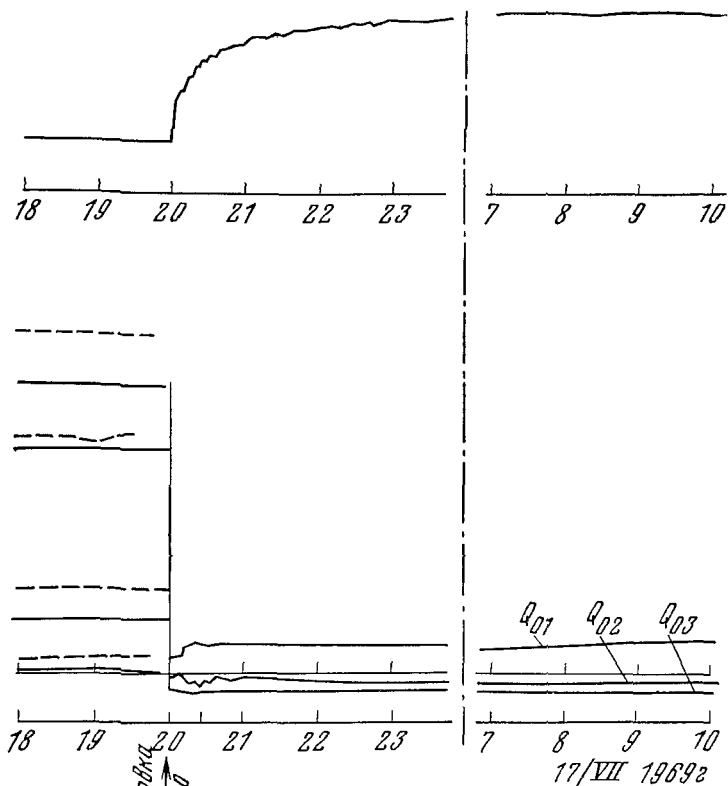


Таблица 9

Интервал исследования	Границы, м	Мощность, м	Добыча, т/с		Производительность (без учета ликвидационных потерь), м <sup>3</sup> /сут	Льготная статистическая группа (без учета ликвидационных потерь), м	Потери потерь, м			Производительность (с учетом ликвидационных потерь), м <sup>3</sup> /сут	Льготная статистическая группа (с учетом ликвидационных потерь), м	Воспроизводительность по тарифным возмещениям убытков, м <sup>3</sup> /сут	Воспроизводительность срочным, м <sup>3</sup> /сут
			В неработающей смене	В работающей смене			В неработающей смене	В работающей смене	Принудительный расход на $\Delta Q_j$ , т/с				
Общие параметры разреза по длине раскислителей	16,5-32	15,5	2,2	18,4	635	3,64	0,01	0,14	18,8	672	3,66	711	696
	32-46	14	-0,8	0,2	42	4,92	0,01	0,15	1,3	85	4,43	44	64
	46-54	8	-1,4	4,2	227	4,04	0,01	0,16	6,5	320	4,00	246	283
по данным отливки					909	3,88				1077	3,78	1001	1099
по данным отливки с учетом потерь изливов					925	3,78						985	
по данным раскислителей				32,8			0,01	0,15	27,5	1115	3,78		
по													

следует обратить внимание на поведение временных графиков дебита водоносных зон. Они подтверждают приведенные в гл II теоретические положения о гидродинамическом режиме пластов в работающей с постоянным дебитом скважине. В данном примере мы имеем частный случай, когда скважиной вскрыт водоносный комплекс с равными статическими уровнями водоносных зон. Стабильность частных дебитов практически с момента возбуждения скважины прямо указывает на возможность осуществления приведенной в гл. II методической рекомендации: при возбуждении скважины с постоянным дебитом достаточно производить разовую регистрацию расходограммы.

Приведенные в табл 10 результаты расчета водопроводимости

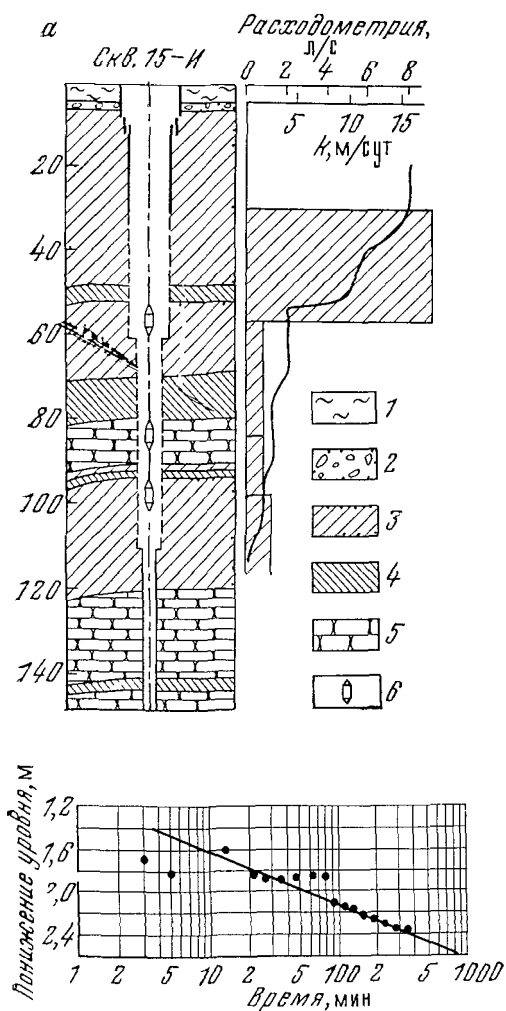


Рис 39 Результаты экспериментальных исследований скв 15-И по методике расходомерии одиночной возмущающей скважины при неустановившемся режиме возбуждения. 1 — глины; 2 — галечники, 3 — алевролиты 4 — аргиллиты 5 — песчаники, 6 — положение расходомеров в скважине

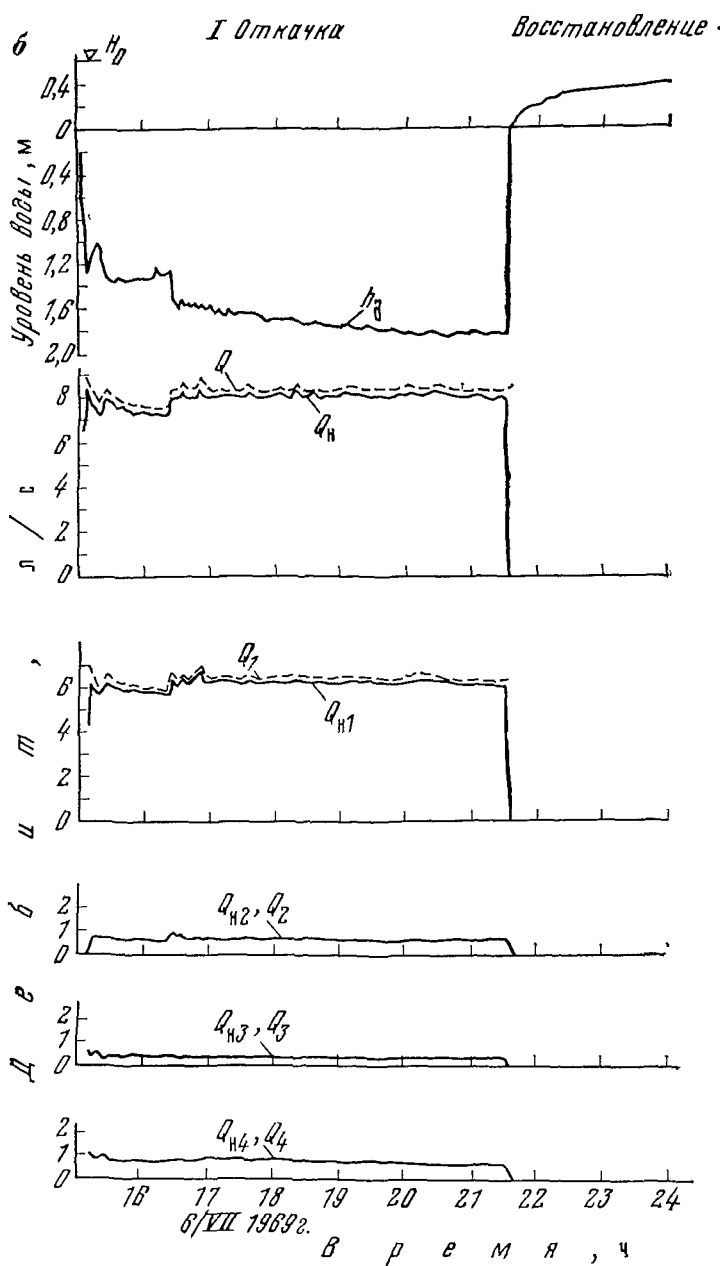


Рис. 39. Продолжение

II Откачка

Восстановление

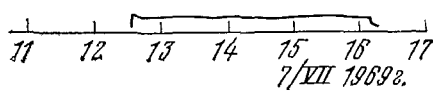
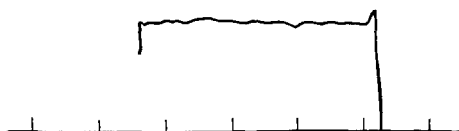
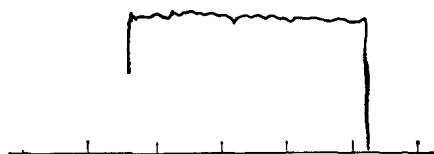
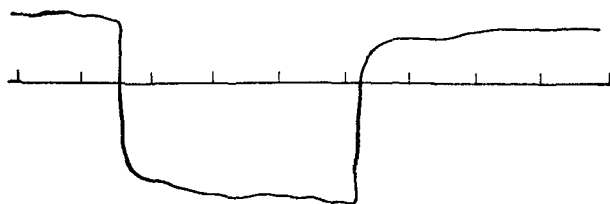




Таблица 10

Номер воз- бужде- ния	Вид возбуде- ния	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут									
		КМ		(km) <sub>1</sub>		(km) <sub>2</sub>		(km) <sub>3</sub>		(km) <sub>4</sub>	
		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
I	Откачка	506	506	388,9	388,9	44,3	44,3	25,3	25,3	47,4	47,4
II	Восстановле- ние	960,8	543	754,2	426,2	85,1	48,1	36,5	20,6	85,1	48,1
III	Откачка	700	431,2	625	341,4	63,2	34,5	39,5	21,6	61,9	33,8
IV	Восстановле- ние	1054	558	834,5	441,8	84,3	44,6	52,7	27,9	82,6	43,7
	Среднее арифметиче- ское значение	822,8	509,6	650,8	399,6	69,2	42,9	38,5	23,8	69,3	43,3

Примечания: 1—без учета предшествующего режима; 2—с учетом предшествующего режима.

скважины и водоносных зон без учета и с учетом предшествующих режимов работы скважины показывают:

1) поправки за предшествующий режим достигают значительных величин. Поэтому при выполнении исследований при различных последовательно сменяемых режимах работы скважины их учет обязателен;

2) водопроницаемость всего разреза скважины и зон, подсчитанная для различных режимов возбуждения скважины, достаточно хорошо согласуется со средним значением этого параметра и с его значением для первого возбуждения.

По материалам расходомерии 1965 г. дана оценка водопроницаемости всего разреза скважины, водоносных зон I, II и в сумме III и IV зон. В табл. 11 сопоставлены значения водопроницаемости, полученные при исследованиях скважины в 1965 и 1969 гг.

Таблица 11

Режим исследования	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут				Расчетные формулы
	КМ	(km) <sub>1</sub>	(km) <sub>2</sub>	(km) <sub>3—4</sub>	
Неустановившийся	509,6	399,6	42,9	67,1	(V.4) с учетом (II.116)
Установившийся	495,7	399,0	44,6	52,1	(V.32) с учетом (V.29)

## 7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РЕАГИРУЮЩИХ СКАЖИН НА ОСНОВЕ ГЛУБИННОЙ РАСХОДОМЕТРИИ

Экспериментальные исследования методики расходомерии реагирующих скважин обсуждаются на примере скв. 41 и 39, использованных для анализа экспериментальных исследований методики расходомерии одиночных скважин. Выбор одних и тех

же скважин для анализа результатов эксперимента в различных модификациях расходомерии имеет принципиальное значение. Эти исследования были проведены в близкие сроки и могли быть сопоставимы.

Гидрогеологический разрез опытного участка относится к сложным. Водоносность связана с трещиноватыми зонами в области гипергенеза метаморфических пород: песчаников, алевролитов, аргиллитов. По этому признаку разрез взаимодействующих скважин отнесен ко второй модели (см. рис. 31).

Следует отметить, что приводимые ниже экспериментальные исследования проведены раньше, чем были разработаны принципы интерпретации полученных данных. Поэтому некоторые требования к режиму исследования и качеству исходных данных оказались неучтенными. Так, по производственно-техническим условиям в примерах 1 и 2 расходометрические измерения в реагирующих скважинах проведены по одному разу на каждой ступени понижения, что отвечает методике работ при установившемся режиме, однако стабилизация фактически не была достигнута. Причем измерения на различных ступенях соответствовали различной продолжительности возбуждения. Поэтому попытка обработки полученных данных по формулам (V.74) и (V.75) оказалась неудачной.

При проведении эксперимента, описанного в примере 3, получены временные функции понижения и дебитов, однако по производственно-техническим условиям лишь при одной ступени возбуждения, что также исключило возможность обработки данных на основе решения уравнения (V.47).

Рассматриваемые ниже результаты отвечают методике комбинированного исследования скважины. Это хотя и не дает полного представления о возможностях методики расходомерии реагирующих скважин, тем не менее является достаточным для подтверждения принципиальных положений методики исследования взаимодействующих скважин в неоднородной среде и описания такого взаимодействия в виде уравнения (II.159), а также для оценки параметров водоносных пластов на основе выделения функции  $\xi_j = f(\Delta Q_{пj})$ , что принципиально важно.

Пример 1. В этом эксперименте в качестве возмущающей использована скв. 41, а в качестве реагирующей — скв. 39. Наблюдения на каждой ступени возбуждения соответствовали начальному периоду квазистационарного режима. На стадии реагирования в скв. 39 получены три расходограммы соответственно для трех ступеней откачки из скв. 41. Материалы исследования приведены на рис. 40. Приемом, описанным в разделе 4, для каждой водоносной зоны определены срезки уровней, соответствующие различным ступеням возбуждения. Для расчета параметров использованы данные, отвечающие максимальному возбуждению. Расчет выполнен на основе формулы (V.81). Значение коэффициента  $f$  принято равным 0,5, как и в случае исследования по методу расходомерии одиночных скважин. Полученные значения

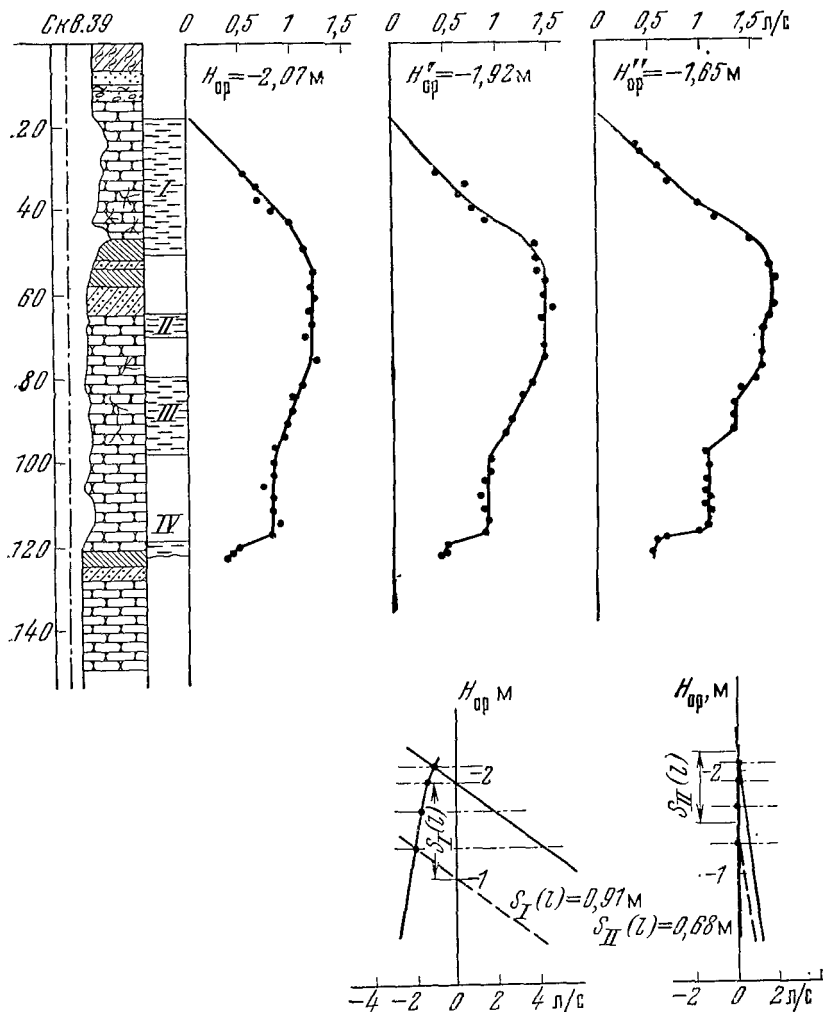
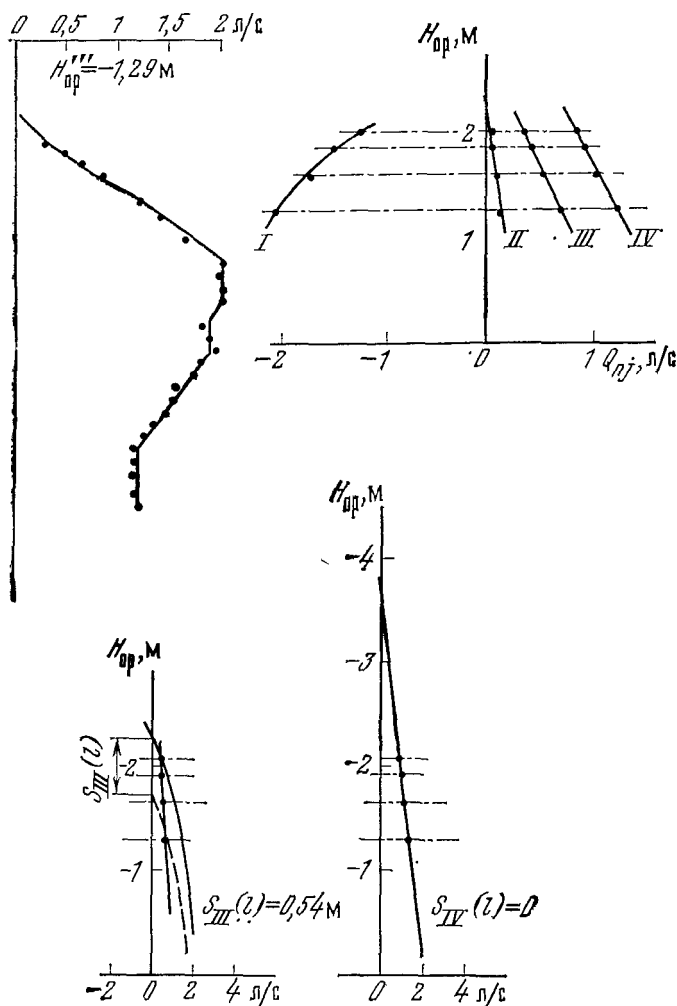


Рис. 40. Результаты экспериментальных исследований скв. 39 по методике в установившемся режиме.

Условные обозначения см. на рис. 33

водопроницаемости приведены в табл. 12 и сопоставлены с соответствующими значениями, установленными при условии исследования этой скважины как одиночной. Как видно, расхождения в оценках параметров по водоносным зонам и по разрезу незначительны. Повторяется также тенденция изменения водопроницаемости в вертикальном разрезе.

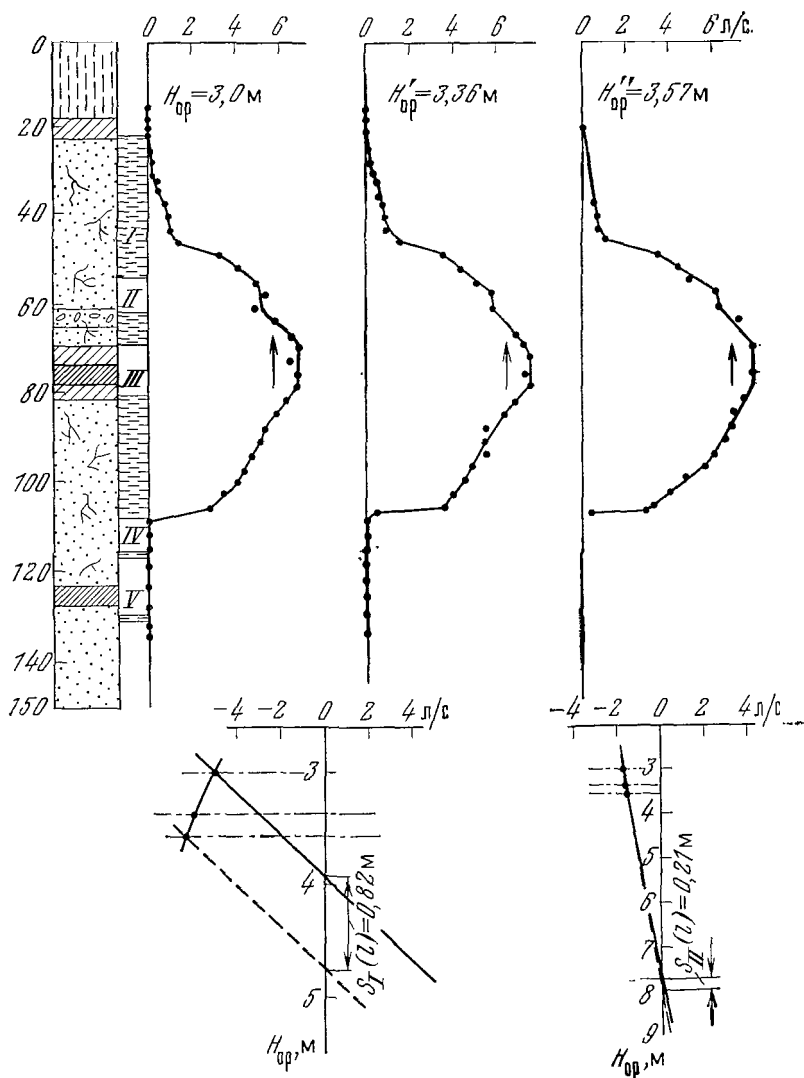
Дополнительно проведена оценка суммарной водопроницаемости разреза по формуле Дюпюи для одной наблюдательной



расходомерии реагирующей скважины при комбинированном возбуждении

скважины (скв. 39) . Она оказалась равной  $3200 м^2/сут$ . Причина такого резкого расхождения объясняется отсутствием стабилизированного режима. В то же время достаточно близкое соответствие оценок водопроводимости по методике комбинированного и одиночного исследования может быть объяснено тем, что режим взаимного возбуждения пластов на стадии реагирования описы-

Потери напора в возмущающей скв. 41 не учитывались.



вается интегралом Дюамеля, что обеспечивает в каждый данный момент времени условия, близкие к  $\Delta Q_{пз}/\zeta_j \rightarrow \text{const}$  при небольших депрессиях напора, какие в данном случае имеют место. Это положение подтверждается также теоретически совпадением уравнений (II.137) и (II.168). Дополнительно следует учитывать, что водоносные зоны находятся в единой гидравлически связанной толще трещиноватых пород.

Пример 2. В этом эксперименте в качестве возмущающей использована скв. 39, а реагирующей служила скв. 41. Исследования

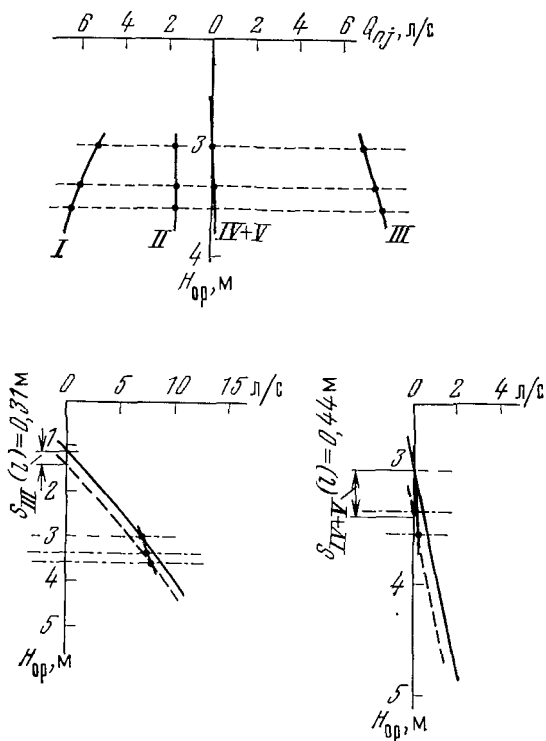


Рис. 41. Результаты экспериментальных исследований скв. 38 по методике расходомерии реагирующей скважины при комбинированном возбуждении в установившемся режиме. Условные обозначения см. на рис. 34

выполнены аналогично описанным в примере 1. На стадии реагирования в скв. 41 получены две расходограммы при двух ступенях возбуждения скв. 39. Материалы исследования приведены на рис. 41. Для максимальной ступени возбуждения определены срезыки уровней по каждой водоносной зоне. По формуле (V.81) при  $f=0,5$  рассчитаны оценки значений водопроводимостей. Они приведены в табл. 13, где сопоставлены с соответствующими оценками, полученными при исследовании этой же скважины как одиночной. Как видно, расхождения в оценках параметров по водоносным зонам и по разрезу незначительны. Повторилась также тенденция изменения водопроводимости в разрезе скважины. Дополнительно выполнена оценка суммар-

Таблица 12

Водоносные зоны	Водопроводимость по методике расходомерии комбинированного исследования скважин		Водопроводимость по методике расходомерии одиночных скважин	
	1	2	1	2
I	1122	1220	1168	1380
II	176	196	116	141
III	245	261	241	276
IV	91	93	77	94
Всего	1634	1770	1602	1891

Примечания: 1 — без учета гидравлических потерь напора; 2 — с учетом гидравлических потерь напора.

Таблица 13

Водоносные зоны	Водопроницаемость по методике рас- ходомерной комбинированной исследования скважин		Водопроницаемость по методике рас- ходомерной одиночных скважин	
	1.	2	1	2
I	790	823	976	1173
II	69	73	80	100
III	569	740	457	642
IV+V	190	209	165	234
Всего	1618	1845	1678	2149

Примечания: 1 — без учета гидравлических потерь; 2 — с учетом гидравлических потерь.

ной водопроницаемости разреза по формуле Дюпюи для одной наблюдательной скважины без учета потерь напора в возмущающей. Она оказалась равной  $2540 \text{ м}^3/\text{сут.}$  Причина некоторого завышения аналогична той, что отмечена в примере 1. Однако следует обратить внимание на следующий факт. Исследования в скв. 39 при откачке из скв. 41 начинались спустя 1—2 ч после пуска, а в скв. 41 при возбуждении скв. 39 — через 10—12 ч после пуска, когда темп изменения уровней уже существенно падал. Это и предопределило различия в расхождении оценок суммарной водопроницаемости разреза, определенных по формуле Дюпюи для одной наблюдательной скважины и по методике комбинированного исследования скважины. В связи с этим отметим, что при проведении откачки из скв. 46-Ц (см. пример 3) получен график прослеживания уровня в скв. 41. Оценка суммарной водопроницаемости разреза по способу Джекоба оказалась равной  $2190 \text{ м}^3/\text{сут.}$ , что ближе совпадает с данными табл. 13.

Пример 3. В этом эксперименте в качестве возмущающей использована скв. 46-Ц, а реагирующей служила скв. 41. Сква. 46-Ц является центральной в опытном кусте. Работы были совмещены с проведением опытной откачки при одной ступени понижения. Откачка производилась насосом АТН-14 с производительностью  $125 \text{ л/с}$ . На стадии реагирования в скв. 41 с помощью глубинного расходомера измерялся во времени осевой расход потока на глубине 59, 79 и 112 м. Это позволило по разности показаний определить дебиты водоносных зон, расположенных в интервалах 21—59, 59—79, 79—112 и 112—150 м. Первый и последний интервалы отвечают глубине башмака обсадных труб и забою скважины соответственно. Измерения расходов на указанных глубинах в начальный период реагирования проводились через 5—10 мин, к концу эксперимента — через 0,5—2 ч. В процессе работ получен также график снижения уровня в реагирующей скважине. Фактические данные исследования и результаты их обработки показаны на рис. 42. Вместе с данными исследования скв. 41 как одиноч-

ной (см. рис. 32) полученные материалы эксперимента соответствуют методике комбинированного исследования при неустановившемся режиме.

При обработке данных определены функции  $S_j(l, t)$ . Для этого использованы индикаторные диаграммы по выделенным зонам, полученные в результате исследования скв. 41 как одиночной. Функции  $S_j(l, t)$  получены приемом, описанным в разделе 5. На основании условия (II.142) определены функции  $\xi_j(\rho_0, t)$ , которые вместе с функциями  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, t)$  использованы для расчета  $\xi_j^*(\rho_0, t)$ .

Обращает на себя внимание следующее обстоятельство, отмеченное также в предыдущих примерах. Гидродинамический режим скв. 41 по виду функций  $S(l, t)$  и  $S_j(l, t)$  характеризуется как неустановившийся. В то же время функции  $\xi^*(\rho_0, t)$  довольно быстро после начала реагирования приобретают такой небольшой темп изменения, что могут быть приняты стабильными. При этом, как видно, функции  $\xi_j(\rho_0, t)$  и  $\Delta Q_{пj}(\rho_0, t)$  во времени изменяются достаточно заметно. Наблюдаемое явление может быть, видимо, объяснено тем, что изучаемый процесс взаимодействия водоносных зон является вторичным по отношению к общему процессу снижения давления во всем водоносном комплексе и направлен на уравнивание давлений в зонах. Наличие достаточно тесной гидравлической связи между водоносными зонами приводит к тому, что скорость уравнивания или, иначе говоря, инерционность системы оказывается небольшой.

Расчет водопроводимости выделенных водоносных зон на основании формул (V.81) и (II.168) дает значения, приведенные в табл. 14.

Таблица 14

Водоносные зоны	Водопроводимость по методике расходомерии скважин при комбинированном исследовании, м <sup>2</sup> /сут					
	По формуле (V.81)		По формуле (II.168)		Средняя	
	1	2	1	2	1	2
I	910	947	1130	1180	1020	1063
II	64	68	162	172	113	120
III	523	680	527	685	525	682
IV	174	190	11	12	92	101
Всего	1671	1885	1830	2049	1750	1966

Примечания: 1 — без учета гидравлических потерь; 2 — с учетом гидравлических потерь.

Оценка водопроводимости по графику прослеживания уровня в скв. 41 при откачке из скв. 46-Ц, полученная по способу Джеккоба, равна 2190 м<sup>2</sup>/сут.



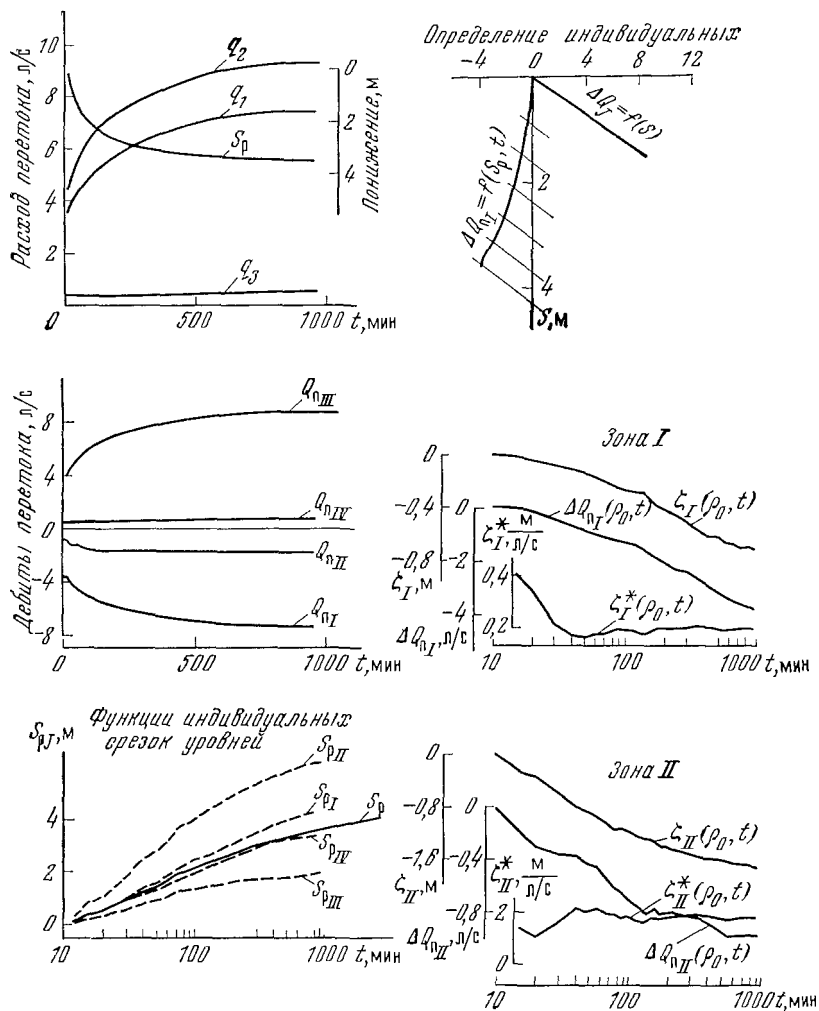


Рис 42 Результаты экспериментальных исследований скв 41 по методике в неуставившемся режиме

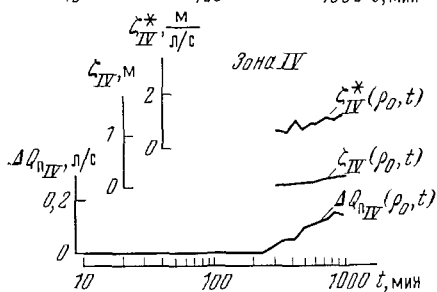
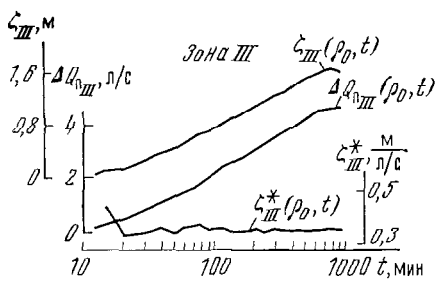
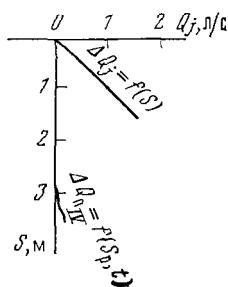
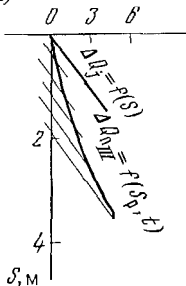
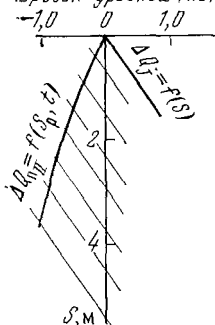
1 — суглинки 2 — алевролиты, 3 — галечники, 4 — аргиллиты 5 — песчаники 6 — конгло-

Значительные расхождения оценок по некоторым зонам, полученные с использованием различных формул, связаны, видимо, с погрешностями измерения и графоаналитической обработки данных.

## 8. ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ

В приведенных примерах экспериментальных исследований, выполненных для обоснования методики интерпретации и досто-

Эрезок уровней (понижений)



расходомерии реагирующей скважины при комбинированном возбуждении

мераты

верности данных расходомерии, использованы различные объективные данные, полученные с помощью других приемов исследования гидрогеологических скважин, правомерность которых в настоящее время является общепризнанной. Поскольку приведенные и другие примеры, которые здесь не приводятся, получены в процессе производственных разведочных работ, не предусматривавших специального обоснования расходометрического метода, они имеют неравнозначный набор критериев истины.

Проведено большое число исследований, посвященных вопросам соответствия параметров, полученных по результатам опро-

бования одиночных скважин и кустов скважин. Выводы, как правило, свидетельствуют о недостаточной достоверности параметров по одиночным скважинам. При этом для расчета и анализа использованы фактические дебиты и понижения, т. е. гидравлические особенности одиночных скважин не учтены, либо оценка потерь выполнена весьма приближенно. Поэтому критические замечания по поводу результатов оценки параметров по одиночным скважинам вполне справедливы. После накопления материалов опробования и внедрения расходометрического метода с выполнением всех методических требований к его производству и интерпретации, очевидно, окажется возможным повысить достоверность оценки параметров по данным исследования одиночных скважин. До такой ревизии расходометрические данные в производственном плане следует считать пригодными прежде всего для относительной оценки изменчивости фильтрационных свойств пород в вертикальном разрезе и в плане. При этом возможность такой переоценки в значительной мере определится уровнем дальнейшего совершенствования инструментальных способов измерения гидравлических потерь в скважине и математического аппарата учета их в расчетных формулах.

По результатам массовых расходометрических исследований одиночных скважин в Кузбассе в период внедрения метода в производство сопоставлены удельные дебиты и статические уровни, полученные по данным расходометрии и зональным пробным откачкам. Эти параметры в обоих случаях вычислялись по фактическим значениям дебитов и понижений. Результаты сопоставления приведены на рис. 43. Из рассмотрения гистограммы распределения расхождений удельных дебитов (гистограмма I, Б) следует, что расхождение значений в области вероятностей 0,75 имеет симметричный характер с отклонениями  $\pm 60\%$ . Гистограмма распределения расхождений статических уровней (гистограмма I, А) имеет более сложную форму. Следует пояснить, что на характер гистограмм распределения могли влиять такие неучтенные факторы, как:

а) разновременность проведения работ и связанные с этим сезонные изменения уровней, различное техническое состояние скважин;

б) кратковременность проведения пробных зональных откачек и восстановления уровня, что отразилось на достоверности значений статических уровней и величине использованного в расчете понижения;

в) несовершенство по степени вскрытия части опробованных интервалов разреза при зональных пробных откачках из скважин.

Из рассмотрения гистограммы распределения расхождений тех же параметров для всего разреза, полученных по данным опытных откачек на конечном забое скважины, и данным расходометрии, проведенной в тех же условиях (гистограммы II, А, II, Б), видно, что:

а) удельные дебиты имеют максимальное расхождение не более  $\pm 10\%$ ;

б) статические уровни различаются не более чем на 0,3 м при диапазоне их изменения для различных интервалов разреза до 6 м.

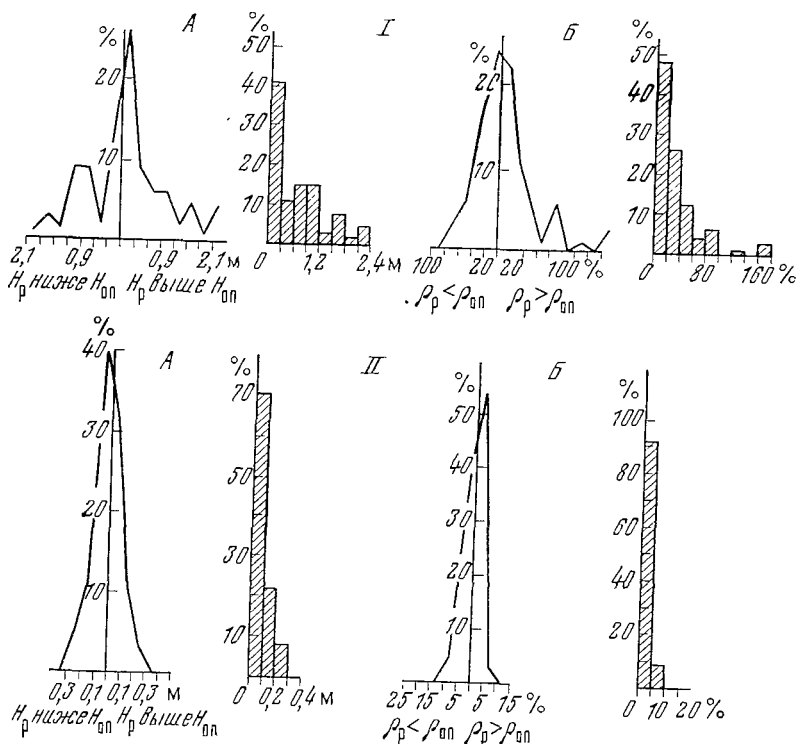


Рис. 43. Результаты сопоставления данных расходомерии и откачек.

I — по интервалам опробования в процессе бурения скважины (число сопоставлений 69); II — по интервалам опытных откачек (число сопоставлений 37); А — графики распределения  $\Delta H$ ; Б — графики распределения  $\Delta \rho$ . Индекс оп соответствует опорным данным, индекс р — расчетным

Таким образом, анализ этих данных позволяет сделать вывод о достоверности оценки удельного дебита водоносных зон по данным расходомерии в пределах точности измерения исходных показателей: дебитов и уровня. Этот вывод послужил основанием для массового внедрения метода расходомерии при разведке подземных вод в трещиноватых и трещинно-карстовых породах и исключения из методики гидрогеологических работ традиционных (поинтервальных) откачек из скважин. Такие опытно-производственные работы впервые проведены нами в 1964 г. в Кузбассе. В дальнейшем подобные методические изменения были осуществлены при разведке подземных вод во многих районах страны.

## ВЫВОДЫ

1. Интерпретация данных расходомеррии одиночных возмущающих скважин в общем случае возбуждения с переменным дебитом и понижением основана на представлении этих экспериментальных функций системой линейных уравнений для дискретных моментов времени. В результате вычисляется функция приведенного понижения при постоянном дебите пласта, равном единице, описываемая уравнением Тейса.

2. Методика интерпретации данных расходомеррии в условиях установившегося режима основана на анализе индикаторных кривых. Оценка водопроводимости совместно исследуемых пластов производится по уравнению Дюпюи при использовании начальной части индикаторной кривой, где  $r_t \rightarrow r_0$ .

3. Интерпретация данных расходомеррии реагирующих скважин возможна при наличии двух циклов возбуждения. В результате их совместного рассмотрения выделяется функция наложенной депрессии от взаимодействия пластов в реагирующей скважине.

4. Достоверность расходометрического каротажа обосновывается:

а) общностью основных закономерностей фильтрации подземных вод при традиционных опытно-фильтрационных работах и расходомеррии;

б) соответствием методических приемов гидродинамических исследований по методу расходомеррии традиционным гидрогеологическим опытно-фильтрационным работам;

в) соответствием точности измерения функций понижения и дебитов при расходомеррии, фактически достигнутой в практических гидрогеологических работах;

г) удовлетворительной сходимостью параметров геофильтрации по расходомеррии с результатами натурных опытно-фильтрационных работ в специальных экспериментальных сопоставительных исследованиях. Учитывая недостаточный объем накопленных результатов сопоставительных исследований по рядовым работам, достоверность данных расходомеррии может считаться доказанной для относительной дифференциации неоднородных водоносных горизонтов по величине проводимости.

## ГЛАВА VI

### ТЕХНИКА РАСХОДОМЕТРИИ СКВАЖИН

#### 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ РАСХОДА ЖИДКОСТИ ПО СТВОЛУ СКВАЖИНЫ

В настоящее время известно большое количество разработок приборов и способов измерения расхода жидкости, движущейся по стволу скважины. По принципу действия их можно разделить на четыре основных типа.

1. Инжекционные приборы, использующие перемещение «меченой» жидкости со скоростью, равной скорости потока.

2. Приборы обтекания, использующие связь между скоростным напором потока и механическим перемещением воспринимающего этот напор чувствительного элемента.

3. Турбинные приборы, использующие связанный со скоростью потока крутящий момент воспринимающего элемента, выполненного обычно в виде крыльчатки разной конструкции.

4. Термоэлектрические приборы, использующие зависимость между интенсивностью теплоотдачи нагретого тела и скоростью омывающего его потока.

Все разработанные конструкции скважинных измерителей расхода потока принципиально состоят из следующих основных элементов:

- воспринимающего (чувствительного) элемента, реагирующего на движущийся поток жидкости изменением своего состояния;
- преобразователя реакции воспринимающего элемента в регистрируемые сигналы;
- измерителя (регистратора), фиксирующего связанные со скоростью потока величины.

Воспринимающий элемент и преобразователь обычно конструктивно оформлены в одно целое, называемое датчиком. Датчик является основным конструктивным элементом скважинного прибора расхода.

В ряде конструкций для учета размеров потока и одновременного получения сведений об общем расходе жидкости по стволу скважины предусмотрены различного типа пакерующие устройства. При использовании приборов без пакерующего устройства размеры сечения потока учитываются путем измерения диаметра ствола скважины каверномером и введения соответствующих поправок в показания датчика.

Измерительная часть расходомеров может быть предназначена либо для местной регистрации показаний и тогда она осуществляется непосредственно в скважинном снаряде, либо для дистанционной регистрации, выполняемой на поверхности соответствующими приборами. Для приборов с местной регистрацией характерно использование магнито-механических способов преобразования скоро-

сти потока в линейные перемещения пишущего инструмента на бланке, соединенном с часовым механизмом. Дистанционные измерения осуществляются на основе преобразования скорости потока в электрические показатели и передачи их по проводной линии связи на регистратор.

В зависимости от типа и принципа действия датчика, а также конструкции пакерующего устройства скважинный прибор может быть рассчитан либо на измерение только восходящих потоков и тогда он называется дебитомером, либо только нисходящих потоков и тогда называется расходомером. Если прибор равно восприимчив и к восходящему и к нисходящему потоку, он называется дебитомером — расходомером или наоборот. Использование слов «дебит» или «расход» в названии приборов в известной мере условно определяет его назначение. В действительности имеется в виду только измерение объемного расхода осевого потока (восходящего или нисходящего) по стволу скважины.

При анализе данных расходомерии гидрогеологических скважин под термином «дебит» принято понимать количество воды, поступающей в скважину из различных интервалов разреза или уходящей в различные части разреза из скважины. Эти показатели устанавливаются на стадии обработки данных измерения. Поэтому рассматриваемый метод исследования скважин носит название метода расходомерии, отражая тем самым первооснову его данных.

В работах [93, 95] рассматриваются основные типы расходомеров и дебитомеров, применяемые в нефтепромысловой практике для исследования нефтяных и нагнетательных скважин. Это в основном приборы с местной и дистанционной регистрацией, использующие различные пакерующие устройства. Ряд приборов и способов измерения расхода, пригодных или специально разработанных для исследования гидрогеологических скважин, не получил в этих работах отражения.

## **2. УСЛОВИЯ РАБОТЫ СКВАЖИННЫХ РАСХОДОМЕРОВ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Исследования в области создания приборов и измерительных устройств для измерения расхода движущейся по скважине жидкости начали проводить в основном в 50-х годах. При этом были заимствованы отдельные технические решения, известные в обла-

---

При заданном гидродинамическом режиме возбуждения скважины могут одновременно наблюдаться водоприток и водопоглощения соответственно в различных интервалах разреза. Использование различных терминов для характеристики по существу одного и того же гидродинамического явления, но с различными знаками неудобно.

Приборы, имеющие пакерующие устройства, могут быть применены и без них, но в этом случае, как правило, резко снижается чувствительность приборов.

сти разработки расходомеров общетехнического назначения. Однако в целом работа расходомеров в скважинных условиях является очень специфичной. Эта специфика определяется многими факторами.

1. Расходометрические исследования в процессе гидрогеологических работ проводятся в скважинах различного целевого назначения: поисковых, разведочных, наблюдательных, эксплуатационных и т. п. В связи с этим скважины проходят с различным диаметром. Во многих случаях скважины имеют телескопическую конструкцию. Кроме того, горизонтальные сечения скважины могут значительно отличаться по размерам и форме от заданных буровым инструментом, что связано как с состоянием пород, так и с вибрацией бурового инструмента. Наиболее вероятные изменения диаметров скважин при ведении работ не только в пределах одного месторождения, но и одной скважины могут охватывать диапазон от 100 до 300 мм.

Таким образом, по условиям измерения расхода в скважинах измерительное устройство помещается в поток в общем случае переменного сечения. Исключение составляют случаи, также встречающиеся в практике гидрогеологических работ, когда по геологотехническим и другим причинам скважины оборудуются обсадной и фильтровой колоннами одного диаметра. Датчик расходомера, имея фиксированные размеры, реагирует только на часть потока жидкости. Поэтому возникает необходимость учета всего сечения потока расчетным путем или путем создания таких приспособлений, которые бы направляли этот поток через калиброванное сечение датчика. В технике скважинной расходомерии разработано несколько способов учета несоответствия размеров датчика размерам сечения скважины. Каждый из них имеет свои положительные и отрицательные качества.

При использовании расходомеров без пакера несоответствие размеров датчика размерам сечения потока для получения общего значения расхода потока по скважине учитывается путем введения поправки в измеренный расход через водоканал прибора. Величина поправки зависит от значения диаметра скважины на глубине измерения. Для этого расходометрические измерения дополняются измерениями диаметра ствола скважины с помощью калверномера. Значения поправок на диаметр скважины определяют по графикам или таблицам поправочных коэффициентов, которые получают экспериментально путем градуирования расходомера в трубах различного диаметра. Каждая конструкция расходомера имеет свои графики поправочных коэффициентов, которые являются паспортными характеристиками для приборов этого типа.

Необходимым условием использования такого способа учета размеров сечения ствола скважины является идентичность положения расходомера относительно оси эпилоры вектора скорости потока. Известно, что эпилора вектора скорости потока в вертикальном сечении скважины имеет вид кривой параболического типа с вершиной на оси. Поэтому если расходомер занимает произвольное



положение относительно ее оси, он будет фиксировать различную скорость потока. Расчеты и эксперименты показывают, что относительная погрешность в измерении расхода в зависимости от эксцентричного положения расходомера в скважине может достигать 60%. Погрешность будет тем больше, чем больше отношение диаметра скважины к диаметру прибора (см. раздел 2 главы VI). Поэтому с целью уменьшения влияния эксцентриситета скважинный снаряд снабжается центратором, фиксирующим его положение на оси скважины.

В расходомерах, разрабатываемых в основном для исследования нефтепромысловых скважин, широко используются различные конструкции пакерующих устройств. Они позволяют перекрывать часть потока, проходящего в зазоре между расходомером и стенкой скважины, и тем самым направлять весь поток через калиброванное сечение датчика. Принципиально пакерующие устройства делятся на три типа: дисковые (манжетные), зонтичные и абсолютные. В первом случае на корпус скважинного прибора крепятся резиновые диски различного размера в зависимости от диаметра скважины. Эти диски, принимая форму горизонтального сечения скважины, создают преграду потоку и направляют его через измерительный водоканал датчика.

Пакеры зонтичного типа представляют собой более сложные устройства. Они приводятся в действие дистанционным способом с помощью специальных электромеханических приспособлений. Эти пакеры обычно состоят из семейства металлических лепестков, образующих при работе пакера лепестковый «зонтик», который также выполняет роль преграды для потока, идущего в зазор.

Абсолютный пакер представляет собой эластичную камеру, которая раздувается с помощью насоса по команде с поверхности и изолирует приборное пространство.

По степени надежности перекрытия потока в зазоре между корпусом скважинного прибора и стенкой скважины пакерующие устройства следует, видимо, распределить в перечисленном выше порядке. В общем случае их применение наиболее надежно в обсаженных скважинах. В необсаженных скважинах с кавернозными стенками дисковые и зонтичные пакеры часто не могут обеспечить эффективного перекрытия зазора по своим конструктивным особенностям, а абсолютные пакеры оказываются недолговечными. При больших расходах потока по скважине возможность пакерования ствола с удержанием расходомера на заданной глубине иногда затруднена, что связано со скоростным напором потока и большими гидравлическими потерями на приборе. Однако в благоприятных условиях использование в конструкции расходомера пакерующего устройства для учета несоответствия диаметров прибора и скважины оправдано.

В разработках скважинных расходомеров известен также компенсационный способ, при котором с помощью специального глубинного насоса весь поток в данном сечении скважины принудительно направляется через калиброванное сечение водоканала

скважинного прибора [93, 94, 95]. Роль датчика одновременно выполняет этот же насос, имеющий регулируемую производительность. Расходомеры такого типа не получили пока распространения по ряду технических причин.

2. Большая часть датчиков расхода реагирует на изменение линейной скорости потока. Увеличение диаметра скважины ведет, как известно, к уменьшению линейной скорости потока при той же величине объемного расхода. В связи с этим стоит вопрос о подборе такого типа воспринимающего элемента, который обеспечивал бы фиксацию линейных скоростей во всем подлежащем измерению диапазоне расходов в стволе скважины с переменным сечением. В практике исследования гидрогеологических скважин приходится встречаться с расходами до 100 л/с. При этом следует учитывать, что характер расходограмм по скважине отражает постепенное возрастание расхода от нулевых его значений (или убывание до нулевых значений). Очевидно, что трудно найти универсальное решение способа измерения, обеспечивающее стабильную чувствительность во всем диапазоне и отвечающее требованиям к другим конструктивным особенностям скважинных расходомеров.

При измерениях расходов в нижней части диапазона применение пакерующих устройств обычно способствует сужению потока в области воспринимающего элемента расходомера и увеличению линейной скорости. В верхней части диапазона это нередко приводит к резкому увеличению нагрузки на датчик и большим гидравлическим потерям в месте установки прибора. Поэтому перед расходометрическим исследованием конкретной скважины приходится не только оценивать возможности имеющихся типов приборов, но и согласовывать с ними схему и режим опытно-фильтрационного испытания.

В связи с тем что расходометрические исследования в скважине в большинстве случаев проводятся для количественной оценки фильтрационных свойств пород, очевидно, что точность измерения расхода должна удовлетворять этой задаче. Однако твердых критериев относительно необходимой точности скважинных измерений расхода пока не установлено. Поэтому пока, видимо, можно ориентироваться на точность, которая достигается общепринятым объемным способом при измерении суммарного дебита скважины.

Из сравнения возможностей расходомеров с пакерующим устройством и без такового можно заключить, что первые, видимо, могут обеспечить более стабильные показатели точности и чувствительности, поскольку при этом учитывается только изменчивость величины расхода. При использовании расходомеров без пакера зависимость поправок на диаметр заведомо имеет нелинейную форму. Это вынуждает прибегать к более сложным приемам измерения.

3. Расходометрические измерения по условиям постановки исследования для оценки фильтрационных свойств пород осуществляются в период установившегося или неустойчивого режима

возбуждения скважины. Характер протекания этого процесса описывается уравнениями математической физики. Интерпретируемыми показателями анализируемого процесса являются: градиент давления на границе скважина — пласт и его реакция в виде количества поступающей в скважину (или из скважины) воды. Расходомер, внесенный в поток, выполняет роль диафрагмы, что приводит к гидравлическим потерям в интервале постановки прибора. Вносимые прибором изменения гидравлических характеристик потока передаются окружающей среде и приводят к возникновению по существу неконтролируемого гидродинамического процесса, накладываемого на изучаемый.

Величину гидравлических потерь на расходомере при конструировании стремятся свести к минимуму. В расходомерах, использующих пакерующие устройства, это оказывается более сложно. Гидравлические потери, возникающие при этом, будут тем больше, чем больше расход потока по скважине и чем больше ее диаметр отличается от диаметра проходного сечения прибора. В работе [93] приведены данные о гидравлических потерях, образующихся на распакованном приборе ГСД-1, помещенном в скважину диаметром 156 мм и расходом нефти 0,93 л/с. Гидравлические потери определены как сумма потерь по длине канала прибора и местных потерь. Она оказалась равной  $0,23 \cdot 10^5$  Па. Сумма местных потерь при этом составила  $0,17 \cdot 10^5$  Па, а сумма потерь по длине  $0,06 \cdot 10^5$  Па. Если учесть, что величина потерь пропорциональна квадрату расхода, то нетрудно заметить, что в условиях понижения уровня 1—20 м, какие обычно создаются при опытно-фильтрационных исследованиях гидрогеологических скважин, и расходах воды по стволу, часто намного превышающих величину, характерную для приведенного примера, колебания гидравлических потерь на приборе могут оказаться соизмеримыми с созданной депрессией при возбуждении скважины. Поэтому перед использованием того или иного типа расходомера необходимо проанализировать, насколько допустимо вносимое им искажение данного гидравлического режима, или сразу использовать приборы, обладающие наименьшим гидравлическим сопротивлением. К сожалению, в паспортных данных выпускаемых расходомеров отсутствуют их гидравлические характеристики.

4. Расходомерные измерения по условиям проведения исследования в большинстве случаев сопровождаются откачками или наливом, осуществляемые с помощью насосного или нагнетательного оборудования. Это накладывает определенные требования на габариты скважинных приборов, которые должны удовлетворять возможности их погружения в скважину в ходе ее опытно-фильтрационного испытания.

Так, для большинства случаев расходомерного исследования совместно с откачками желательно, чтобы диаметр скважинного прибора был не больше 50 мм. В ряде случаев даже такой диаметр оказывается велик и тогда расходомер погружают в скважину перед монтажом насосного оборудования. Но этот ва-

риант в общем не желателен. Технические возможности позволяют решить эту проблему. Однако необходимость и возможность уменьшения габаритов скважинных расходомеров противоречат другим важным характеристикам этих приборов. При беспакерном способе измерения расхода потока вследствие роста отношения диаметров резко возрастают значения поправок (зависимость близка к квадратичной), а вместе с этим и погрешности. При использовании пакерирующих устройств из-за уменьшения проходного сечения резко возрастают гидравлические потери, также по квадратичному закону.

При использовании наливов или исследовании фонтанирующих скважин требования к габаритам расходомеров могут быть снижены, так как в этом случае монтаж устья скважины для пропуска расходомера существенно упрощается.

5. Если скважина пересекает несколько водоносных пластов (или зон) с различными гидростатическими уровнями, то по ее стволу устанавливаются перетоки из пластов с более высоким уровнем в пласты с менее высоким. При этом могут наблюдаться восходящие или нисходящие перетоки, либо те и другие одновременно в разных интервалах. Даже при возбуждении скважины откачкой по ее стволу может наблюдаться поток в двух противоположных направлениях. Поэтому желательно, чтобы расходомер для гидродинамических исследований скважин позволял проводить двустороннее измерение расхода потока, а также автоматически или иным способом указывал направление потока жидкости по скважине.

6. Скважинные расходомеры работают в водных растворах различного химического состава и агрессивности. Поток по скважине несет также некоторое количество взвешенного абразивного материала. Это обуславливает необходимость изготовления деталей воспринимающего элемента и других частей скважинного прибора из износостойкого и антикоррозийного материала. Определенную роль, видимо, играют также переменные температурные условия в скважине. Однако этот вопрос пока мало исследован.

7. Расходомерические измерения предусматривают построение непрерывного графика расхода по глубине скважины (расходограммы) либо получение такого количества дискретных наблюдений, по которым этот график может быть построен с достаточной детальностью. В процессе измерения расхода по стволу скважины иногда возникает необходимость дополнительной детализации отдельных интервалов или повторного измерения, связанного с ходом расходограммы или режимом опытно-фильтрационного испытания. Поэтому скважинные расходомеры для гидродинамических исследований должны обеспечивать возможность проведения многократных перемещений и измерений расхода потока жидкости по стволу при одном спуске прибора в скважину. По этим соображениям более предпочтительны расходомеры с дистанционной регистрацией.

8. Расходомерия возникла и развивалась как метод ускоренного исследования гидрогеологических скважин в неоднородных гидрогеологических разрезах. Благодаря ему стало возможным сокращение затрат времени на испытание скважин и пластов. В связи с этим имеет значение вопрос о производительности собственно расходомерических измерений. Расходомеры с абсолютным паке-ром, а также с местной регистрацией, видимо, наименее удобны.

Таким образом, по целевому назначению и условиям работы скважинные расходомеры должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- диапазон измерения должен охватывать значения расхода потока воды по скважине;

- точность измерения потока воды по стволу скважины должна быть сопоставима с точностью объемного метода измерения этой величины;

- порог чувствительности воспринимающего элемента и регистратора должен обеспечивать фиксацию минимальных расходов, представляющих практический интерес;

- гидравлическое сопротивление, создаваемое скважинным прибором, не должно вносить заметных искажений в заданный гидравлический режим опытно-фильтрационного исследования скважины;

- габариты скважинного прибора должны удовлетворять условию использования его одновременно с проведением других операций в скважине (откачка, налив);

- аппаратура расходомерических измерений должна обеспечивать возможность двусторонней регистрации расхода потока и его направления по скважине;

- метрологические характеристики расходомерической аппаратуры при работе в восходящем и нисходящем потоке должны быть идентичны;

- аппаратура расходомерических измерений должна обеспечивать возможность проведения многократных измерений расхода потока при одном спуске прибора в скважину;

- производительность измерений должна соответствовать допустимой длительности работ, регламентируемой целевым назначением расходомерического исследования и характером развития наблюдаемого гидродинамического процесса при опытно-фильтрационных исследованиях скважин.

Природная и технологическая обстановка проведения работ столь многообразна, что, видимо, нельзя рассчитывать на полное выполнение всех указанных требований в одной конструкции и вряд ли такое стремление следует считать целесообразным. Именно по этой причине в приведенном перечне требований не дано никаких количественных ограничений.

Сравнительный анализ метрологических и технологических характеристик различных типов измерителей расхода в буровых скважинах, проведенный с точки зрения соответствия сформулированным требованиям к приборам для гидродинамических исследо-

ваний в различных модификациях расходомерии, свидетельствует в пользу приборов тахометрического типа со свободно вращающейся турбинкой без пакерующих устройств. Это не исключает, разумеется, возможности поиска иных принципиальных и конструктивных решений. На данном этапе сделанный выбор вполне соответствует существующей тенденции в разработках приборов для гидрогеологических скважин.

С 1966 г. приборы указанного типа (ТСР-34/70) выпускаются малыми сериями специализированными мастерскими Уральского территориального геологического управления. Выпуск этих приборов способствовал массовому применению метода расходомерии при гидрогеологических исследованиях. За время эксплуатации приборов в различных природных и технологических условиях в целом была подтверждена правильность принятого направления, что нашло отражение в отраслевом стандарте 41-78—73, зафиксировавшем основные параметры приборов ТСР-34/70 в качестве базовых при разработке новых образцов расходомерической техники. Одновременно были выявлены как преимущества, так и недостатки выпускаемой аппаратуры. С позиции современного уровня развития теории и методики расходомерии и соответствующих требований к метрологии измерителей расхода в скважине эта аппаратура может рассматриваться как морально устаревшая. Основными недостатками аппаратуры ТСР-34/70, выявленными в процессе эксплуатации, можно считать: 1) нестабильность работы измерительного тракта в условиях изменяющихся параметров потока (температура, минерализация, взвешенные минеральные частицы и т. п.); 2) нетождественность метрологических характеристик в восходящем и нисходящем потоке; 3) отсутствие автоматической индикации направления потока по скважине; 4) низкий температурный диапазон работоспособности датчика (не более 60° С); 5) повышенное по сравнению с возможным гидравлическое сопротивление скважинного прибора; 6) ограниченный ряд типоразмеров скважинных приборов; 7) отсутствие научно обоснованной разработки метрологии и режимов измерения для всего диапазона расходов воды по скважине, удовлетворяющей требованиям методики расходомерии в различных модификациях.

На основе новой разработки расходомерической техники, учитывающей необходимость устранения указанных недостатков, создан электрический тахометрический скважинный расходомер РЭТС-2 для гидродинамических исследований в гидрогеологических скважинах. Научно-исследовательские и опытные разработки осуществлены совместно ВСЕГИНГЕО и Опытно-методической геофизической партией Уральского ТГУ. Промышленное освоение нового прибора запланировано на 1980 г. Основные технические данные прибора РЭТС-2.

Число скважинных приборов в комплекте (шт.) . . . . .	4
Диаметры скважинных приборов (мм) . . . . .	36, 56, 70, 110
Пределы измерения расхода потока через водоканал прибора, м <sup>3</sup> /с (л/с)	

для прибора ПС-36 . . . . .	от $10^{-5}$ до $10^{-3}$ (от 0,01 до 1,0)
» » ПС 56 . . . . .	от $10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ (от 0,01 до 2,5)
» » ПС-70 . . . . .	от $10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ (от 0,01 до 2,5)
» » ПС-110 . . . . .	от $5 \cdot 10^{-5}$ до $2,5 \cdot 10^{-3}$ (от 0,05 до 2,5)
Порог чувствительности по расходу, м <sup>3</sup> /с (л/с) для приборов ПС-36, ПС 56, ПС-70 . . . . .	$10^{-5}$ (0,01)
» » ПС-110 . . . . .	$5 \cdot 10^{-5}$ (0,05)

Относительная погрешность измерения расхода соответствует

$$\frac{0,001 + 0,025q \text{ [л/с]}}{q \text{ [л/с]}} 100 \text{ \%}.$$

Дополнительная погрешность при изменении степени минерализации воды до 30 г/л хлористого натрия . . . . .	не более $\pm 2,5\%$
Допустимая минерализация воды . . . . .	30 г/л
Диапазон рабочих температур:	
измерительного пульта . . . . .	от $-10$ до $+40^\circ\text{C}$
скважинных приборов . . . . .	от $+3$ до $+80^\circ\text{C}$
Допустимая относительная влажность воздуха	до $80\%$
Максимальное гидростатическое давление на скважинных приборах . . . . .	20 Мпа
Индикация направления потока — автоматическая	
Неидентичность градуировочных графиков при различных направлениях потока . . . . .	не более 2 отн. $\%$
Неидентичность графиков поправочных коэффициентов за диаметр скважины . . . . .	не более 2 $\%$
Питание прибора.	
от источника переменного тока частотой 50 Гц . . . . .	$220\text{В} \pm 10\%$
от источника постоянного тока . . . . .	$12 \div 15\text{В}$
Потребляемая мощность . . . . .	не более 10 В·А

В конструкции скважинных приборов предусмотрен центратор и защита от взвешенных частиц

Тип каротажного кабеля — одножильный

Число измерений за один спуск — подъем неограничено

Расходомер предназначен для работы как в комплекте с каротажной станцией (любого типа), так и самостоятельно с использованием переносных спуско-подъемных средств

### 3. ПОДГОТОВКА СКВАЖИН ДЛЯ РАСХОДОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Подготовка скважин для расходометрического каротажа, выполняемого с исследовательской или контрольно-методической целью, включает определенный комплекс технических мероприятий, которые должны обеспечить:

— свободное сообщение водоносных пластов (зон) со скважиной и между собой по скважине;

— очистку ствола скважины и фильтров от шлама и глинистого раствора,

- устойчивость стенок скважины;
- возможность проведения расходометрических измерений одновременно с возбуждением скважины с помощью откачек, выпусков или наливов.

Выполнение в полной мере этих технических мероприятий начинается уже на стадии проектирования гидрогеологических работ. На этой стадии в зависимости от конкретных геологотехнических и гидрогеологических условий выбирается определенная технологическая схема проводки, подготовки и опробования скважин. Именно на этой стадии подготавливаются условия для получения существенного геологического и экономического эффекта от использования метода расходометрии при проектируемых гидрогеологических работах.

В качестве наиболее типичных можно назвать три технологические схемы проводки и подготовки скважин, положительно зарекомендовавших себя в различных районах страны.

**Схема 1.** Исследования в разрезах устойчивых сцементированных и скальных пород с порово-трещинным, трещинным и трещинно-карстовым типом вод. По геологотехническим условиям бурение в таких разрезах проводят ударно-механическим, колонковым или роторным способами. В последних двух случаях в качестве промывочной жидкости используют чистую воду. Скважину бурят до проектной глубины без промежуточного опробования или с использованием его в минимальных объемах. Ствол пробуренной скважины оставляют открытым, за исключением верхнего интервала рыхлых отложений, требующего крепления. Ствол и стенки скважины очищают от шлама интенсивной промывкой и откачкой (при ударном способе бурения желонированием). После восстановления уровня и проведения комплекса геофизических исследований, включая кавернометрические измерения, скважину можно считать подготовленной для расходометрических исследований, которые обычно осуществляют в таком порядке. Сначала производят измерения осевого расхода воды по стволу при установившемся естественном уровне, затем аналогичные измерения повторяют одновременно с откачкой (самоизливом) или наливом на одну или две ступени в соответствии с гидродинамическим режимом и положениями, изложенными в гл. V.

Если нет уверенности, что ствол скважины был достаточно очищен после бурения, расходометрические измерения по методике исследования возмущающей скважины целесообразно проводить в обратной последовательности, т. е. сначала проводить измерения при возбуждении скважины и в последнюю очередь — при восстановленном естественном уровне. Такая же последовательность измерений может быть и тогда, когда очистка ствола осуществляется достаточно длительной откачкой при стабильном режиме с одновременным наблюдением за дебитом и уровнем. Такая откачка может служить первым понижением для расходометрических измерений, поскольку последние приурочиваются обычно к концу откачки.

Результаты расходометрии в скважинах, пройденных и подго-



товленных в соответствии со схемой 1, отличаются наибольшей достоверностью, и именно в этих условиях получен наибольший экономический эффект.

**Схема 2.** Исследования в разрезах слабоустойчивых трещиноватых и трещинно-карстовых пород. По геологотехническим причинам бурение в таких условиях проводится ударно-механическим либо вращательным способом с использованием в качестве промывки чистой воды или облегченного глинистого раствора. В таких условиях часто трудно по данным бурения и простейших гидрогеологических наблюдений прогнозировать интервалы посадки фильтров. Нередко геофизические исследования также не позволяют решить эту задачу достаточно уверенно. Поэтому, чтобы не исказить фильтрующий разрез ошибочным выбором интервалов посадки фильтров, последние крепят на всем протяжении ствола или в пределах его значительной части, представляющей наибольший интерес для исследования.

Для крепления обычно используют дырчатые или щелевые фильтры со значительной скважностью и поэтому небольшим гидравлическим сопротивлением. При креплении скважины важно соблюдать условие соответствия диаметра глухих и фильтровых труб диаметру бурения, чтобы исключить возможность затрубного движения воды. Скважины можно бурить одним диаметром или применять телескопическую конструкцию. Это зависит от конкретных условий и для проведения расходомерии не имеет значения, за исключением случаев, которые рассмотрены в следующем разделе. Поинтервальные откачки или наливы до окончания бурения скважины до проектной глубины не проводятся. После завершения бурения выполняют комплекс геофизических исследований методами электро- и радиоактивного каротажа, а затем ствол скважины оборудуют фильтрами. После очистки ствола и фильтров от шлама и раствора восстанавливают уровень подземных вод и производят расходометрические измерения в порядке, аналогичном принятому в схеме 1. Несмотря на относительно большой расход фильтров для оборудования скважин, такая схема работ оказалась геологически целесообразной во многих районах и в то же время экономически выгодной.

**Схема 3.** Исследования в разрезах обломочных рыхло-цементированных пород с порово-пластовым типом вод. По геологотехническим условиям бурение в этих разрезах также может проводиться как ударно-механическим, так и вращательным способами. В последнем случае для промывки используют глинистый раствор. С учетом выполнения расходометрических исследований сначала скважину бурят малым диаметром до проектной глубины. По результатам анализа керна и шлама и по материалам геофизических исследований устанавливают положение водоносных пластов в разрезе. Затем скважину разбуривают большим диаметром (проектным) с применением облегченного раствора и оборудуют фильтрами против выделенных водоносных пластов. Иногда вместо применения готовых фильтров прибегают к перфорации об-

садной колонны пулевыми перфораторами в интервале водоносных пластов. После очистки скважины и фильтров соответствующими приемами и восстановления естественного уровня приступают к осуществлению расходометрических исследований. Однако в этих условиях целесообразно в первую очередь провести исследования с возбуждением скважины, чтобы как можно лучше очистить скважину после бурения.

Следует отметить, что современные способы разглинизации скважин еще не обеспечивают полной и равномерной очистки стенок скважины и фильтров. Кроме того, нередко ошибки в установке фильтров на заданные глубины, выполняемой на основе каротажных или других данных, а также смещения колонн с заданных глубин под собственным весом. Эти факторы обуславливают несовершенство скважины по степени вскрытия водоносных пластов. Для установления этого факта и определения степени несовершенства скважин исследование разрывов комплексом геофизических методов является обязательным. Данные этих методов, кроме того, используются для оценки фильтрационных свойств изолированных пластов на основе корреляционных зависимостей, построенных с учетом данных расходометрии по открытым пластам (см. гл. IX).

Рассмотренные технологические схемы проходки и оборудования гидрогеологических скважин не предусматривают разделения водоносных пластов с различным качеством подземных вод. Между тем такое смешение иногда нежелательно. Поэтому описанные схемы пригодны прежде всего в тех случаях, когда этот вопрос является несущественным, т. е. когда в разрезе встречаются однотипные воды либо когда скважина по окончании работ будет ликвидирована. В эксплуатационных скважинах, где интерес представляют только пласты с пресными водами, оборудование фильтрами или перфорацию колонны можно проводить выборочно после оценки качества пластовых вод по данным геофизики или другим методам. Но такая технологическая схема подготовки скважин, очевидно, наиболее сложная, и ее производственные перспективы пока не ясны.

#### **4. МОНТАЖНЫЕ СХЕМЫ ВСПОМОГАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СКВАЖИН ПРИ РАСХОДОМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ**

Возбуждение скважин независимо от принятой технологической схемы может производиться с помощью различного насосного оборудования. В настоящее время опробованы с точки зрения пригодности для расходометрических измерений практически все виды насосного оборудования, применяемые в гидрогеологической практике. Это позволяет сделать некоторые общие рекомендации.

**Эрлифтные установки.** На рис. 44 приведены четыре основные схемы эрлифтных установок для возбуждения скважины при одновременном осуществлении расходометрических измерений. Вы-

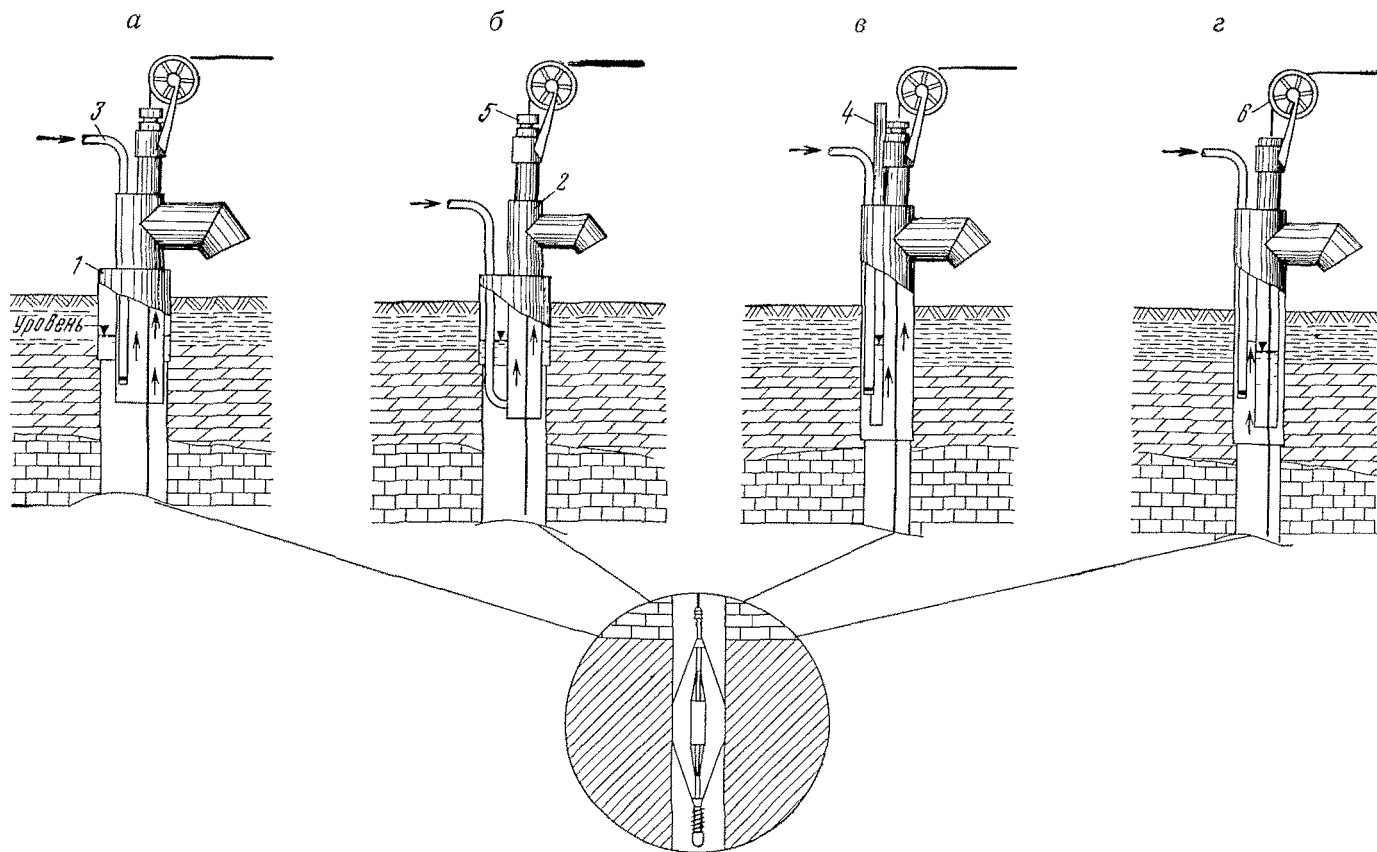


Рис 44 Схемы монтажа оборудования для откачки эрлифтом с применением расходомерии

1 — обсадная колонна, 2 — водоподъемная труба, 3 — воздушноподающая труба, 4 — измерительная труба, 5 — сальник, 6 — блок

бор того или иного варианта зависит от диаметра и конструкции скважины, диаметров расходомера и труб, используемых для подъема воды, нагнетания воздуха и измерения уровня. Обязательным условием выбора схемы эрфлита является возможность погружения расходомера в скважину в процессе возбуждения. В связи с большим разнообразием диаметров всех этих элементов, применяемых на практике, трудно дать конкретные указания для каждого случая. Можно лишь привести некоторые общие рекомендации, которые позволяют с учетом реальных условий правильно выбрать схему эрлифтной установки и размеры ее деталей.

Схемы на рис. 44, *а* и *б* применяются в тех случаях, когда обсадная колонна спущена недостаточно глубоко и поэтому необходимо использование водоподъемной колонны.

На рис. 44, *а* соотношение диаметров обсадной и водоподъемной колонн должно обеспечивать возможность измерения уровня воды в скважине непосредственно в зазоре между ними или через пьезометрическую трубку. Соотношение диаметров водоподъемной и компрессорной труб должно обеспечить возможность свободного пропуска расходомера в скважину в процессе откачки.

На рис. 44, *б* диаметр водоподъемной и компрессорной труб лимитируется внутренним диаметром обсадной трубы. При этом внутренний диаметр водоподъемной трубы должен быть по меньшей мере в два раза больше наружного диаметра расходомера. Уровень воды, как и на рис. 44, *а*, измеряется в зазоре между водоподъемной и обсадной колоннами.

Схемы на рис. 44, *в* и *г* применяются в тех случаях, когда верхний интервал скважины обсажен обсадной колонной на достаточную глубину. Обсадная колонна используется в качестве водоподъемной трубы, внутри которой размещаются компрессорные и пьезометрические трубки. На рис. 44, *в* расходомер погружается в скважину через водоподъемную колонну в зазоре между этими трубками.

Из всех приведенных на рис. 44 схем наиболее сложной для погружения расходомера в скважину является конструкция эрлифта по схеме «в». Искривление компрессорных и пьезометрических трубок иногда мешает свободному проходу расходомера. В этом случае рекомендуется, не приостанавливая откачку, поднять несколько секций пьезометрических трубок. После прохода расходомера в скважину ниже смесителя они снова опускаются на прежнюю глубину. Несколько чаще такие же затруднения встречаются при извлечении расходомера из скважины по окончании измерений. Если расходомерные измерения приурочиваются к концу откачки, что обычно имеет место, расходомер извлекается из скважины после остановки компрессора и частичного демонтажа оборудования.

Для погружения расходомера в скважину в период откачки эрлифтом по схемам, приведенным на рис. 44, *а—в*, используется оголовник (рис. 45) с уплотнителем водоподъемной колонны (рис. 46). После погружения расходомера в скважину кабель уп-

лотняется конусным сальником, который позволяет свободно производить спуско-подъемные операции при использовании каротажных кабелей любых типов. Метки глубин в этом случае наносят на кабель с помощью нитроэмали яркого цвета.

Схема «г» лишена недостатков схемы «в» (см. рис. 44), так как расходомер погружается в скважину через пьезометрическую

трубку, для чего она имеет соответствующий внутренний диаметр. Например, при использовании расходомера диаметром 36 мм внутренний диаметр пьезометрической трубки должен быть около 50 мм. При использовании этого варианта эрлифтной установки существенная часть сечения водоподъемной колонны занята пьезометрической трубкой.

При расходомерных исследованиях в режиме возбуждения желательно знать величину общего дебита скважины, которую можно сопоставить с величиной дебита, измеренного на поверхности объемным методом. Так осуществляется контроль точности измерений. Поэтому при монтаже оборудования возможность такого контроля должна быть предусмотрена. Контрольное измерение можно провести в водоподъемной колонне, располагая расходомер ниже смесителя.

Используя эрлифтные установки, приходится учитывать еще одно важное обстоятельство. Часть разреза скважины, скрытая за водоподъемной колонной, не может быть охарактеризована графиком расходомерии. При использовании схем, приведенных на рис. 44, в, г, эта часть разреза соответствует глубине до башмака обсадной колонны.

Поэтому для исследования безнапорных водоносных горизонтов или

напорных с неглубоким залеганием кровли, а также мелких скважин (до 50 м) применять расходомерию с возбуждением скважин эрлифтом может оказаться нецелесообразным.

**Насосы с горизонтальным валом.** На рис. 47 показаны две основные схемы монтажа оборудования для откачки на базе использования центробежных горизонтальных насосов. Выбор того или иного варианта зависит от диаметра скважины и типа насоса.

Схема на рис. 47, а может быть применена в том случае, когда

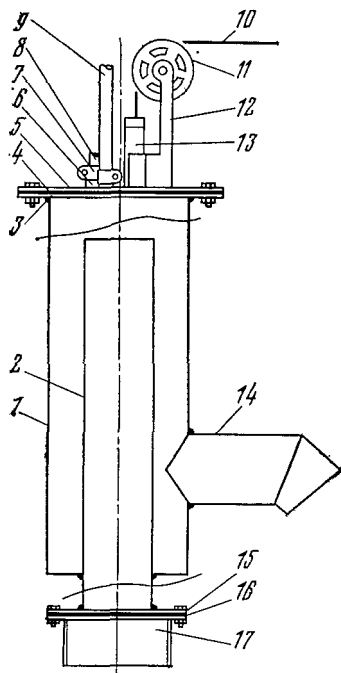


Рис. 45. Оголовник водоподъемной колонны для откачки эрлифтом с применением расходомерии.

1 — кожух; 2 — водовод; 3 — фланец верхний; 4 — прокладка; 5 — крышка; 6 — гнезда; 7 — хомуты; 8 — пьезометрическая труба; 9 — компрессорная труба; 10 — кабель; 11 — блок; 12 — кронштейн; 13 — лубрикатор; 14 — рукав; 15 — фланец нижний; 16 — прокладка; 17 — переходник

зазор между всасывающим шлангом вместе с клапаном и стенкой скважины достаточен для размещения приборной трубы, предназначенной для пропуска расходомера.

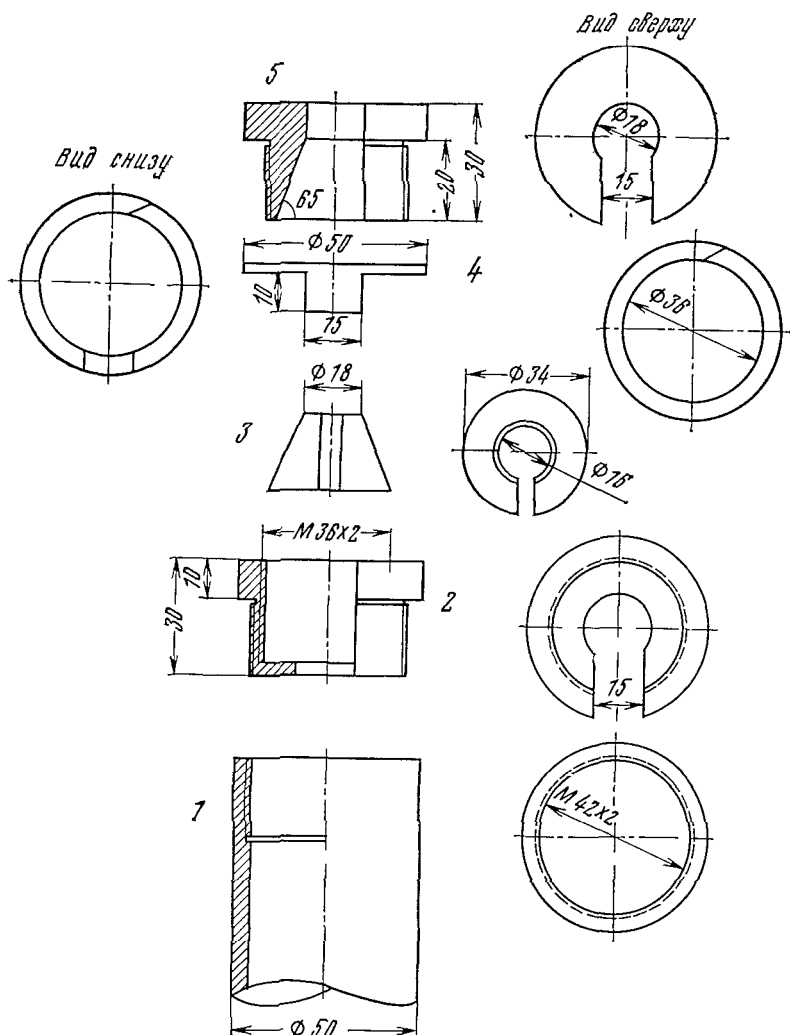


Рис 46 Лубрикатор для пропуска расходомера в скважины во время откачки эрлифтом

1 — патрубок, 2 — гнездо, 3 — сальник, 4 — прокладка 5 — уплотнитель

Схема на рис. 47, б применяется тогда, когда размещение оборудования по схеме «а» невозможно. В разьеме всасывающего шланга монтируется специальный Г-образный переход с встроенной приборной трубой для пропуска расходомера. Приборная тру-

ба выходит за нижний край всасывающего шланга. В этом случае установка работает без обратного клапана. Фильтр помещается в верхней части всасывающего шланга, как показано на рис. 47, б. В принципе можно разработать конструкцию обратного клапана для кольцевого сечения всаса. Однако для возбуждения скважин

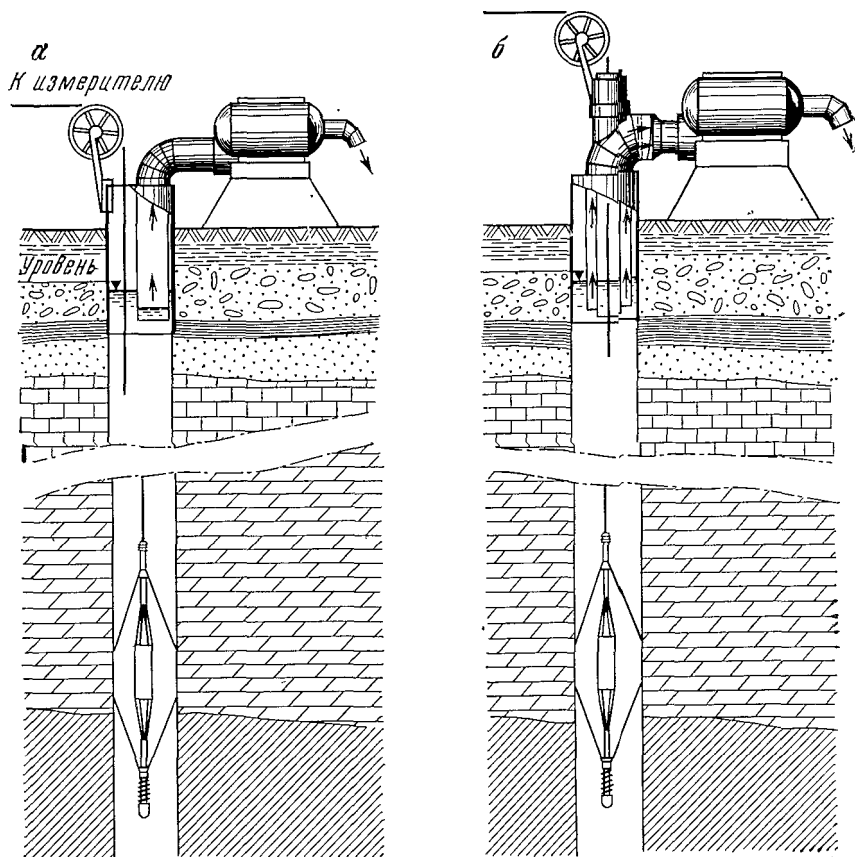


Рис. 47. Схемы монтажа оборудования для откачки из скважины с помощью непогружных центробежных насосов с применением расходомерии.

а, б — различные варианты монтажа

этим способом, видимо, следует стандартизировать типы применяемых насосов.

**Насосы с вертикальным валом.** К этой группе отнесены центробежные погружные насосы типа АП, ЭПЛ, артезианские насосы типа НА, АТН и др., предназначенные для проведения откачки. Несмотря на конструктивные различия, общий принцип монтажа оборудования позволил объединить их в одну группу. Во всех случаях для проведения расходометрических измерений бурение сква-

жины по крайней мере на глубину погружения водоподъемного устройства производится диаметром, обеспечивающим достаточный зазор для размещения в нем приборной трубы. Помимо этого в станине насосов типа НА, АТН, устанавливаемой на фундаменте, следует предусматривать специальное отверстие, через которое приборная труба вводится в скважину. Насосы данной группы специально для расходомерных исследований разведочных скважин по технико-экономическим соображениям обычно не применяются. Иногда расходомерия совмещается с откачками такими насосами при исследовании разведочно-эксплуатационных скважин.

**Водовыпуски.** Самоизливающиеся скважины являются удобным объектом для постановки расходомерии. Оборудование устья скважины должно обеспечивать возможность восстановления уровня и создания необходимого понижения. Это может быть осуществлено способом, показанным на рис. 48. Использование такой схемы может позволить проводить исследование по ме-

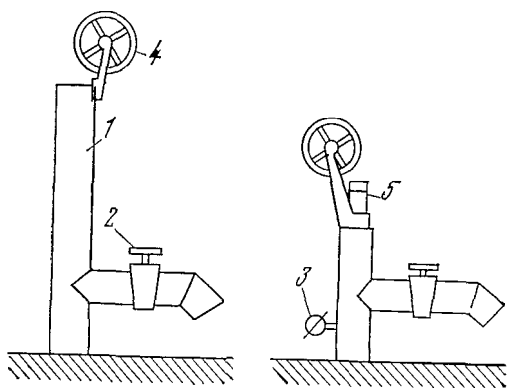


Рис. 48. Схемы водовыпусков из скважины при производстве расходомерии  
1 — обсадная труба, 2 — задвижка, 3 — манометр, 4 — блок; 5 — лубрикатор

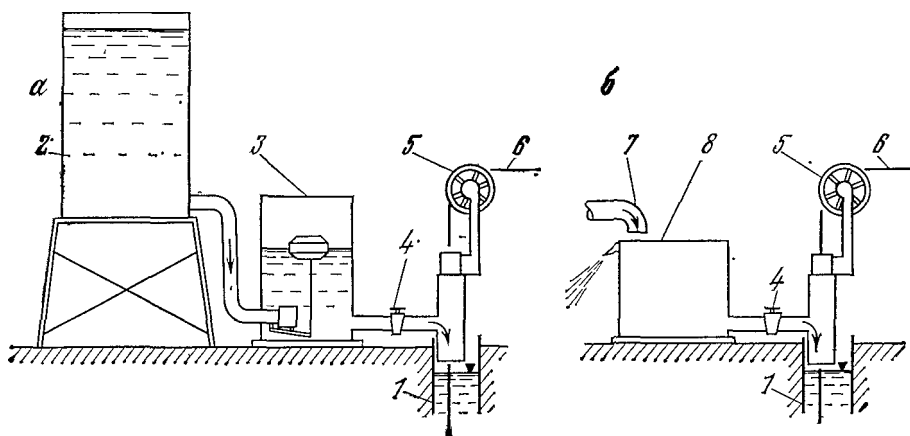


Рис. 49. Схемы монтажа оборудования для налива в скважину с применением расходомерии.

*a* — с использованием регулировочного устройства, по И. И. Гринбауму; *б* — с использованием буферной емкости 1 — скважина, 2 — емкость; 3 — регулировочный бак; 4 — вентиль; 5 — блок, 6 — кабель; 7 — водопровод, 8 — буферный бак



тодике неустановившегося и установившегося режимов возбуждения.

**Наливы.** Налив в скважину можно проводить с помощью любого оборудования, обеспечивающего стабильный расход. Если для налива приходится доставлять воду автотранспортом, можно использовать схему, приведенную на рис. 49, *а*. Более детальное описание устройства регулировочного бака приведено в работах [50, 54]. При использовании водопровода можно использовать более простую установку (см. рис. 49, *б*).

Использование наливов для возбуждения скважины целесообразно при глубоком залегании уровня подземных вод и малой водообильности разреза. В скважинах с малым внутренним диаметром колонны использование налива также технически более целесообразно.

## ВЫВОДЫ

1. Скважинный расходомер является дистанционным измерительным устройством при гидродинамических работах и предназначен для получения экспериментальных функций расхода осевого потока. Поэтому его технические характеристики должны отвечать комплексу изменяющихся условий: диапазону измеряемых величин, направлению потока, минерализации и температуре жидкости и др.

2. Подготовка скважины к расходометрическим исследованиям должна предусматривать возможность эффективного выявления достоинств этого метода в конкретных геолого-технических и гидрогеологических условиях, определяемых следующими факторами: способом бурения, устойчивостью стенок скважины, типом геологического разреза, глубиной залегания подземных вод, водообильностью разреза, способом возбуждения скважины. Такая подготовка должна учитывать также возможность проведения (совместно с расходометрией) комплексных геофизических исследований.

# **МЕТРОЛОГИЯ СКВАЖИННЫХ БЕСПАКЕРНЫХ РАСХОДОМЕРОВ ТАХОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА**

## **1. ВНУТРЕННИЕ (ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ) ПОГРЕШНОСТИ ТАХОМЕТРИЧЕСКИХ РАСХОДОМЕРОВ**

Инструментальные погрешности расходомера складываются из погрешностей получения градуировочной функции и погрешностей обратного использования ее для определения величины расхода потока через прибор по данным наблюдения в скважине. Иными словами, это погрешности, свойственные только измерительной расходометрической аппаратуре независимо от условий ее применения. Они называются внутренними в отличие от внешних, обусловленных необходимостью учета скважинных условий работы расходомера.

Точность градуировочных характеристик может быть установлена непосредственно по конечным результатам измерения величин, определяющих вид этих функций. Она может быть установлена также из анализа погрешностей, содержащихся в измерениях составных элементов градуировки. Такой путь позволяет не только определить величину погрешности и оценить точность результирующей характеристики, но и установить механизм взаимного влияния погрешностей в различных элементах и операциях градуировки. Это открывает возможность градуирования и измерения с обеспечением желаемой точности характеристики, а также расхода потока через прибор в скважинных условиях.

Рассмотрим этот вопрос для выбранного типа крыльчатого-тахометрического расходомера ТСРГ. При градуировании таких приборов устанавливается вид функции

$$q_n = f(\omega) \tag{VII.1}$$

путем сопоставления независимых измерений величин  $q_n$  (расход воды через прибор) и  $\omega$  (частота вращения крыльчатого элемента)<sup>\*</sup>. Однако величины  $q_n$  и  $\omega$  сами являются функциями аргументов  $V$ ,  $N$  и  $t$  (соответственно объем мерного сосуда, число оборотов крыльчатки и время), получаемых также путем измерений. Поэтому вопрос о точности градуировочной характеристики датчиков расходомеров следует рассматривать в такой последовательности: сначала установить точность определения величин  $q_n$  и  $\omega$  затем точность функции  $q_n = f(\omega)$

При градуировании расходомеров  $q_n$  определяется объемным методом как отношение двух аргументов:  $V$  и  $t$ . Каждый из этих

<sup>\*</sup> Градуировочной функции целесообразно придать такой вид в связи с тем, что в дальнейшем она используется для обратного определения  $q_n$  по замеченным значениям  $\omega$  в скважине.

аргументов определяется инструментально и в общем случае содержит как систематические, так и случайные погрешности измерения.

Если предположить, что при измерении заданного объема в мерном баке допускается некоторая систематическая погрешность  $\theta_V$ , а фиксация этого объема производится с оцененной среднеквадратичной погрешностью  $\Delta_V$ , то можно считать, что наполнение бака до заданного объема определяется с предельной погрешностью \*

$$|\varepsilon_V| = |\theta_V| + k |\Delta_V|. \quad (\text{VII.2})$$

Для простоты, считая, что нас интересует пока только предельная погрешность, запишем

$$\varepsilon_V = \theta_V + k\Delta_V, \quad (\text{VII.3})$$

где  $\varepsilon_V$  — предельная погрешность измерения объема;  $k$  — некоторая постоянная, отражающая зависимость между предельной случайной погрешностью и среднеквадратичной погрешностью измерения. В зависимости от требуемой точности проведения измерений  $k$  может быть задано равным 2, 3 и 4.

Аналогичным образом можно записать для измерений величины  $t$

$$\varepsilon_t = \theta_t + k\Delta_t, \quad (\text{VII.4})$$

где  $\varepsilon_t$  — предельная погрешность измерения  $t$ ;  $\theta_t$ ,  $\Delta_t$  — систематическая и среднеквадратичная части погрешности измерения  $t$ .

Теперь нашей задачей является установление точности определения расхода по величинам  $V$  и  $t$ , влияющим на эту точность, а также возможности управления величиной точности путем выбора соответствующего режима градуирования.

Если  $q_n$  определяется формулой  $q_n = \frac{V}{t}$ , то согласно теории ошибок измерения систематическая часть погрешности равна

$$\theta_{q_n} = \frac{1}{t} \theta_V - \frac{V}{t^2} \theta_t, \quad (\text{VII.5})$$

а среднеквадратичная

$$\Delta_{q_n} = \sqrt{\left(\frac{1}{t} \Delta_V\right)^2 + \left(\frac{V}{t^2} \Delta_t\right)^2}. \quad (\text{VII.6})$$

Прежде чем приступить к анализу этих формул, рассмотрим содержание величин  $V$  и  $t$  и вытекающие из этого следствия. Градуирование мерного бака можно представить как результат линейной суммы эталонных объемов

$$V = nV_0, \quad (\text{VII.7})$$

где  $V_0$  — объем эталонной емкости.

\* Имеется в виду их статистическая оценка.

Будем считать, что при внесении эталонного объема воды в мерный бак каждый раз возникала систематическая погрешность  $\theta_{V_3}$  и среднеквадратичная погрешность  $\Delta_{V_3}$ . Тогда можно записать, что систематическая погрешность градуировки мерного бака до отметки с объемом  $V$  будет равна

$$\theta'_V = \theta_{V_3} n, \quad (\text{VII.8})$$

а среднеквадратичная

$$\Delta'_V = \Delta_{V_3} \sqrt{n}. \quad (\text{VII.9})$$

Из этих формул видно, что при градуировании мерного бака с помощью некоторой эталонной емкости (как это обычно делается) систематическая и случайная части погрешности накапливаются в первом случае прямо пропорционально числу уложений эталонных объемов, а во втором — пропорционально корню квадратному из числа уложений эталонных объемов.

Подставив значение  $n$  из (VII.7) в формулы (VII.8) и (VII.9), получим

$$\theta'_V = \frac{\theta_{V_3} V}{V_3}, \quad (\text{VII.10})$$

$$\Delta'_V = \frac{\Delta_{V_3} \sqrt{V}}{\sqrt{V_3}}. \quad (\text{VII.11})$$

Введем обозначения:

$$\vartheta_V = \frac{\theta_{V_3}}{V_3}, \quad (\text{VII.12})$$

$$\nu_V = \frac{\Delta_{V_3}}{\sqrt{V_3}}. \quad (\text{VII.13})$$

После подстановки (VII.12) и (VII.13) в (VII.10) и (VII.11) получаем окончательные выражения для погрешностей градуировки мерного бака

$$\theta'_V = \vartheta_V V, \quad (\text{VII.14})$$

$$\Delta'_V = \nu_V \sqrt{V}. \quad (\text{VII.15})$$

Величины  $\vartheta_V$  и  $\nu_V$  называются коэффициентами систематического и случайного влияния на градуированный объем, которые можно считать постоянными. Поэтому на основании формул (VII.14) и (VII.15) приходим к выводу, что при градуировке мерного бака с помощью эталонной емкости накопление систематических погрешностей происходит пропорционально значению градуируемого объема, а случайных — пропорционально корню квадратному из значения градуированного объема. При градуировании мерного бака на несколько заданных объемов с увеличе-

нием последних систематическая погрешность будет расти значительно быстрее случайной. Поэтому необходимо предусматривать ряд мер для ослабления влияния прежде всего систематических погрешностей. В частности, как следует из формул (VII.8) и (VII.12), необходимо использовать при градуировании эталонную емкость возможно большего объема.

Проводя многократную градуировку мерного бака до заданных объемов, можно также добиться в соответствии со свойством компенсации случайных погрешностей, что градуировка мерного бака будет выполнена только с внесением систематической погрешности в заданный объем  $V$ . Эта погрешность, как известно, полностью переходит при градуировке расходомеров в результат определения наполнения бака до заданного объема  $V$ . Следовательно, можно записать

$$\theta_V = \theta'_V. \quad (\text{VII.16})$$

Для времени наполнения бака, фиксируемого по секундомеру, погрешность измерения также будет состоять из систематической и случайной частей. По аналогии с (VII.14), учитывая (VII.16) для систематической погрешности в измерениях времени наполнения мерного бака, можно записать

$$\theta_t = \vartheta_t \cdot t_{q_{\Pi}} \quad (\text{VII.17})$$

где  $\vartheta_t = \frac{\theta_t}{t}$  — относительная систематическая погрешность секундомера;  $t_{q_{\Pi}}$  — время наполнения мерного бака при измерении расхода.

Таким образом, приходим к заключению, что систематические погрешности в определении величины  $V$  создаются погрешностями градуировки мерного бака до заданных объемов (отметок). Случайные погрешности измерения возникают при фиксации уровня наполнения мерного бака до заданной отметки. Аналогично в измерениях величины  $t$  присутствуют систематическая погрешность градуировки секундомера и случайная погрешность отсчета времени по циферблату.

Возвращаясь к формулам (VII.5) и (VII.6) и учитывая формулы (VII.14), (VII.2) и (VII.17), запишем окончательные выражения для систематической погрешности в измерениях  $q_{\Pi}$

$$\theta_{q_{\Pi}} = q_{\Pi}(\vartheta_V - \vartheta_t) \quad (\text{VII.18})$$

и среднеквадратичной погрешности

$$\Delta_{q_{\Pi}} = \frac{1}{t_{q_{\Pi}}} \sqrt{\Delta_V^2 + q_{\Pi}^2 \Delta_t^2}. \quad (\text{VII.19})$$

И, наконец, предельная погрешность измерения расхода объемным способом будет равна

$$\varepsilon_{q_{\Pi}} = q_{\Pi}(\vartheta_V - \vartheta_t) + \frac{k}{t_{q_{\Pi}}} \sqrt{\Delta_V^2 + q_{\Pi}^2 \Delta_t^2}, \quad (\text{VII.20})$$

где  $\varepsilon_{q_{\Pi}}$  — предельная погрешность измерения расхода.

Из формулы (VII.18) видно, что систематическая часть погрешности измерения расхода прямо пропорциональна величине измеряемого расхода, причем она может быть как положительной, так и отрицательной.

Из формулы (VII.19) видно, что случайная часть погрешности измерения обратно пропорциональна времени наполнения бака до заданного объема, но так как время наполнения бака при данной величине расхода и его объем взаимосвязаны, то эта зависимость в равной степени относится и к задаваемому объему бака. Поскольку в подкоренное выражение входит расход, следовательно, случайная погрешность будет также зависеть от величины измеряемого расхода. В отличие от систематической погрешности ее величиной можно управлять путем изменения объема мерного бака.

В практике градуировки представляет интерес выбор таких условий измерения, при которых предельная погрешность измерения оставалась бы меньше заданной величины. Решим равенство (VII.20) относительно  $t_{q_{\Pi}}$

$$t_{q_{\Pi}} = \frac{k \sqrt{\Delta_V^2 + q_{\Pi}^2 \Delta_t^2}}{\varepsilon_{q_{\Pi}} - q_{\Pi} (\vartheta_V - \vartheta_t)}. \quad (\text{VII.21})$$

Задаваясь определенными значениями  $\varepsilon_{q_{\Pi}}$  для различных интервалов диапазона градуирования по  $q_{\Pi}$ , можно рассчитать по формуле (VII.21) необходимую длительность наполнения бака (и соответственно потребную для этого емкость). Для конкретного градуировочного стенда формула (VII.21) может быть протабулирована, что создает определенные удобства при задании оптимального режима градуирования.

Рассмотрим конкретный пример. При градуировке используется мерный бак объемом  $0,5 \text{ м}^3$  с делениями шкалы через  $0,05 \text{ м}^3$ . Градуировка произведена эталонным сосудом и допускает  $\Phi_V = 1 \cdot 10^{-3}$ . Среднеквадратичная погрешность отметки уровня по шкале (объема)  $\Delta_V = 5 \cdot 10^{-4}$ . Время наполнения бака фиксируется по секундомеру общетехнического назначения, имеющему по паспортным данным  $\Phi_t = 5 \cdot 10^{-4}$ . Среднеквадратичная погрешность отсчета значения времени наполнения бака по данным эксперимента  $\Delta_t = 0,2 \text{ с}$ . Определить оптимальный режим градуировки при расходе  $1 \text{ л/с}$  с допустимой предельной погрешностью  $\varepsilon_{q_{\Pi}} \leq 0,02 \text{ л/с}$ , а также значения систематической и среднеквадратичной погрешностей, принимая  $k=3$

После подстановки данных в формулу (VII.21) получаем

$$t_{q_{\Pi}} = 83 \text{ с}.$$

Отсюда делаем вывод, что для обеспечения  $\varepsilon_{q_{\Pi}} \leq 0,02 \text{ л/с}$  длительность замера должна составлять не менее 83 с. При имеющейся градуации объемов мерного бака наполнение должно производиться до отметки  $0,1 \text{ м}^3$ , что обеспечит длительность, равную 100 с. Используя теперь формулу (VII.18), находим  $\theta_{q_{\Pi}} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ л/с}$  и по формуле (VII.19)  $\Delta_{q_{\Pi}} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ л/с}$ . Подсчет предельной погрешности измерения по формуле, аналогичной (VII.3) и (VII.4), дает

$\varepsilon_{q_{\Pi}} = 0,02$  л/с. При вынужденном наполнении мерного бака до отметки  $0,1 \text{ м}^3$  среднеквадратичная погрешность  $\Delta_{q_{\Pi}} = 5,4 \cdot 10^{-3}$  л/с и предельная погрешность измерения  $\varepsilon_{q_{\Pi}} = 0,017$  л/с. Таким образом, условия задачи выполнены.

По аналогии с рассмотрением функции  $q_{\Pi}$  можно сделать предположение, что значение  $\omega$ , определяемое формулой  $\omega = \frac{N}{t}$ , также содержит систематические и случайные погрешности за счет аналогичных погрешностей в величинах  $N$  и  $t$ . Значение  $N$  может содержать систематические погрешности за счет особенностей измерительной аппаратуры, случайные — за счет ошибок отсчета значений по циферблату, шкале, диаграмме и т. п. Аналогично (VII.3) можно записать выражение для предельной погрешности измерения общего числа оборотов (импульсов) крыльчатого элемента датчика

$$\varepsilon_N = \theta_N + k\Delta_N, \quad (\text{VII.22})$$

где  $\theta_N$ ,  $\Delta_N$  — соответственно систематическая и среднеквадратичная погрешности измерения  $N$ ;  $\varepsilon_N$  — предельная погрешность измерения  $N$ .

В соответствии с известным решением задачи о погрешностях функции в зависимости от погрешностей аргументов можно записать для систематической погрешности

$$\theta_{\omega} = \frac{1}{t_{\omega}} \theta_N - \frac{N}{t_{\omega}^2} \theta_t, \quad (\text{VII.23})$$

и для среднеквадратичной

$$\Delta_{\omega} = \sqrt{\left(\frac{1}{t_{\omega}} \Delta_N\right)^2 + \left(\frac{N}{t_{\omega}^2} \Delta_t\right)^2}, \quad (\text{VII.24})$$

где  $t_{\omega}$  — длительность регистрации числа оборотов крыльчатого элемента датчика при определении частоты вращения.

Систематические погрешности в измерении величины  $N$  в общем случае могут быть связаны с ложным срабатыванием измерительной схемы в момент включения и выключения, погрешностями градуировки шкал и т. п. По влиянию на конечный результат отсчета значений  $N$  эти погрешности различаются. Одни входят в него как постоянное слагаемое, другие накапливаются в процессе измерения. Поэтому в общем виде систематическую погрешность можно записать в виде

$$\theta_N = \bar{\theta}_N + \tilde{\theta}_N, \quad (\text{VII.25})$$

где  $\bar{\theta}_N$  и  $\tilde{\theta}_N$  — соответственно постоянная и переменная части систематической погрешности

Равенство (VII.25) можно переписать в виде

$$\theta_N = \bar{\theta}_N + \vartheta_N N, \quad (\text{VII.26})$$

где  $\vartheta_N$  — относительная погрешность измерения  $N$ .

После подстановки (VII.18) с заменой  $t_{q_{\Pi}}$  на  $t_{\omega}$  и (VII.26) в (VII.23) для систематической погрешности результата вычисления  $\omega$  получаем выражение

$$\theta_{\omega} = \frac{\bar{\theta}_N}{t_{\omega}} + \omega (\vartheta_N - \vartheta_t). \quad (\text{VII.27})$$

Из формулы (VII.27) видно, что систематическая погрешность при постоянном  $t_{\omega}$  линейно растет с ростом частоты вращения крыльчатого элемента датчика с угловым коэффициентом  $(\vartheta_N - \vartheta_t)$ . Характерно, что первый член в правой части формулы (VII.27), включающий постоянную часть систематической погрешности результата  $N$ , обратно пропорционален длительности замера (времени регистрации величины  $N$ ). Это позволяет управлять величиной  $\theta_{\omega}$  в схемах регистрации  $N$  за некоторое время, устанавливаемое по выбору оператора. Однако более удобным и методически более правильным решением является выбор такой методики измерения, при которой постоянная часть систематической погрешности исключается из результата измерения. Тогда систематическая погрешность, неизменно присутствующая в измеряемой величине  $N$ , по аналогии с (VII.18) будет выражена в виде

$$\theta_N = \vartheta_N N. \quad (\text{VII.28})$$

Теперь можно записать окончательные формулы для систематической погрешности

$$\theta_{\omega} = \omega (\vartheta_N - \vartheta_t), \quad (\text{VII.29})$$

для среднеквадратичной погрешности

$$\Delta_{\omega} = \frac{1}{t_{\omega}} \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_t^2} \quad (\text{VII.30})$$

и для предельной погрешности результата измерения  $\omega$

$$\varepsilon_{\omega} = \omega (\vartheta_N + \vartheta_t) + \frac{k}{t_{\omega}} \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_t^2}. \quad (\text{VII.31})$$

Из формулы (VII.31) видно, что соответствующим подбором значения  $t_{\omega}$  можно добиться поддержания  $\varepsilon_{\omega}$  на заданном уровне. Решив (VII.31) относительно  $t_{\omega}$ , получим

$$t_{\omega} = \frac{k \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_t^2}}{\varepsilon_{\omega} - \omega (\vartheta_N + \vartheta_t)}. \quad (\text{VII.32})$$

Зная из экспериментальных исследований величины  $\vartheta_N$ ,  $\Delta_N$ ,  $\vartheta_t$ ,  $\Delta_t$  и задавая определенные значения  $\varepsilon_{\omega}$  для разных пределов  $\omega$ , можно рассчитать по формуле (VII. 32) необходимую продолжительность замера числа оборотов крыльчатого элемента датчика. Для конкретного образца аппаратуры эта формула может быть протабулирована по значениям  $\omega$ .



Рассмотрим конкретный пример. Измерительная аппаратура обладает следующими характеристиками:  $\vartheta_N = 1 \cdot 10^{-3}$ ,  $\Delta_N = 0,05$  об,  $\vartheta_t = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $\Delta_t = 0,2$  с. Определить оптимальные условия измерения частоты вращения крыльчатки, равной 2 об/с при сохранении  $\epsilon_\omega \leq 0,05$  об/с, а также значения систематической и среднеквадратичной погрешностей при  $k=3$ . По формуле (VII.32) получаем  $t_\omega = 24,7$  с. Отсюда делаем вывод, что для измерения частоты, равной 2 об/с с точностью  $\epsilon_\omega \leq 0,05$  об/с продолжительность регистрации числа оборотов крыльчатки должна быть не менее 25 с. Подставляя теперь данные примера в формулы (VII.29), (VII.30) и (VII.31), соответственно получим:  $0_\omega = 0,001$  об/с,  $\Delta_\omega = 0,0163$  об/с,  $\epsilon_\omega = 0,05$  об/с.

При градуировании расходомеров иногда задаются целью поддерживать постоянство предельной относительной погрешности на заданном уровне. Она равна отношению предельной абсолютной погрешности к значению измеряемой величины. Для измерений расхода

$$\delta_{q_\Pi} = \epsilon_{q_\Pi} / q_\Pi, \quad (\text{VII.33})$$

для измерений частоты

$$\delta_\omega = \epsilon_\omega / \omega. \quad (\text{VII.34})$$

В соответствии с такой постановкой задачи оптимальные условия градуирования определяются формулами (VII.35) и (VII.36), полученными в результате подстановки (VII.33) и (VII.34) в (VII.21) и (VII.32)

$$t_{q_\Pi} = \frac{k \sqrt{\Delta_V^2 + q_\Pi^2 \Delta_t^2}}{q_\Pi (\delta_{q_\Pi} - \vartheta_V + \vartheta_t)}; \quad (\text{VII.35})$$

$$t_\omega = \frac{k \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_t^2}}{\omega (\delta_\omega - \vartheta_N + \vartheta_t)}. \quad (\text{VII.36})$$

Формулы (VII.35) и (VII.36) показывают следующее. При измерениях с условием обеспечения постоянства  $\delta_{q_\Pi}$  и  $\delta_\omega$  необходимое время измерения  $q_\Pi$  и  $\omega$  с ростом этих величин уменьшается, в то время как при измерении в режиме  $\epsilon_{q_\Pi} = \text{const}$  и  $\epsilon_\omega = \text{const}$  оно увеличивается с ростом значений  $q_\Pi$  и  $\omega$ .

Теперь обратимся к анализу точности и особенностей градуировочной функции  $q_\Pi = f(\omega)$ . Известно, что для крыльчато-тахометрических датчиков расходомеров эта функция в общем случае аппроксимируется прямой линией типа

$$q_\Pi = a\omega + b. \quad (\text{VII.37})$$

Точность функции (VII.37), представляющей собой результат корреляции между величинами  $\omega$  и  $q_\Pi$ , можно оценить, если предварительно установлена точность полученных экспериментально коэффициентов  $a$  и  $b$ . Эти коэффициенты обычно получают в результате применения способа наименьших квадратов при обработке экспериментальных данных  $q_\Pi$  и  $\omega$ , по формулам

$$a = \frac{\sum_{i=1}^r q_{ni} \omega_i - \sum_{i=1}^n q_{ni} \sum_{i=1}^n \omega_i}{n \sum_{i=1}^n \omega_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2}; \quad (\text{VII.38})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n q_{ni} - a \sum_{i=1}^n \omega_i}{n}, \quad (\text{VII.39})$$

где  $n$  — число опытных точек со значениями  $q_{ni}$ ,  $\omega_1$ , ...,  $q_{pn}$ ,  $\omega_n$ .

Рассмотрим сначала коэффициент  $a$ , представив его как функцию независимых аргументов  $q_{ni}$ ,  $\omega_i$ , связанных уравнением (VII. 38). Руководствуясь общим правилом нахождения погрешностей функции, для систематической погрешности в  $a$  запишем выражение

$$\theta_a = \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial a}{\partial q_{ni}} \theta_{q_{ni}} + \frac{\partial a}{\partial \omega_i} \theta_{\omega_i} \right) \quad (\text{VII.40})$$

и для среднеквадратичной погрешности в  $a$

$$\Delta_a = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\partial a}{\partial q_{ni}} \Delta_{q_{ni}} \right)^2 + \left( \frac{\partial a}{\partial \omega_i} \Delta_{\omega_i} \right)^2 \right]}. \quad (\text{VII.41})$$

Не приводя громоздких выкладок, записываем сразу итоговые формулы

$$\theta_a = a (\vartheta_V - \vartheta_N - \vartheta_{t_{q_{ni}}} + \vartheta_{t_{\omega}}); \quad (\text{VII.42})$$

$$\Delta_a = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\omega_i^2 - \bar{\omega}^2)} \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(\omega_i - \bar{\omega})^2}{t_{q_{ni}}^2} (\Delta_V^2 + q_{ni}^2 \Delta_{t_{q_{ni}}}^2) \right]} + \sqrt{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(q_{ni} - \bar{q}_{ni})^2 - 4a^2 (\omega_i - \bar{\omega})^2}{t_{\omega_i}^2} (\Delta_N^2 + \omega_i^2 \Delta_{t_{\omega}}^2) \right]}, \quad (\text{VII.43})$$

где  $\vartheta_{t_{q_{ni}}}$ ,  $\vartheta_{t_{\omega}}$  — относительная систематическая погрешность для секундомера, использованного при измерении соответственно расхода и частоты;  $\Delta_{t_{q_{ni}}}$ ,  $\Delta_{t_{\omega}}$  — среднеквадратичная погрешность в измерениях времени секундомером, использованным соответственно для измерения расхода и частоты;  $\bar{q}_{ni}$ ,  $\bar{\omega}$  — среднее арифметическое из значений  $q_{ni}$  и  $\omega_i$ .

Формулы (VII.42) и (VII.43) позволяют установить связь систематической и случайной частей погрешности определения  $a$  с

элементарными погрешностями измерения. Они устанавливают эту связь независимо от того, какая методика была принята при измерениях  $q_{\text{п}}$  и  $\omega$ .

Если измерения  $q_{\text{п}}$  и  $\omega$  проводились по методике, предусматривающей  $\varepsilon_{q_{\text{п}}} = \text{const}$  и  $\varepsilon_{\omega} = \text{const}$ , то формула среднеквадратичной погрешности  $\Delta_a$  может быть переписана в несколько более удобном для расчета виде

$$\Delta_a = \frac{1}{k \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\omega_i - \bar{\omega})^2 [\varepsilon_{q_{\text{п}}} - q_{\text{п}} (\vartheta_V - \vartheta_{t_{q_{\text{п}}}})]^2 + \sum_{i=1}^n [(q_{\text{п}} - \bar{q}_{\text{п}})^2 - 4a^2 (\omega_i - \bar{\omega})^2] [\varepsilon_{\omega} - \omega_i (\vartheta_N - \vartheta_{t_{\omega}})]^2}, \quad (\text{VII.44})$$

а при проведении измерений в режиме  $\delta_{q_{\text{п}}} = \text{const}$  и  $\delta_{\omega} = \text{const}$

$$\Delta_a = \frac{1}{k \sum_{i=1}^n (\omega_i^2 - \bar{\omega})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n q_{\text{п}}^2 (\omega_i - \bar{\omega})^2 (\delta_{q_{\text{п}}} - \vartheta_V + \vartheta_{t_{q_{\text{п}}}})^2 + \sum_{i=1}^n \omega_i^2 [(q_{\text{п}} - \bar{q}_{\text{п}})^2 - 4a^2 (\omega_i - \bar{\omega})^2] (\delta_{\omega} - \vartheta_N + \vartheta_{t_{\omega}})^2}. \quad (\text{VII.45})$$

Предельная погрешность определения  $a$  по аналогии с предыдущими записями предельных погрешностей выразится формулой

$$\varepsilon_a = \theta_a + k\Delta_a. \quad (\text{VII.46})$$

Рассмотрим некоторые особенности формул систематической и среднеквадратичной погрешностей в  $a$  и следствия, вытекающие из них.

1 Угловой коэффициент градуировочного графика наделен постоянной систематической погрешностью, определяемой формулой (VII.42). Она не зависит от режима измерения  $q_{\text{п}}$  и  $\omega$  и при необходимости она может быть исключена из результата определения  $a$ .

2 Значение случайной части погрешности  $\Delta_a$  при произвольном режиме измерения  $q_{\text{п}}$  и  $\omega$  зависит от времени  $t_{q_{\text{п}}}$  и  $t_{\omega}$ , а также от числа экспериментальных точек, участвующих в расчете. Поэтому в общем случае значение  $\Delta_a$ , рассчитанное по данным градуировки в произвольном режиме, нельзя рассматривать как константу, которая может быть взята в расчет априорной точности расхода  $q_{\text{п}}$ , измеряемого в скважине.

3 Если измерения  $q_{\text{п}}$  и  $\omega$  проводились в режиме  $\varepsilon_{q_{\text{п}}} = \text{const}$ ,  $\varepsilon_{\omega} = \text{const}$  или  $\delta_{q_{\text{п}}} = \text{const}$ ,  $\delta_{\omega} = \text{const}$ , то значение  $\Delta_a$  не зависит от  $t_{q_{\text{п}}}$  и  $t_{\omega}$ . Однако в этом случае  $\Delta_a$  приобретает сле-

дующие свойства. Если градуировочный график, построенный по экспериментальным данным, разделить на несколько равных частей, подчинив их одинаковым условиям относительно числа расчетных точек и выполнения требования  $\omega_{i \max}/\omega_{i \min} \leq 10$ , то в первом случае  $\Delta_a$  может считаться постоянным, а во втором  $\Delta_a$  увеличивается с ростом  $q_{\Pi}$ ,  $\omega$ . Этим приемом можно определить закономерность изменения  $\Delta_a$  в пределах диапазона градуирования. Величина  $\Delta_a$ , рассчитанная для всего интервала градуирования, характеризует некоторое среднее значение  $\Delta_a$ .

Аналогичным свойством будет обладать также величина  $\Delta_a$ , рассчитанная по формуле (VII.43), если измерения проводятся с соблюдением постоянной длительности  $t_{q_{\Pi i}}$  и  $t_{\omega i}$ . Такая методика рекомендуется в ряде наставлений по эксплуатации расходомеров. Если при этом  $t_{q_{\Pi i}}$ ,  $t_{\omega i}$  меньше необходимого времени, обеспечивающего режим  $\epsilon_{q_{\Pi}} = \text{const}$  и  $\epsilon_{\omega} = \text{const}$ , то значение  $\Delta_a$  получается более высоким.

4. Независимо от режима измерения  $\Delta_a$  зависит от диапазона значений  $q_{\Pi i}$  и  $\omega_i$ , поскольку  $a$  определяется по существу интерполяцией экспериментальных данных, а при этом, как известно, диапазон значений играет существенную роль. Важно отметить, что с расширением диапазона значений  $q_{\Pi i}$  и  $\omega_i$   $\Delta_a$  уменьшается. Поэтому для обеспечения возможно большей точности расчета  $a$  следует градуировать расходомер в возможно большем диапазоне расходов.

5. Зависимость  $\Delta_a$  от числа экспериментальных точек является следствием использования для расчетов метода наименьших квадратов, а также известного свойства рассеивания случайных погрешностей измерения. Эта зависимость  $\Delta_a$  от числа точек может быть использована в свою очередь при решении вопроса о необходимом числе градуировочных измерений для обеспечения заданной надежности  $\Delta_a$  по отношению к стандарту, равному  $\lim_{n \rightarrow \infty} \Delta_a = \bar{\Delta}_a$ . Решение такой задачи может быть получено на основании приближенной формулы, известной из теории ошибок измерений [65]

$$\frac{\Delta_{\Delta_a}}{\Delta_a} = \frac{1}{\sqrt{2n}}, \quad (\text{VII.47})$$

где  $\Delta_{\Delta_a}$  — среднеквадратичная погрешность среднеквадратичной погрешности.

Отношение  $\frac{\Delta_{\Delta_a}}{\Delta_a}$  характеризует степень отклонения эмпирической среднеквадратичной погрешности от стандарта  $\Delta_a$ , т. е. является относительной средней погрешностью среднеквадратичной погрешности  $\Delta_a$ . Формулу (VII.47) можно представить в виде таблицы значений относительной погрешности среднеквадратичной погрешности в зависимости от числа взятых в расчет точек.

$n$	2	4	6	8	10	15	20	25	30	35	40	50
$\frac{\Delta_{\Delta_a}}{\Delta_a}$	0,5	0,35	0,29	0,25	0,22	0,18	0,16	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10

Очевидно, что вывод относительно необходимого числа точек для определения  $\Delta_a$  с заданной надежностью по сравнению со стандартом величины  $a$  в равной мере можно применить к определению необходимого числа точек для расчета величины  $a$  по формуле (VII.38), чтобы обеспечить наилучшее приближение ее величины к действительной.

Теперь обратимся к анализу коэффициента  $b$ , определяемого формулой (VII.39). Руководствуясь общим правилом нахождения погрешности функции нескольких аргументов для систематической погрешности определения  $b$ , получаем выражение

$$\theta_b = \frac{(\vartheta_V - \vartheta_{t_{q_{\Pi}}}) \sum_{i=1}^n q_{\Pi i} - a (\vartheta_V - \vartheta_{t_{q_{\Pi}}} - 2\vartheta_N + 2\vartheta_{t_{\omega}}) \sum_{i=1}^n \omega_i}{n}. \quad (\text{VII.48})$$

Если предварительно из значения  $a$  вычесть величину систематической погрешности, пользуясь ее постоянством, как это следует из (VII.42), то  $a$  можно считать величиной достоверной. Тогда систематическая погрешность определится выражением

$$\theta_b = \frac{(\vartheta_V - \vartheta_{t_{q_{\Pi}}}) \sum_{i=1}^n q_{\Pi i} - a (\vartheta_N - \vartheta_{t_{\omega}}) \sum_{i=1}^n \omega_i}{n}. \quad (\text{VII.49})$$

Для случайной части погрешности при произвольном режиме измерения величин  $q_{\Pi i}$  и  $\omega_i$  получаем выражение

$$\Delta_b = \frac{1}{n} \sqrt{\frac{n\Delta_V^2 + \Delta_{t_{q_{\Pi}}}^2 \sum_{i=1}^n q_{\Pi i}}{t_{q_{\Pi}}} + \frac{a^2 (n\Delta_N^2 + \Delta_{t_{\omega}}^2 \sum_{i=1}^n \omega_i^2)}{t_{\varphi}^2} + \Delta_a^2 \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2}. \quad (\text{VII.50})$$

Если измерения  $q_{\Pi i}$  и  $\omega_i$  проводились в режиме  $\varepsilon_{q_{\Pi}} = \text{const}$ ,  $\varepsilon_{\omega} = \text{const}$ , то выражение для  $\Delta_b$  будет иметь вид

$$\Delta_b = \frac{1}{nk} \sqrt{\sum_{i=1}^n [\varepsilon_{q_{\Pi}} - q_{\Pi i} (\vartheta_V - \vartheta_{t_{q_{\Pi}}})]^2 + a^2 \sum_{i=1}^n [\varepsilon_{\omega} - \omega_i (\vartheta_V - \vartheta_{t_{\omega}})]^2 + k^2 \Delta_a^2 \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2}. \quad (\text{VII.51})$$

При выполнении измерений  $q_{\Pi i}$  и  $\omega_i$  в режиме  $\delta_{q_{\Pi}} = \text{const}$ ,  $\delta_{\omega} = \text{const}$  выражение для  $\Delta_b$  примет вид

$$\Delta_b = \frac{1}{nk} \sqrt{\sum_{i=1}^n [q_{ni}(\delta_{q_{ni}} - \vartheta_V + \vartheta_{t_{q_{ni}}})]^2 + a^2 \sum_{i=1}^n [\omega_i(\delta_{\omega} - \vartheta_N - \vartheta_{t_{\omega}})]^2 + k^2 \Delta_a^2 \left( \sum_{i=1}^n \omega_i \right)^2} \quad (\text{VII.52})$$

Формула для предельной погрешности запишется аналогично (VII.46)

$$\varepsilon_b = \theta_b + k\Delta_b. \quad (\text{VII.53})$$

Анализ формул (VII.47), (VII.52) позволяет сделать следующие выводы.

1. Коэффициент  $b$  в уравнении градуировочного графика независимо от режима измерения исходных значений  $q_{ni}$  и  $\omega_i$  обладает систематической и среднеквадратичной погрешностями, значения которых зависят от абсолютных величин  $q_{ni}$ ,  $\omega_i$  и числа опытных точек.

2. Зависимость  $\theta_b$  и  $\Delta_b$  от числа опытных точек определяется тем, что  $b$  по существу является средней арифметической разностей  $q_{ni} - a\omega_i$ . Это видно из уравнения (VII.39). Поэтому, естественно, если  $n \rightarrow \infty$ , то  $b$  будет стремиться к действительному значению,  $\theta_b$  — к среднему значению постоянной систематической погрешности, а  $\Delta_b$  — к стандарту рассеивания случайных погрешностей. Практически необходимое число опытных точек для определения  $b$ ,  $\theta_b$ ,  $\Delta_b$  с заданной надежностью может быть установлено по формуле (VII.47).

3. Величины  $\theta_b$  и  $\Delta_b$  при увеличении абсолютных значений  $q_{ni}$  и  $\omega_i$  при прочих постоянных условиях (интервал, число точек) увеличивается.  $\theta_b$  и  $\Delta_b$ , рассчитанные для всего интервала градуирования, характеризуют некоторую среднюю величину  $\theta_b$  и  $\Delta_b$ . Связь  $\theta_b$  и  $\Delta_b$  с шириной интервала, для которого проводится расчет этих величин, является следствием того, что  $b$  определяется по существу способом экстраполяции опытных данных до пересечения с осью  $q_{ni}$ .

4. С определенным значением  $\theta_b$  в результирующее значение  $b$  можно внести поправку, что позволит в дальнейшем считать, что  $b$  не содержит систематической погрешности.

После рассмотрения величин, используемых при построении градуировочной зависимости  $q_{ni} = f(\omega)$ , можно записать ее с учетом возможности получения значения  $q_{ni}$  с предельной погрешностью

$$q_{ni} = (a + \varepsilon_a)\omega + b + \varepsilon_b. \quad (\text{VII.54})$$

Эта зависимость используется для определения значения расхода, проходящего через водоканал расходомера, по результату измерения  $\omega$  в скважине. Если  $\omega$  в скважине измеряется в том же режиме, что и при градуировании датчика (это является одним из требований проведения расходометрических измерений), то

можно считать, что данное измерение содержит предельную погрешность, определяемую формулой (VII.31). Тогда предельная абсолютная погрешность определения рабочего расхода  $q_{\Pi}$  (по измерениям в скважине) будет равна

$$\varepsilon_{q_{\Pi}} = \theta_{q_{\Pi}} + k\Delta_{q_{\Pi}}, \quad (\text{VII.55})$$

где систематическая часть погрешности определения  $q_{\Pi}$  вне зависимости от режима измерения  $\omega$  будет равна

$$\theta_{q_{\Pi}} = (a + k\Delta_{q_{\Pi}}) \theta_{\omega}. \quad (\text{VII.56})$$

Формула (VII.56) получена в предположении, что используемые в формуле (VII.54) значения  $a$  и  $b$  исправлены на величину постоянной систематической погрешности  $\theta_a$  и  $\theta_b$ .

Среднеквадратичная погрешность определения

$$\Delta_{q_{\Pi}} = \sqrt{(a + k\Delta_a)^2 + (\omega + \varepsilon_{\omega})^2 \Delta_a^2 + \Delta_b^2}. \quad (\text{VII.57})$$

Подставив в (VII.56) и (VII.57) значения  $\theta_{\omega}$ ,  $\Delta_{\omega}$ ,  $\varepsilon_{\omega}$  из (VII.29), (VII.30) и (VII.31), можно прийти к выражениям, которые позволяют произвести априорную оценку точности  $q_{\Pi}$  по значениям инструментальных погрешностей, содержащихся в элементарных операциях измерения.

Согласно формулам (VII.29), (VII.30) и (VII.31) значения  $\theta_{\omega}$ ,  $\Delta_{\omega}$  и  $\varepsilon_{\omega}$  являются функциями величины  $\omega$ . Формулы (VII.55), (VII.56) и (VII.57) характеризуют соответственно величину предельной, систематической и среднеквадратичной погрешностей данного конкретного определения  $q_{\Pi}$ , т. е. их значения будут зависеть от значения измеряемой величины  $\omega$ .

Это положение остается независимо от того, в каком режиме измеряется  $\omega$ :  $\varepsilon_{\omega} = \text{const}$  или  $\delta_{\omega} = \text{const}$ . Однако характерно, что эта зависимость более выражена, если измерения проводятся в режиме  $\delta_{\omega} = \text{const}$ .

Если измерения  $\omega$  проводятся в режиме  $\varepsilon_{\omega} = \text{const}$ , то величина среднеквадратичной ошибки  $\Delta_{q_{\Pi}}$  записывается также формулой (VII.57), с той лишь разницей, что  $\varepsilon_{\omega}$  в подкоренном выражении является величиной постоянной. При проведении измерений  $\omega$  в режиме  $\delta_{\omega} = \text{const}$  формула для средней квадратической погрешности приобретает вид

$$\Delta_{q_{\Pi}} = \sqrt{(a + k\Delta_a)^2 + (1 + \delta_{\omega})^2 \omega^2 \Delta_a^2 + \Delta_b^2}. \quad (\text{VII.58})$$

Проведенное исследование погрешностей, возникающих при построении градуировочных зависимостей и использовании их для определения рабочего расхода  $q_{\Pi}$  по измерениям  $\omega$  в скважине, позволяет сделать выводы относительно наиболее правильного режима проведения работ на стадии градуирования и скважин-

ных измерений. При этом, очевидно, следует прежде всего иметь в виду характер обработки и интерпретации результатов измерения. Так, при интерпретации графиков расходомерии используются методы дифференцирования экспериментальных данных, математическая экстраполяция данных за пределы опытных значений и другие способы обработки, надежность которых в существенной степени зависит от равнозначности или неравнозначности измерения. Однако из сравнения формул (VII.57) и (VII.58) видно, что с этой точки зрения ни режим  $\varepsilon_\omega = \text{const}$ , ни режим  $\delta_\omega = \text{const}$  не обеспечивают равнозначности результатов измерения  $q_\Pi$ . Принципиально перед измерением  $\omega$  можно поставить задачу обеспечения постоянной предельной абсолютной погрешности определения  $q_\Pi$  в скважине. Для этого в формулу (VII.55) вместо  $\theta_{q_\Pi}$  и  $\Delta_{q_\Pi}$  следует подставить их значения из (VII.56) и (VII.55), в которых предварительно вместо  $\theta_\omega$ ,  $\Delta_\omega$  и  $\varepsilon_\omega$  подставлены их значения из (VII.29), (VII.30) и (VII.31). После решения полученного выражения относительно  $t_\omega$  получаем расчетную формулу для необходимой длительности измерения в зависимости от значения измеряемой  $\omega$ , заданной  $\varepsilon_\omega$  и известных инструментальных погрешностей измерительной аппаратуры

$$t_\omega = \frac{k^2 \Delta_a^2 \omega (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega}) \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_{t_\omega}^2} + \sqrt{k (\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_{t_\omega}^2) \times}}{\varepsilon_{q_\Pi} - \omega (a + k \Delta_a) (\vartheta_N - \vartheta_{t_\omega}) -} \times \frac{\{k^3 \omega^2 \Delta_a^4 (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 + [k^2 \Delta_a^2 + (a + k \Delta_a)^2] [\varepsilon_{q_\Pi} - \omega (a + k \Delta_a) (\vartheta_N - \vartheta_{t_\omega}) - k \omega^2 (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 \Delta_a^2 - \Delta_b^2] - k \omega^2 \Delta_a^2 (1 - \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 - \Delta_b^2\}}{\varepsilon_{q_\Pi} - \omega (a + k \Delta_a) (\vartheta_N - \vartheta_{t_\omega}) -} \quad (\text{VII.59})$$

Таким образом, принципиально наиболее правильным режимом проведения работ, обеспечивающим постоянство предельной абсолютной погрешности определения  $q_\Pi$  во всем диапазоне, является режим  $\varepsilon_{q_\Pi} = \text{const}$  при выполнении скважинных измерений  $\omega$ . Измерения  $\omega$  при градуировке, очевидно, должны проводиться в режиме скважинных измерений. Измерения расхода воды через водоканал прибора при градуировке следует проводить в режиме  $\varepsilon_{q_\Pi} = \text{const}$ , определяемом формулой (VII.21).

Если условиями измерения предусматривается обеспечение постоянства относительной погрешности определения  $q_\Pi$ , то расчетная формула необходимого времени имеет вид

$$t_\omega = \frac{k^2 \Delta_a^2 \omega (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega}) \sqrt{\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_{t_\omega}^2} + \sqrt{k (\Delta_N^2 + \omega^2 \Delta_{t_\omega}^2) \times}}{(a + k \Delta_a) (\delta_{q_\Pi} - \vartheta_N + \vartheta_{t_\omega}) \omega + \delta_{q_\Pi} (b + k \Delta_b) -}$$



$$\begin{aligned} & \times \{k^3 \Delta_a^4 \omega^2 (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 + [k^2 \Delta_a^2 + (a + k \Delta_a)^2] [(\alpha + k \Delta_a)(\delta_{q_\Pi} - \vartheta_N + \vartheta_{t_\omega}) \omega + \\ & - k \Delta_a^2 \omega^2 (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 - \Delta_b^2] \\ & + \delta_{q_\Pi} (b + k \Delta_b) - k \omega^2 (1 + \vartheta_N - \vartheta_{t_\omega})^2 \Delta_a^2 - \Delta_b^2 \} \end{aligned} \quad (\text{VII.60})$$

## 2. ВНЕШНИЕ ПОГРЕШНОСТИ БЕСПАКЕРНЫХ СКВАЖИННЫХ РАСХОДОМЕРОВ

Ориентация на использование расходомеров без пакерующих элементов для проведения гидродинамических исследований в гидрогеологических скважинах ставит ряд дополнительных исследовательских задач для обоснования точности измеряемых величин расхода потока через сечение скважины. Изменение именно этой величины по глубине скважины представляет интерес при расходометрических измерениях.

При использовании беспакерных расходомеров погрешность измерения общей величины расхода потока воды на заданной глубине кроме инструментальной погрешности расходомера зависит также от его положения в измеряемом потоке (эксцентриситета), диаметра скважины и гидравлического режима течения реальной жидкости. Рассмотрим влияние этих факторов на погрешность измерения расхода.

Оценка влияния эксцентриситета на погрешность измерения расхода в условиях ламинарного режима течения вязкой жидкости рассмотрена в работах [89, 93]. При выводе расчетных формул в этих работах принято допущение, что прибор, внесенный в измеряемый поток, не искажает сложившейся эпюры распределения скоростей. Поэтому ниже рассмотрим оценку влияния эксцентричного положения прибора на его показания при условии, что гидравлический режим течения воды в скважине может соответствовать турбулентной области. Кроме того, в отличие от упомянутых решений примем, что водоканал прибора обладает некоторым гидравлическим сопротивлением. Таким образом, рассмотрим два варианта: 1) гидравлическое сопротивление прибора равно нулю, т. е. внесение прибора в поток не искажает первоначальной эпюры распределения скоростей в сечении скважины; 2) гидравлическое сопротивление прибора таково, что вектор максимальной скорости по оси прибора (при схематизации его в виде цилиндрической трубы) равен вектору скорости, снятой с первоначальной эпюры распределения скоростей в сечении скважины на расстоянии  $r$  от ее оси.

При турбулентном режиме течения жидкости в трубе эпюра скорости по современным представлениям [10] описывается уравнением

$$v_r = v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^\alpha, \quad (\text{VII.61})$$

где  $\alpha = 0,9\sqrt{\lambda}$ ;  $\lambda$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $v_0$  — максимальная скорость по оси трубы;  $v_r$  — скорость на расстоянии  $r$  от оси;  $R$  — радиус трубы.

Значение коэффициента гидравлического сопротивления  $\lambda$  зависит от числа Рейнольдса, т. е. скорости потока. Однако, как показано выше, при достаточно больших  $Re$ , соответствующих автомодалной области,  $\lambda$  может быть принято постоянной величиной для данной скважины. На рис. 50 приведена схема к расчету влияния эксцентриситета прибора на его показания для данного гипотетического варианта распределения скоростей. В целях упрощения схематизации принято, что сечение прибора представляет собой круг, а его стенки имеют бесконечно малую толщину.

И вариант. Допустим, что внесение прибора в поток не искажает первоначальной эпюры распределения скоростей в стволе скважины. Найдем выражение для средней скорости потока через прибор при центральном его положении (эксцентриситет  $e=0$ )

$$v_{0, \text{ср}} = \frac{F_0}{d_{\text{п}}}, \quad (\text{VII.62})$$

где  $v_{0, \text{ср}}$  — средняя скорость потока через прибор при центральном положении его в стволе скважины;  $d_{\text{п}}$  — диаметр прибора;  $F_0$  — площадь эпюры скоростей в приборе при центральном положении его в скважине

$$F_0 = \int_{-d_{\text{п}}/2}^{d_{\text{п}}/2} v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\alpha} dr = \frac{v_0 [d_c^{\alpha+1} - (d_c - d_{\text{п}})^{\alpha+1}]}{(\alpha + 1) d_c^{\alpha}}. \quad (\text{VII.63})$$

Отсюда

$$v_{0, \text{ср}} = \frac{v_0 [d_c^{\alpha+1} - (d_c - d_{\text{п}})^{\alpha+1}]}{(\alpha + 1) d_c^{\alpha} d_{\text{п}}}. \quad (\text{VII.64})$$

При крайне эксцентричном расположении расходомера в сква-

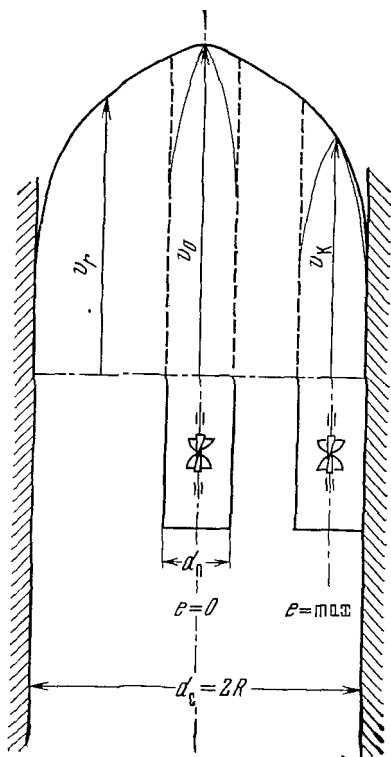


Рис 50 Схема к расчету влияния эксцентриситета прибора на точность измерения расхода потока по скважине Режим турбулентный

жине ( $e = \max$ ) средняя скорость потока через прибор определится из выражения

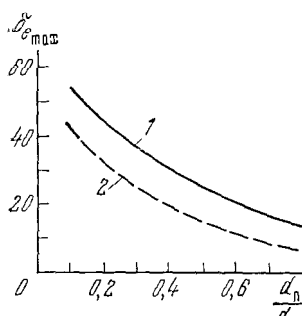
$$v_{\text{к.ср}} = \frac{F_{\text{к}}}{d_{\text{п}}}. \quad (\text{VII.65})$$

где  $v_{\text{к.ср}}$  — средняя скорость через прибор при крайне эксцентричном его положении в стволе скважины;  $F_{\text{к}}$  — площадь эпюры скоростей, заключенная в границах прибора

$$F_{\text{к}} = \int_{R-d_{\text{п}}}^R v_0 \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\alpha} dr = \frac{2^{\alpha} v_0 d_{\text{п}}^{\alpha+1}}{(\alpha+1) d_{\text{с}}^{\alpha}}, \quad (\text{VII.66})$$

Отсюда 
$$v_{\text{к.ср}} = \frac{2^{\alpha} v_0 d_{\text{п}}^{\alpha}}{(\alpha+1) d_{\text{с}}^{\alpha}}. \quad (\text{VII.67})$$

Максимальная относительная ошибка, вызванная смещением прибора относительно оси скважины, будет равна



$$\delta_e \max = \frac{v_{0.\text{ср}} - v_{\text{к.ср}}}{v_{0.\text{ср}}} = 1 - \frac{2^{\alpha} d_{\text{п}}^{\alpha+1}}{d_{\text{с}}^{\alpha+1} - (d_{\text{с}} - d_{\text{п}})^{\alpha+1}}. \quad (\text{VII.68})$$

Если  $d_{\text{п}} = d_{\text{с}}$ , то  $\delta_l^{\max} = 1 - 2^{\alpha}$ , т. е. строго говоря, не равно нулю. Следует, однако учитывать, что исходное уравнение (VII.61) является эмпирическим. Поскольку  $\alpha \ll 1$ , то можно принять, что  $\delta_l^{\max} \rightarrow 0$  с точностью исходного уравнения (VII.61).

На рис. 51 приведена зависимость  $\delta_e \max = f\left(\frac{d_{\text{п}}}{d_{\text{с}}}\right)$ , рассчитанная по (VI.68) при  $\lambda = 0,04$ .

II вариант. В отличие от предыдущего варианта в данном случае прибор обладает некоторым гидравлическим сопротивлением, поэтому, когда он помещен в поток, в нем формируется эпюра скоростей, удовлетворяющая уравнению (VII.61). При  $e = 0$  принимаем, что осевая скорость остается неизменной. Тогда средняя скорость потока, проходящего через прибор, отыщется из выражения (VII.62) при условии

$$F_0 = \int_{-d_{\text{п}}/2}^{d_{\text{п}}/2} v_0 \left(1 - \frac{2r}{d_{\text{п}}}\right)^{\alpha} dr = \frac{v_0 d_{\text{п}}}{\alpha+1}. \quad (\text{VII.69})$$

Отсюда 
$$v_{0.\text{ср}} = \frac{v_0}{\alpha+1}. \quad (\text{VII.70})$$

При крайне эксцентричном расположении расходомера ( $e = \max$ ) средняя скорость в сечении прибора будет определена по (VII.65) при условии

$$F_K = v_0 \left(1 - \frac{d_c - d_{\pi}}{d_c}\right)^{\alpha} \int_{-d_{\pi}/2}^{d_{\pi}/2} \left(1 - \frac{2r}{d_{\pi}}\right)^{\alpha} dr = \frac{2^{\alpha} v_0 d_{\pi}^{\alpha+1}}{(\alpha+1) d_c^{\alpha}}. \quad (\text{VII.71})$$

Отсюда

$$v_{\text{к.ср}} = \frac{2^{\alpha} v_0 d_{\pi}^{\alpha}}{(\alpha+1) d_c^{\alpha}}. \quad (\text{VII.72})$$

Максимальная относительная ошибка, вызванная смещением прибора от оси скважины, будет в этом случае равна

$$\delta_e \max = \frac{v_{0.\text{ср}} - v_{\text{к.ср}}}{v_{0.\text{ср}}} = \frac{d_c^{\alpha} - 2^{\alpha} d_{\pi}}{d_c^{\alpha}}. \quad (\text{VII.73})$$

При  $d_{\pi} = d_c$ , как и в предыдущем случае,  $\delta_e \max = 1 - 2^{\alpha} \rightarrow 0$ , т. е. удовлетворяется требование контроля с точностью задания исходного уравнения для эпюры скоростей в турбулентном режиме.

На рис. 51 приведена зависимость  $\delta_e \max = f\left(\frac{d_{\pi}}{d_c}\right)$ , рассчитанная по (II.73) для  $\lambda = 0,04$ . Сравнение полученных графиков  $\delta_e \max = f\left(\frac{d_{\pi}}{d_c}\right)$  для турбулентной области показывает, что с ростом гидравлического сопротивления прибора погрешность в измерении скорости, обусловленная смещением его от оси скважины, возрастает. Этот вывод полностью согласуется с результатами рассмотрения ламинарной области. Он показывает также, что необходимы специальные конструктивные меры для фиксации положения расходомера относительно оси скважины независимо от режима течения жидкости и практически для всего диапазона отношений  $\frac{d_{\pi}}{d_c}$ . Поэтому в конструкции современных скважинных расходомеров предусматривается центратор, представляющий собой обычно три рессоры, фиксирующие положение оси расходомера, близкое к гидравлической оси скважины.

При работе такого расходомера часть потока воды проходит через измерительный канал скважинного прибора, а часть — в кольцевом зазоре между ним и стенкой скважины. Рассмотрим некоторые положения, связанные с необходимостью учета данного обстоятельства для получения общей величины расхода потока воды по скважине на глубине измерения. В соответствии с указанной схемой расположения прибора в скважине условие неразрывности потока дает следующее уравнение:

$$vW = v_{\pi}W_{\pi} + v_3W_3, \quad (\text{VII.74})$$

где  $v$  — средняя скорость потока, проходящего через открытое сечение скважины  $W$ ;  $v_{\text{п}}$  — средняя скорость потока в приборе с проходным каналом сечения  $W_{\text{п}}$ ;  $v_3$  — средняя скорость потока в кольцевом зазоре с сечением  $W_3$ .

Движение воды в интервале скважины, где расположен прибор, можно рассматривать, как поток по двум параллельным ветвям [57]. Одной из них является проходной канал прибора, второй — кольцевой зазор между ним и стенкой скважины. Узловыми точками такой системы являются краевые области, в которых смыкаются оба потока. Потери напора в параллельных ветвях одинаковы

$$\Delta h_{\text{п}} = \Delta h_3, \quad (\text{VII.75})$$

где  $\Delta h_{\text{п}}$  — потеря напора в канале прибора;  $\Delta h_3$  — то же, в кольцевом зазоре.

Если выразить потери напора через скоростной напор, то (VII.75) может быть записано в виде

$$\frac{v_{\text{п}}^2}{2g} \lambda_{\text{п}} = \frac{v_3^2}{2g} \lambda_3, \quad (\text{VII.76})$$

где  $\lambda_{\text{п}}$ ,  $\lambda_3$  — коэффициенты гидравлического сопротивления соответственно проходного канала прибора и кольцевого зазора. Из (VII.76) следует

$$v_3 = v_{\text{п}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_3}}. \quad (\text{VII.77})$$

Подстановка (VII.77) в (VII.74) дает

$$vW = v_{\text{п}}W_{\text{п}} + v_{\text{п}}W_3 \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_3}}. \quad (\text{VII.78})$$

Переходя от скорости к расходу, имеем

$$q = q_{\text{п}} \left( 1 + \frac{W_3}{W_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_3}} \right), \quad (\text{VII.79})$$

Введя обозначение

$$k_d = 1 + \frac{W_3}{W_{\text{п}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}}}{\lambda_3}},$$

окончательно имеем

$$q = q_{\text{п}} \cdot k_d \quad (\text{VII.80})$$

Очевидно, что при измерениях в скважине только величины  $q_{\text{п}}$ , для расчета общей величины расхода потока на данной глубине необходимо знать значения коэффициента  $k_d$ . Величина этого коэффициента зависит от многих геометрических и гидравлических факторов, которые с достаточной точностью не могут быть известны априори. Поэтому теоретический расчет этого ко-

эфициента не представляет интереса и он определяется экспериментально на гидравлическом стенде со сменными рабочими трубами различного диаметра.

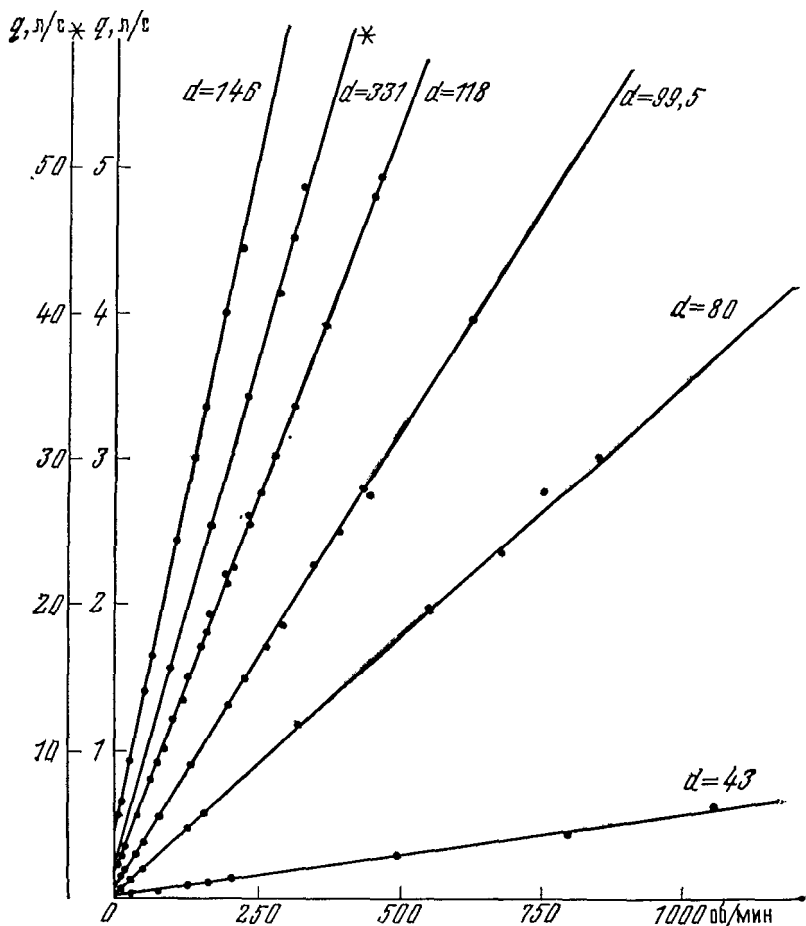


Рис. 52 Экспериментальные градуировочные зависимости расходомера ТСПГ-43 для труб различного диаметра

На рис. 52 приведены фактические результаты измерения величин расходов через центрированный прибор в трубах различного диаметра для расходомера ТСПГ-43 с наружным диаметром 43 мм. В этих экспериментах использован диапазон общих расходов, достаточный для выхода в автономную область. Значения общего расхода через сечение рабочей трубы определялось объемным методом с относительной погрешностью не более  $\pm 1\%$ .

\* Прибор ТСПГ-43 — экспериментальный прототип РЭС-2.

Значения расхода через прибор нанесены на рис. 52 в показаниях регистрирующего устройства, т. е. в об/мин. На основании этих данных построена номограмма (рис. 53) для оценки поправочного коэффициента  $k_d$  на диаметр скважины, учитывающая

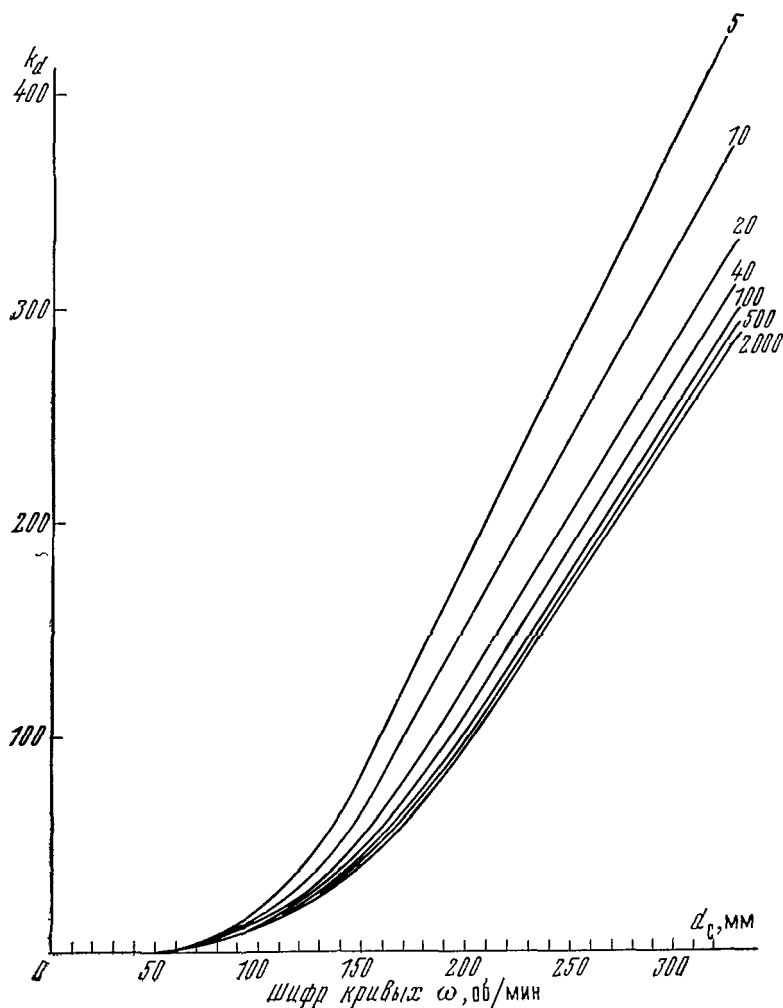


Рис 53 Номограмма для оценки поправок на диаметр скважины для прибора ТСПГ-43

различные области гидравлического режима течения воды при данных расхода потока и сечении, т. е. число  $Re$ . Способ построения номограммы очень прост. Для каждого из заданных диаметров рабочих труб стенда определяются отношения  $k_{di} = q_i / q_{ni}$  для всего диапазона использованных расходов. Полученное семейство точек в координатах  $d_c, k_d$  осредняется кривыми с шифром  $\omega$

(об/мин), соответствующим показаниям прибора. Такой способ представления номограммы удобен тем, что обеспечивает: а) большую точность съема искомой величины при прочих получаемых непосредственно из опыта данных ( $\omega$  и  $d_c$ ); б) оперативность их использования в процессе расходометрических измерений; в) возможность автоматизации вычислительных операций.

Рассмотрение приведенной номограммы показывает, что поправочный коэффициент  $k_d$  очень чувствителен к изменению диаметра скважины. Поэтому целесообразно проанализировать возможные последствия для оцениваемых величин расходов потока, связанные с неточностью определения диаметра скважины. Очевидно также, что такой анализ поможет выработать методические критерии для обеспечения удовлетворительной погрешности измерения расхода.

Как и всякие измеряемые величины,  $q_n$  и  $d_c$  наделены погрешностями. При выполнении соответствующих методических требований, выявленных в предыдущем разделе, первая из указанных величин может быть получена с заданной точностью. Таким образом, остается выяснить возможность оценки и управления погрешностью в конечном результате определения общего расхода потока по скважине, дополнительно зависящей от способа и точности измерения диаметра скважины.

Диаметр скважины измеряется каверномером. Обычные конструкции каверномеров имеют три чувствительных рычага и преобразователь, подающий на регистрацию значение разности потенциалов, пропорциональное диаметру описанной окружности\*. Естественным, что при таком способе измеренный диаметр скважины лишь приближенно отвечает его истинному значению. Связь между показанием регистрирующего прибора  $U$  и диаметром скважины устанавливается в эталонных кольцах и имеет вид прямой типа

$$d = aU + b. \quad (\text{VII.81})$$

В рядовых измерениях каверномером она служит масштабной шкалой диаграммы, с которой снимают значения диаметра скважины. Эта функция получается как результат корреляции между величинами  $d$  и  $U$ . Параметры  $a$  и  $b$ , определенные по методу наименьших квадратов, равны

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n d_i U_i - \sum_{i=1}^n d_i \sum_{i=1}^n U_i}{n \sum_{i=1}^n U_i^2 - \left( \sum_{i=1}^n U_i \right)^2}, \quad (\text{VII.82})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n d_i - a \sum_{i=1}^n U_i}{n}. \quad (\text{VII.83})$$

---

\* В последние годы киевским заводом «Геофизприбор» освоен выпуск каверномера, имеющего шесть чувствительных рычагов.



где  $n$  — число опытных точек со значениями  $d_1, U_1, d_2, U_2, \dots$ , взятых в расчет корреляционной функции.

Поскольку функция (VII.81) является эталонной, то естественно предъявить к ней требования высокой надежности оценки параметров  $a$  и  $b$ . Это можно осуществить путем многократных измерений  $d_i$  и  $U_i$  в одних и тех же кольцах. Тогда, считая эталонную функцию достоверной, для диаметра скважины, оцениваемого по диаграмме с масштабной шкалой (VII.81), будем иметь предельную абсолютную погрешность

$$\varepsilon_d = \theta_d + k\Delta_d, \quad (\text{VII.84})$$

где

$$\theta_d = \frac{\partial d}{\partial U} \theta_U = a\theta_U; \quad (\text{VII.85})$$

$$\Delta_d = \sqrt{\left(\frac{\partial d}{\partial U} \Delta_U\right)^2} = a\Delta_U. \quad (\text{VII.86})$$

Таким образом, и систематическая, и среднеквадратичная погрешности измерения диаметра скважины на основе (VII.81) пропорциональны параметру  $a$ , т. е. обратно пропорциональны чувствительности регистратора. Если известна его систематическая погрешность, то значение  $\theta_d$  может быть без труда исключено из результата. Зная среднеквадратичную погрешность регистратора по результатам эталонировки в кольцах, можно найти предельную абсолютную погрешность измерения диаметра скважины

$$\varepsilon_d = k\Delta_U. \quad (\text{VII.87})$$

Однако это только инструментальная погрешность измерения диаметра скважины при данном единичном каротаже. Фактический (гидравлический или приведенный) диаметр скважины будет отличаться от инструментального, полученного по (VII.81), но даже при многократном каротаже можно ожидать наличие как систематического расхождения, так и случайного. Поэтому в общем случае предельная абсолютная погрешность в определении диаметра скважины будет равна

$$\varepsilon_{dc} = k\Delta_U + \theta_{dc} + k\Delta_{dc}. \quad (\text{VII.88})$$

Таким образом, истинный диаметр скважины может быть записан как сумма

$$d_c = d + k\Delta_U + \theta_{dc} + k\Delta_{dc}. \quad (\text{VII.89})$$

В формуле (VII.89) предполагается, что величины погрешностей установлены путем многократных измерений и могут рассматриваться как постоянные. В действительности же систематическая и случайная части погрешности в оценке диаметра скважины при разовом каротаже неизвестны. Поэтому в каждом отдельном случае эти погрешности можно рассматривать как независимые случайные величины; сумма их абсолютных значений должна быть

равна предельной погрешности. Таким образом,  $\varepsilon_{d_c}$  является предельной систематической погрешностью в оценке  $d_c$ .

Поскольку тело расходомера перекрывает часть сечения скважины, проходное ее сечение несколько меньше площади, определяемой истинным диаметром  $d_c$ . Обозначим наружный диаметр корпуса глубинного прибора через  $d_{п.н}$ . Если допустить, что градуировочные характеристики расходомера и значение диаметра скважины не содержат погрешностей, то истинную величину расхода потока по скважине с учетом сделанных обозначений можно записать в виде

$$q = q_{п} \left( 1 + \frac{d_c^2 - d_{п.н}^2}{d_{п.в}^2} \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}} \right). \quad (\text{VII.90})$$

С учетом возможных предельных абсолютных погрешностей определения  $q_{п}$  и  $d_c$  предельная абсолютная погрешность определения расхода будет равна

$$\begin{aligned} \varepsilon_q = \frac{\partial q}{\partial q_{п}} \varepsilon_{q_{п}} + \frac{\partial q}{\partial d_c} \varepsilon_{d_c} = & \left( 1 + \frac{d_c^2 - d_{п.н}^2}{d_{п.в}^2} \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}} \right) \varepsilon_{q_{п}} + \\ & + \frac{2d_c q_{п}}{d_{п.в}^2} \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}} \cdot \varepsilon_{d_c}. \end{aligned} \quad (\text{VII.91})$$

Предельная относительная погрешность в измерении расхода будет равна

$$\delta_q = \frac{\varepsilon_q}{q} = \delta_{q_{п}} + \frac{2d_c \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}}}{d_{п.в}^2 + (d_c^2 - d_{п.н}^2) \sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}}} \cdot \varepsilon_{d_c}. \quad (\text{VII.92})$$

Выразив  $\sqrt{\frac{\lambda_{п}}{\lambda_3}}$  через поправочный коэффициент  $k_d$  номограммы, получим

$$\varepsilon_q = k_d \cdot \varepsilon_{q_{п}} + \frac{2d_c q_{п} (k_d - 1)}{d_c^2 - d_{п.н}^2} \cdot \varepsilon_{d_c}; \quad (\text{VII.93})$$

$$\delta_q = \delta_{q_{п}} + \frac{2d_c (k_d - 1)}{k_d (d_c^2 - d_{п.н}^2)} \cdot \varepsilon_{d_c}. \quad (\text{VII.94})$$

Последнюю формулу удобно также представить в таком виде:

$$\delta_q = \delta_{q_{п}} + \frac{2(k_d - 1)}{k_d (1 - d_{п.н}^2/d_c^2)} \delta_{d_c}. \quad (\text{VII.95})$$

Приведенные формулы абсолютной и относительной погрешности позволяют сделать ряд выводов.

1. При прочих неизменяющихся условиях значения  $\varepsilon_q$  и  $\delta_q$  возрастают с увеличением значения  $\sqrt{\frac{\lambda_{\Pi}}{\lambda_3}}$ , определяющего выбор

кривой на номограмме  $k_d$ , т. е. зависят от области гидравлического режима течения. Уменьшения этого члена можно добиться путем улучшения класса обработки внутренней поверхности водоканала прибора и его деталей, сокращения количества и габаритов различных частей внутри прибора, а также уменьшения его длины. Необходимо также по возможности уменьшить толщину стенок скважинного прибора. Наличие центратора способствует усилению турбулизации потока в кольцевом зазоре, что также ведет к поставленной цели. Однако габариты центратора должны быть небольшие, иначе он начнет действовать как пакер. Предельный случай центратора — абсолютный пакер, когда  $\lambda_3 \rightarrow \infty$ , а  $\varepsilon_q \rightarrow \varepsilon_{q\Pi}$ , но это вызывает потерю напора, как минимум равную

$$\Delta h = \frac{v_{\Pi}^2}{2g} = \frac{8q^2}{\pi^2 g d_{\Pi, \text{в}}^4}. \quad (\text{VII.96})$$

Например, при  $q=1$  л/с и  $d_{\Pi, \text{в}} \approx 25$  мм минимально возможная потеря давления составит  $200 \cdot 9,8$  Па. Для реальных конструкций приборов с пакерующими устройствами это значение потерь увеличивается в несколько раз. Однако даже из приведенного расчета видно, что возникновение таких потерь нежелательно при гидродинамических исследованиях гидрогеологических скважин методом расходомерии. В связи с переменным воздействием на заданное возбуждение скважины они не поддаются контролю и учету. Эти требования могут и должны быть учтены при конструировании расходомеров и разработке технологии их производства.

2. Абсолютная и относительная погрешности определения расхода потока зависят от соотношения диаметров прибора и скважины, что проанализировать в общем виде довольно трудно, так как эта зависимость опосредована значением коэффициента  $k_d$ , зависящего от  $d_{\Pi\Pi}/d_c$  расхода потока через прибор. Упростить задачу можно, допустив условие постоянства  $d_{\Pi\Pi}$ . Так, если принять конструктивные параметры расходомера ТСПГ-43, а также условие его работы при расходе по скважине 5 л/с, можно получить зависимости  $\varepsilon_q = f\left(\frac{d_{\Pi\Pi}}{d_c}\right)$  и  $\delta_q = f\left(\frac{d_{\Pi\Pi}}{d_c}\right)$ , которые вполне удовлетворяют поставленной задаче. По существу это преобразованные зависимости  $\varepsilon_q$  и  $\delta_q$  от диаметра скважины, но для интересующих нас вопросов они менее наглядны

На рис. 54 приведены зависимости  $\varepsilon_q = f\left(\frac{d_{\Pi\Pi}}{d_c}\right)$  при заданных предельных погрешностях  $\varepsilon_{q\Pi}$  и  $\varepsilon_{d_c}$ . Расчет проведен по формуле (VII.93). Из этих графиков видно, что предельная абсолютная погрешность определения расхода потока по скважине сложным образом зависит от отношения  $d_{\Pi\Pi}/d_c$ . Однако,

очевидно, что при значениях  $\frac{d_{п.н}}{d_c} > 0,3$  погрешность  $\varepsilon_q$  в меньшей степени зависит от инструментальной погрешности  $\varepsilon_{q_{п}}$  и приобретает тенденцию к стабилизации с уменьшением  $\varepsilon_{d_c}$ .

Таким образом, на основе рассмотрения рис. 54 можно сделать следующие выводы.

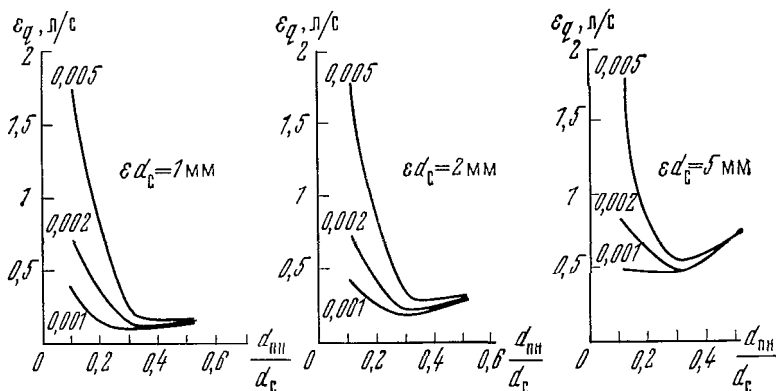


Рис. 54. Зависимость  $\varepsilon_q = f\left(\frac{d_{п.н}}{d_c}\right)$  при заданных  $\varepsilon_{q_{п}}$  и  $\varepsilon_{d_c}$ .

Шифр кривых  $\varepsilon_{q_{п}}$ , л/с

1. С целью выполнения измерений расхода потока с минимально возможной абсолютной погрешностью при прочих заданных условиях следует использовать расходомер с наружным диаметром не менее  $0,3 d_c$ .

2. Значение предельной абсолютной погрешности при  $\frac{d_{п.н}}{d_c} > 0,3$  практически пропорционально  $\varepsilon_{d_c}$ . Поэтому в качестве дальнейшей меры повышения точности расходометрических измерений в режиме  $\varepsilon_q \rightarrow \text{const}$  следует считать путь снижения погрешности  $\varepsilon_{d_c}$ . Такая возможность может быть достигнута при использовании каверномеров с шестью или больше чувствительными элементами, дающими средневзвешенное по площади значение диаметра [5].

На рис. 55 показаны зависимости  $\delta_q = f\left(\frac{d_{п.н}}{d_c}\right)$  при фиксированной предельной относительной погрешности  $\delta_{q_{п}} = 2\%$  и различных значениях абсолютной погрешности измерения диаметра скважины. Расчет проведен по формуле (VII.94). Из приведенных на рис. 55 графиков видно, что  $\delta_q$  почти линейно возрастает с увеличением  $\frac{d_{п.н}}{d_c}$ . При фиксированном значении  $d_{п.н}$  это означает,

что  $\delta_q$  убывает с увеличением диаметра скважины, но уже нелинейно.

В паспортных характеристиках современных каверномеров указывается предельная абсолютная погрешность. Поэтому при работе в режиме  $\delta_{qп} = \text{const}$  при заданной  $\varepsilon_{dс}$  можно добиться желаемой точности измерения расхода, используя расходомер, удовлетворяющий определенному соотношению  $d_{п.п}/d_c$ . Например,

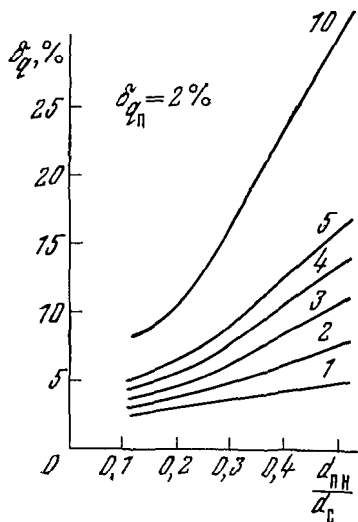


Рис 55 Зависимость  $\delta_q = f\left(\frac{d_{п.п}}{d_c}\right)$

при заданных  $\delta_{qп}$  и  $\varepsilon_{dс}$

Шифр кривых  $\varepsilon_{dс}, \text{ мм}$

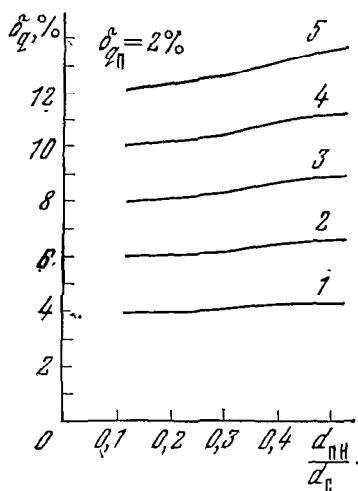


Рис 56. Зависимость  $\delta_q = f\left(\frac{d_{п.п}}{d_c}\right)$

при заданных  $\delta_{qп}$  и  $\varepsilon_{dс}$

Шифр кривых  $\delta_{qп}, \%$

для РЭС-2, ПС-56 измерение расхода с погрешностью не более 10% при  $\delta_{qп} = 2\%$ ,  $\varepsilon_{dс} = 5 \text{ мм}$  можно обеспечить в скважинах, имеющих диаметр более 137 мм. Дальнейшее снижение предельной относительной погрешности может идти по пути как уменьшения диаметра прибора, так и повышения точности каверномеров.

По технологическим условиям проведения расходометрических исследований в работающих скважинах отношение  $\frac{d_{п.п}}{d_c}$  не должно быть больше 0,3 диаметра водоподъемной колонны. Поэтому первый путь может показаться желательным. Однако уменьшению диаметра скважинного прибора приводит к резкому повышению порога чувствительности, что фактически загроубляет его рабочий диапазон. Следовательно, первый путь, как и выше, является более радикальным для снижения абсолютной погрешности каверномеров.

Наконец, на рис. 56 приведены зависимости  $\delta_q = f\left(\frac{d_{п.н}}{d_c}\right)$  при фиксированных значениях  $\delta_{q_{п}}$  и  $\delta_{d_c}$ . Расчет произведен по формуле (VII.95),  $\delta_{q_{п}}$  входит в нее постоянным слагаемым, поэтому форма зависимости полностью определяется вторым ее членом.

Из графиков на рис. 56 видно, что в этом случае  $\delta_q$  практически не зависит от  $\frac{d_{п.н}}{d_c}$ , а снижение погрешности  $\delta_{d_c}$  на 1% уменьшает погрешность  $\delta_q$  на 2%. Постоянство погрешности вне зависимости от скважинных условий весьма ценно при проведении исследований в скважинах с телескопической конструкцией, так как в этом случае  $\frac{d_{п.н}}{d_c}$  является переменной величиной: к забою она увеличивается при одновременном уменьшении измеряемой величины расхода. Как отмечено выше, увеличение этого отношения при заданной  $\epsilon_{d_c}$  ведет к росту относительной погрешности. Поэтому способ измерения диаметра скважины в режиме  $\delta_{d_c} = \text{const}$  является единственным средством обеспечения измерений расхода во всем рабочем диапазоне с постоянной и удовлетворительной относительной погрешностью.

Дополнительно отметим, что с уменьшением расхода потока по скважине абсолютная и относительная погрешности его оценки увеличиваются, что хорошо видно на номограмме (см. рис. 53). При равном диаметре скважины с уменьшением  $\omega$  поправка  $k_d$  заметно увеличивается. Поэтому в неработающих и реагирующих скважинах для достижения более высокой точности измерения расхода при современной точности каверномеров следует пользоваться приборами, обеспечивающими условие  $\frac{d_{п.н}}{d_c} \geq 0,3$ , а при определенных условиях (см. раздел 3) — расходомерами с пакером.

### 3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТИПОРАЗМЕРОВ СКВАЖИННЫХ ПРИБОРОВ

Под областью применения скважинных приборов различных типоразмеров понимаются максимальные расходы, при которых значения гидравлических потерь находятся в допустимых пределах. При этом задача может быть решена в двух вариантах.

Первый вариант. В более жесткой постановке задачи за допустимое значение гидравлических потерь в месте установки прибора может быть принято значение абсолютной погрешности измерения изменений уровня с помощью уровнемеров при гидродинамическом исследовании скважины. В справочниках и руководствах для этого вида работ значение указанной погрешности допускается не более  $\pm 1$  см. По существу имеются в виду погрешности отсчета значения уровня с помощью современных уровне-

ров в реальных условиях ведения откачки из скважины. Принимая это значение погрешности в качестве допустимой величины потерь напора на приборе и условно считая его влияние на поток равным влиянию диафрагмы с коэффициентом линейного увеличения  $C$ , найдем максимальное значение расхода через прибор

$$q_{п\max} = \frac{\pi d_{п.в}^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta h}{C}}. \quad (\text{VII.97})$$

Коэффициент линейного увеличения значения  $\Delta h$  вводится в связи с аппроксимацией зависимости  $\Delta h = f(q_{п})$  уравнением (VII.96). Он может быть установлен экспериментально для реальных конструкций приборов. Диапазон его значений, видимо, от 2 до 10. Для дальнейших расчетов примем его равным 4. Поскольку  $C$  стоит под корнем, эта условность не приведет к принципиальным погрешностям в определении  $q_{п\max}$ . Для реальных конструкций это значение может быть уточнено. Значение  $d_{п.в}$  приведенного диаметра водоканала прибора  $d_{п.в}$  принимаем по геометрическим параметрам конструкции в центральном сечении датчика. Аналогичным образом эту задачу можно было бы поставить относительно максимального расхода потока через сечение скважины. Однако это менее удобно в связи с необходимостью введения новой переменной — диаметра скважины. Если учесть, что потеря напора в параллельных ветвях одинакова, эту задачу более целесообразно рассматривать только для водоканала прибора. Максимально допустимое значение расхода через сечение скважины получим, как обычно, с помощью номограммы на рис. 53.

Подставив необходимые значения в (VII.97), получим следующие примерные величины  $q_{п\max}$  для различных типоразмеров скважинных приборов:

Наружный диаметр скважинного прибора, мм .	36	56	70	110
Максимально допустимый расход через прибор, л/с . . . . .	0,1	0,2	0,6	1,5

Второй вариант. Более правильно за допустимое значение гидравлических потерь принять такую его величину, которая по сравнению с величиной заданного понижения при откачке не превышает допустимого значения относительной погрешности. Это значение потерь равно

$$\Delta h_{\max} = \frac{8Cq_{п}^2}{g\pi^2 d_{п.в}^4}. \quad (\text{VII.98})$$

Пусть, допустимая величина относительной погрешности измерения понижения равна  $\delta_s$ . Тогда минимально допустимое понижение будет равно

$$S_{\min} = \frac{\Delta h_{\max}}{\delta_s} = \frac{8Cq_{п}^2}{g\pi^2 d_{п.в}^4 \delta_s}. \quad (\text{VII.99})$$

Отсюда найдем максимально допустимое значение расхода через прибор

$$q_{п \max} = \frac{\pi d_{п.в}^2}{4} \sqrt{\frac{2g\delta_S S_{\min}}{C}}. \quad (\text{VII.100})$$

При заданном значении  $\delta_S$  можно установить и величину  $S_{\min}$

$$S_{\min} = 1 - \delta_S. \quad (\text{VII.101})$$

Тогда

$$q_{п \max} = \frac{\pi d_{п.в}^2}{4} \sqrt{\frac{2g\delta_S (1 - \delta_S)}{C}}. \quad (\text{VII.102})$$

Принимая  $\delta_S = 0,1$ , получим значения максимально допустимых расходов через водоканал различных типоразмеров расходомеров.

Наружный диаметр прибора, мм . . . . .	36	56	70	110
Максимально допустимый расход через прибор, л/с . . . . .	0,3	0,8	1,9	4,2

Максимально допустимая величина дебита скважины, обеспечивающая указанные условия работы расходомера, может быть определена по формуле

$$Q_{\max} = k_d q_{п \max}. \quad (\text{VII.103})$$

Найдем область применения различных типоразмеров скважинных приборов исходя из оценки возможной водообильности разреза скважины, выраженной через удельный дебит

$$\rho_{\max} = \frac{Q_{\max}}{S_{\min}} = \frac{\pi k_d d_{п.в}^2}{4} \sqrt{\frac{2g\delta_S}{C(1 - \delta_S)}}. \quad (\text{VII.104})$$

Коэффициент  $k_d$  определяет диаметр скважины. Выберем из номограммы, представленной на рис. 53, кривую, дающую наименьшее значение поправочных коэффициентов на диаметр для данного типоразмера прибора, а допустимую погрешность  $\delta_S$  примем равной 0,1. При этих значениях номограмма для определения области применения различных типоразмеров скважинных приборов в зависимости от априорной оценки удельного дебита скважины и ее диаметра может быть представлена в виде кривых на рис. 57.

Порядок пользования этой номограммой таков. По известному диаметру скважины для принятого типоразмера прибора определяется значение  $k_d$ . Затем по номограмме определяется максимально допустимое значение удельного дебита. Если оно превышает ожидаемое, то применение данного типа расходомера отвечает поставленному условию. В противном случае следует проанализировать технические возможности применения расходомера другого диаметра. В связи с большим порогом чувствительности и недостаточной точностью беспакерных тахометрических расходомеров в работе [53] рекомендуется дополнить их конструк-



цию пакерующими элементами. Очевидно, что область их применения должна быть уточнена в соответствии с приведенными рас-

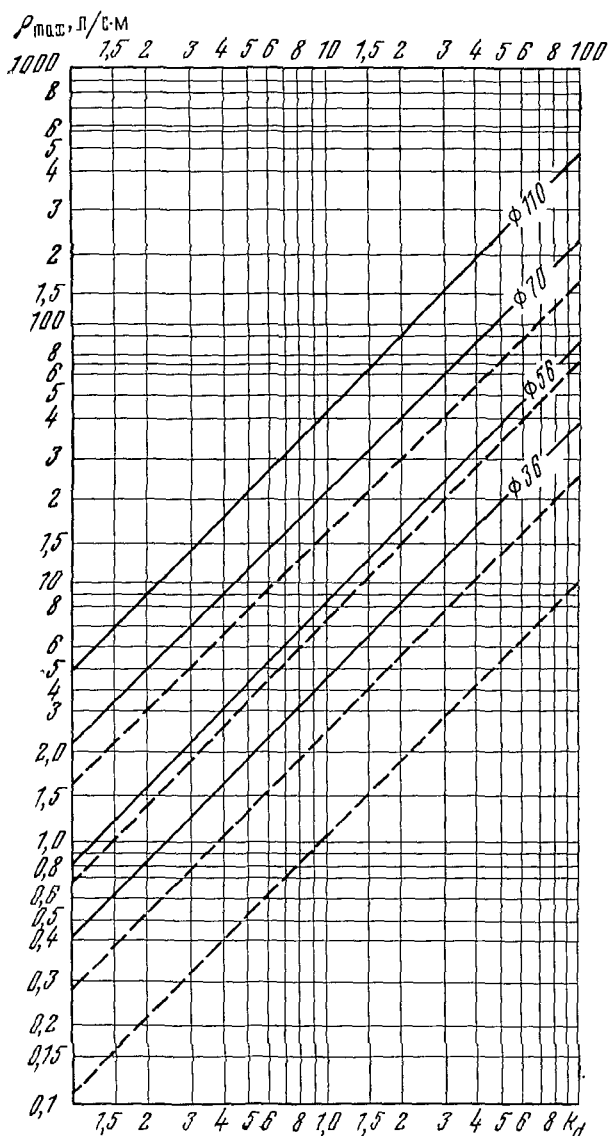


Рис. 57 Номограмма для выбора размера скважинных расходомеров в зависимости от водообильности и диаметра скважины.

Сплошные линии для  $\delta S=0,1$ , штриховые — для  $\delta S=0,01$

четами. При выполнении условия  $Q \leq q_{\text{пmax}}$  прибор с пакером может рассматриваться как измеритель расхода, пригодный для

гидродинамических исследований скважины с выполнением требований по первому или второму варианту, при невыполнении этого условия — как индикатор изменений расхода потока по стволу, пригодный для решения качественных задач расходомерии (выявления интервалов притока и поглощения жидкости).

#### 4. ОСОБЕННОСТИ ФОРМЫ РАСХОДОГРАММЫ НА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ СТВОЛА СКВАЖИНЫ

Под местными сопротивлениями понимаются интервалы изменения диаметра ствола скважины в связи с использованием телескопических конструкций обсадных труб или наличием каверн различной протяженности. Опыт показал, что расходограммы, полученные в указанных интервалах, имеют особенности, отражающие соотношение геометрических характеристик канала ствола скважины и измерительного устройства и ограничивающие использование номограммы на рис. 53.

Вопрос о форме расходограммы на этих сопротивлениях в связи со сложностью задачи решался с применением гидравлических моделей\*. Были использованы интервалы смены диаметров обсадных труб в работающих скважинах и специальные лабораторные установки. В скважинах наблюдения выполнялись в интервалах смены диаметров обсадных труб как в восходящем, так и нисходящем потоках приборами длиной 22, 40, 55 и 75 см при расходах потока от 1 до 5,5 л/с. Измерения проводились с шагом 5—10 см. Отношения диаметров выходного и входного сечений составляли 1,16; 1,18; 1,22; 1,23; 1,28; 1,29; 1,3; 1,6. На лабораторной установке воспроизводились как одиночные объекты смены диаметров, так и каверны. Имитация последних достигалась с помощью вставок отрезков труб различного диаметра и длины. Максимальное отношение диаметров в этом случае достигало 2,5. Протяженность каверны изменялась от 0,5 до 4 м, что при длине прибора 0,5 и 0,7 м обеспечивало следующие отношения между длиной каверны  $l_k$  и прибора  $l_n$ : 0,7; 1,4; 2,5; 3,2; 3,5; 5,0; 5,7.

В табл. 15 приведены сведения о проведенных экспериментах в скважинах и лабораторной установке для выяснения формы расходограммы в интервале смены круговых сечений труб при  $l_k \gg l_n$  при стабильном значении расхода потока. Графики на рис. 58 построены по фактическим материалам эксперимента, приведенным в табл. 15. Расходограммы исследованных интервалов нанесены для случая отнесения «точки записи» к середине скважинного снаряда.

В табл. 16 приведены сведения об экспериментах, проведенных в лабораторной установке с целью выяснения формы расходограмм каверн. На рис. 59 приведены фактические материалы выполненных наблюдений.

\* Экспериментальные работы и их обработка выполнены М. С. Ровинским.

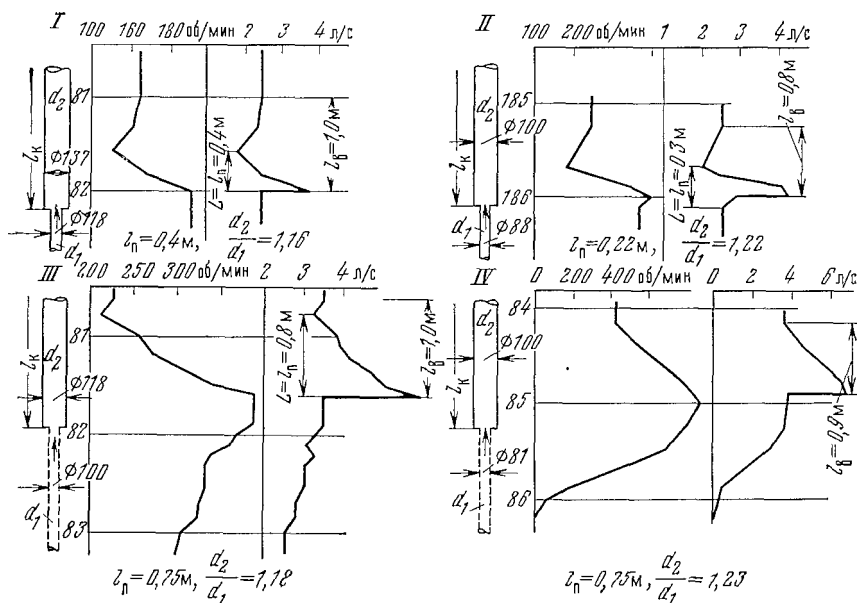


Рис. 58. Экспериментальные расходограммы в местах сочленения труб различного диаметра. По М. С. Ровинскому

I — скв. 123, участок Оболонь, II — скв. 123, участок Русановские сады, III — скв. 118, участок Русановские сады, IV — скв. 119, участок Оболонь, V — скв. 162/163, участок Светличное, VI — там же; VII — скв. 157, участок Гидропарк, VIII — скв. 151, участок Погребы, IX — скв. 152, участок Погребы, X — лабораторная установка

Анализ проведенных экспериментов позволил установить характерные формы расходограмм в интервалах смены круговых сечений и в кавернах в зависимости от направления потока и расположения «точки записи». Приведем основные выводы.

Таблица 15

Участок работ	Номер скважины	Диаметр скважинного прибора, мм	Длина прибора, м	Расход потока, л/с	$\frac{d_2}{d_1}$	Длина интервала влияния помех, м
Оболонь	123	34	0,4	3,5	1,16	1,0
Русановские сады	118	34	0,75	3,5	1,18	1,0
То же	117	34	0,22	2,5	1,22	0,9
Оболонь	119	34	0,75	3,5	1,23	0,9
Погребы	151	34	0,75	5,5	1,28	1,0
Гидропарк	157	70	0,55	5,5	1,29	0,75
Погребы	152	34	0,75	1,0	1,30	1,0
Светличное	162/163	34	0,75	1,25	1,6	1,0
»	162/163	34	0,75	5,5	1,6	1,0
Лабораторная установка	—	—	0,75	1,0	2,5	1,0

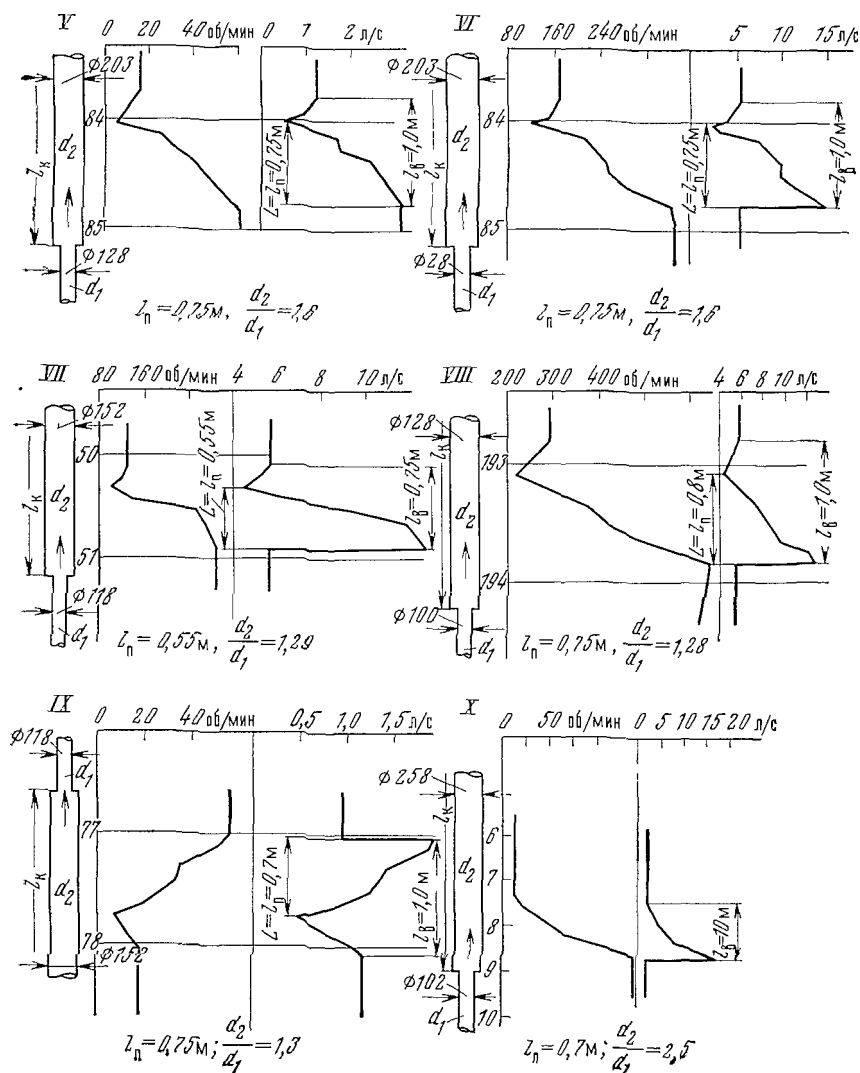


Таблица 16

Диаметр сква- жинного сна- ряда, м	Расход потока, л/с	Длина сква- жинного прибора, м	Протяженность каверны, м	$\frac{l_k}{l_p}$	Протяженность интервала влияния помех, м
70	0,45	0,7	0,5	0,7	0,5
70	0,3	0,7	1,0	1,4	1,0
70	0,7	0,7	1,75	2,5	1,75
70	1,0	0,7	2,25	3,2	2,25
34	1,8	0,5	1,75	3,5	1,0
34	2,8	0,5	2,5	5,0	1,0
70	1,55	0,7	4,0	5,7	1,0

1 При переходе потока из меньшего сечения в большее, когда длина каверны превышает 3,5 длины прибора, стабилизация измеряемого потока наступает на расстоянии примерно 1 м от места смены сечений. В указанном интервале использование номограммы, приведенной на рис. 53, для учета диаметра скважины приводит к неверным результатам.

2. Если длина каверны меньше 3,5 длины прибора, то на протяжении всей каверны стабилизация измеряемого потока отсутствует. Применение упомянутой номограммы для учета диаметра скважины в интервалах таких каверн также приводит к искаженным результатам.

3. При входе потока в меньшее сечение из большего стабилизация измеряемого потока наступает в непосредственной близости от места смены сечений. В этих условиях использование упомянутой номограммы дает приемлемые результаты.

С целью более строгого учета диаметра скважины в зонах

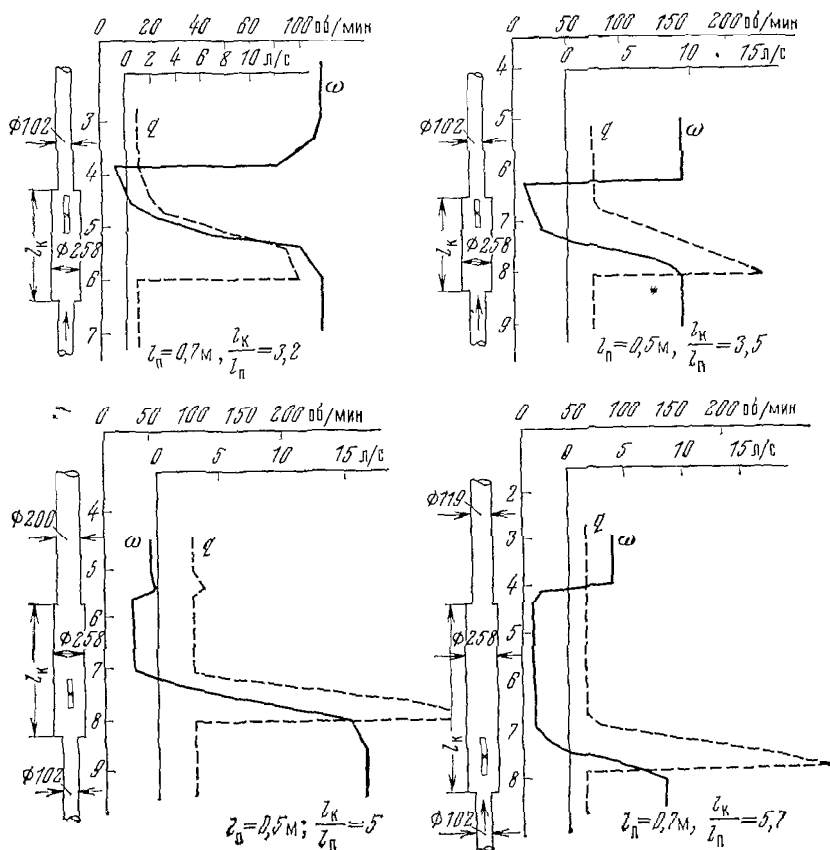


Рис. 59. Экспериментальные расходограммы в моделях каверн. По М. С. Ровинскому

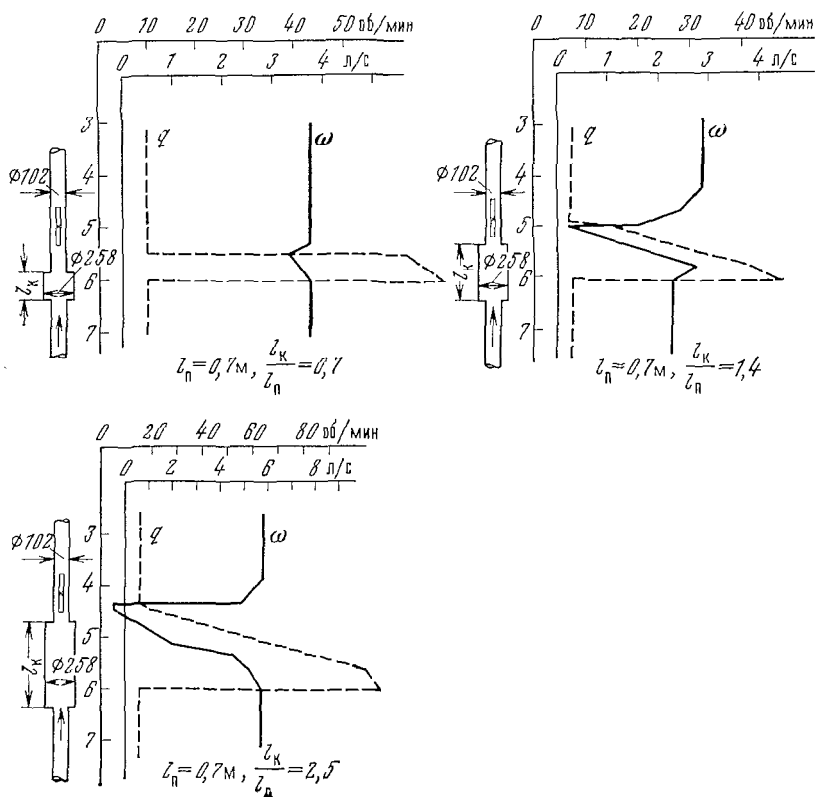
помех, связанных с длиной каверны и сменой сечений, была построена номограмма по результатам обобщения экспериментальных данных. Принцип построения номограммы следующий. По графикам  $\omega = f(z)$  в интервалах, где отсутствовала стабилизация измеряемого потока, рассчитана величина

$$C = \frac{\omega - \omega_{\text{эф}}}{\omega_{\text{вых}} - \omega_{\text{эф}}}, \quad (\text{VII.105})$$

где  $\omega$  — измеренная скорость вращения турбинки в данной точке;  $\omega_{\text{вых}}$  — средняя скорость вращения турбинки в меньшем (выходном) сечении;  $\omega_{\text{эф}}$  — средняя скорость вращения турбинки в большем (входном) сечении за пределами области влияния помех, связанных с длиной каверны и сменой сечений.

Полученные данные использованы для построения номограммы  $C = f(h)$  (рис. 60), где  $h = z + \frac{l_{\text{п}}}{2}$  расстояние по направлению потока от смены сечений, принятой за начало координат.

Серия кривых  $C = f(h)$ , полученная для условий  $\frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{п}}}$ , равных 1,5; 2; 3; 3,5; 5; 6, представлена в виде номограммы



(см. рис. 60), которая может быть использована для учета диаметров на протяжении всей каверны в диапазоне указанных  $\frac{l_k}{l_n}$ .

В практических целях при  $\frac{l_k}{l_n} > 5$  для учета диаметра в интервале, непосредственно примыкающем к месту смены сечений, может быть использован единый график  $C=f(h)$  (см. рис. 60, левую номограмму).

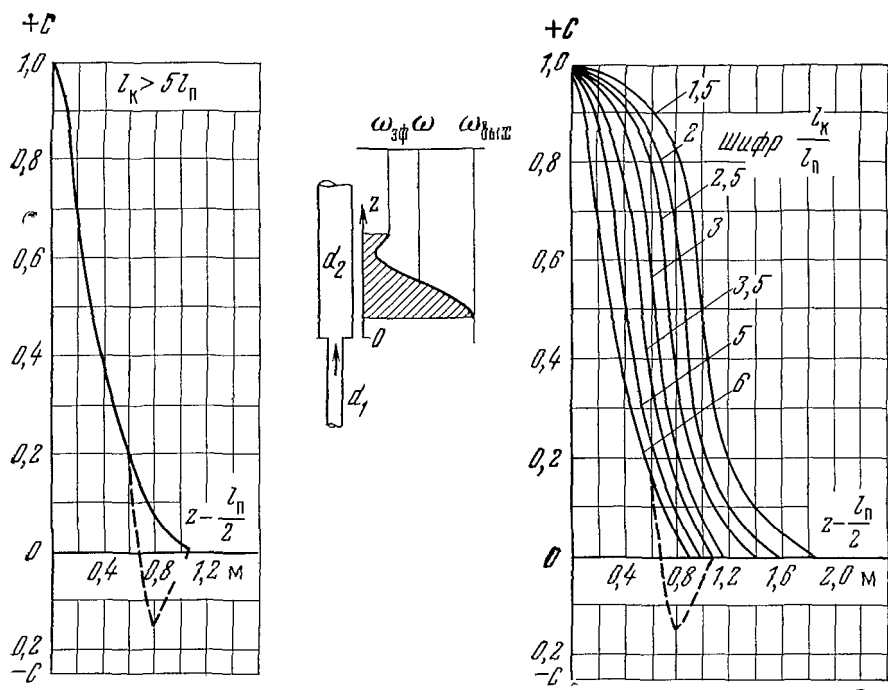


Рис 60 Номограмма для учета влияния каверн в показаниях расходомера. По М. С Ровинскому

Обработка расходограмм в рассмотренных выше случаях сводится к следующему. По графику  $C=f(h)$  для конкретной величины  $\frac{l_k}{l_n}$ , которая определяется при наличии кавернограммы, находится величина  $C$ . Путем подстановки ее в формулы

$$\omega_{эф} = \frac{C \cdot \omega_{вых} - \omega}{C - 1} \quad \text{при } C > 0 \quad (\text{VII.106})$$

и

$$\omega_{эф} = \frac{C \cdot \omega_{вых} + \omega}{C + 1} \quad \text{при } C < 0 \quad (\text{VII.107})$$

рассчитывается величина скорости вращения турбинки для точки расходограммы в интервале помех. По рассчитанным величинам скорости вращения турбинки  $\omega_{эф}$  определяется величина потока

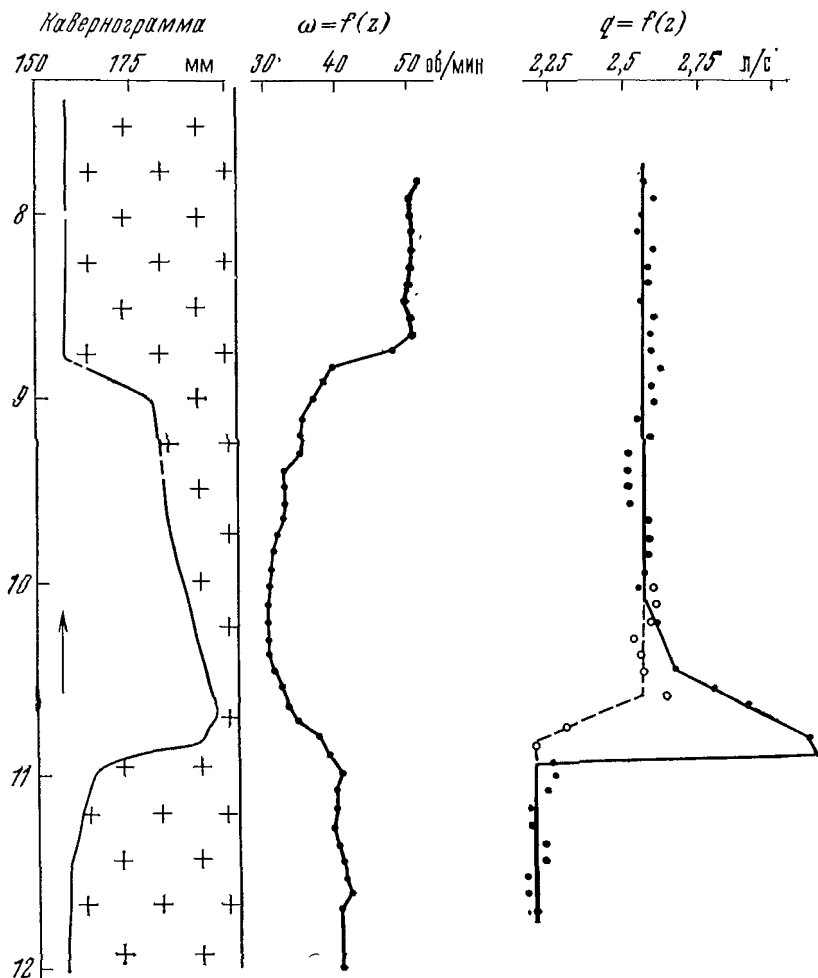


Рис. 61. Пример обработки расходограммы в интервале каверн. По М. С. Ровинскому. Скв. 1069, участок Умань. Прибор ТСР-70.

Светлые кружки—после введения поправки на влияние каверны

через прибор  $q_n$ , в которую вводится поправка на диаметр по графикам для стабилизированного (не искаженного) потока. Пример обработки расходограммы по описанной методике приведен на рис. 61.



## ВЫВОДЫ

1. Внутренние (инструментальные) погрешности скважинных расходомеров определяются погрешностями основных и вспомогательных приборов, используемых при градуировке и измерениях. Измерения расхода могут проводиться в режиме заданной абсолютной или относительной погрешности. На основании полученных формул можно управлять величиной погрешности путем выбора необходимых приборов и длительности измерения.

2. Внешние погрешности расходомеров зависят от соотношения диаметра скважинного прибора с диаметром скважины и точности его измерения. На основе полученных формул можно управлять величиной погрешности измерения расхода осевого потока путем выбора скважинного прибора соответствующего диаметра и каверномера соответствующего класса точности.

3. Расходомеры, используемые при гидродинамических исследованиях, обладают некоторым гидравлическим сопротивлением, что обуславливает искажение заданного гидродинамического режима. Выбор типа размера расходомера на основе полученных формул и номограммы обеспечивает проведение исследований при допустимых искажениях распределения давления в скважине.

## ГЛАВА VIII

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСХОДОМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТ

#### 1. ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СКВАЖИН НА ВОДУ

Успешное проведение гидродинамических исследований водонесных горизонтов с помощью одиночных или наблюдательных скважин во многом зависит от качества их подготовки. Между тем опыт показывает, что эта часть технологического цикла слабо обеспечена средствами технического контроля. Среди типичных причин отклонения фактических конструкций скважин от проектных можно назвать следующие:

- 1) ошибки в выборе глубины установки фильтров в связи с погрешностями определения границ пластов;
- 2) смещение фильтров относительно заданной глубины в связи с неточностью фиксации фильтровых колонн;
- 3) нарушение качества гидроизоляции части разреза, не подлежащей исследованию в данном эксперименте;

4) неэффективность мероприятий по разглинзации фильтров. В связи с отсутствием оперативных способов контроля эти отклонения незаметны для исполнителя. Поэтому погрешности эксперимента остаются либо невыявленными, либо обнаруживаются уже на поздних стадиях работ. Даже обнаружив, что эксперимент проходит с помехами, исполнителю трудно определить причину неудачи.

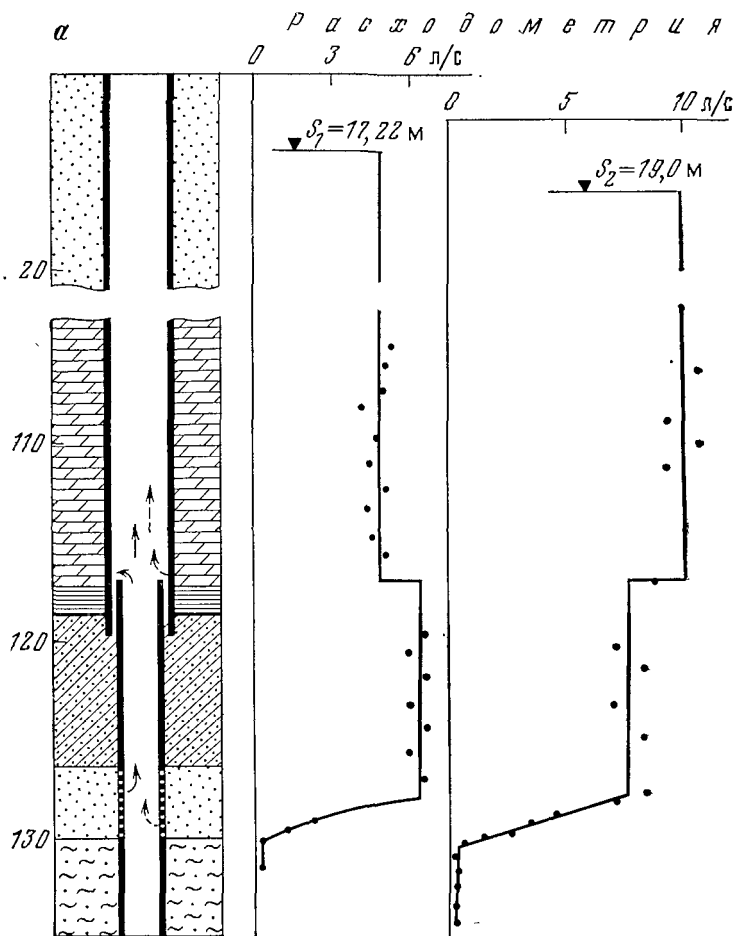
Простым и надежным способом технического контроля качества подготовки скважин к гидродинамическим исследованиям может служить применение расходометрии. В последние годы она применяется уже во многих гидрогеологических организациях. Своевременное выявление дефектов в конструкции скважин позволяет оперативно их устранять либо учитывать в последующих расчетах, не прибегая к специальным ремонтным работам. Во многих случаях это позволяет снизить затраты и сократить продолжительность исследований, особенно, если скважина рассчитана на разовое использование.

На рис. 62 показан пример исследования скв. 47 (участок Старо-Петривцы), оборудованный в интервале 126—130 м фильтром для опробования пласта песчаника, залегающего на этой глубине. При откачке с понижением 17,22 м дебит на устье составил 4,8 л/с. Расходометрией обнаружено нарушение гидроизоляции вышележащей толщи. Наблюдалась утечка в сальнике, установленном в месте соединения двух колонн обсадных труб разного диаметра на глубине 117 м. При повторном понижении, равном 19 м, дебит на устье составил 10 л/с. В этом случае из места нарушения гидроизоляции фиксировался приток воды. На осно-

вании данных расходомерии результаты откачки легко могут быть откорректированы, не прибегая к ремонтным работам. Действительный дебит опробуемого горизонта в этом случае будет таким: при первом понижении 6,8 л/с, при втором — 7,8 л/с. Таким образом, можно считать, что откачкой выполнена поставленная задача.

Рассмотрение материалов работ, проведенных многими организациями, показывает, что подобные нарушения в конструкциях скважин являются типичными и довольно частыми. Они происходят из-за неудовлетворительного качества сальников, цементных мостов в местах смены диаметров обсадных труб, и в результате разрушения их в процессе бурения нижнего интервала разреза.

Значительно сложнее учесть подобные дефекты в наблюдательных скважинах. Утечки или притоки в местах нарушения гидроизоляции и разрывов труб приводят к искажению деперсионной поверхности и темпов ее изменения, следствием чего являются



ошибочные результаты оценки параметров опробуемого горизонта. При своевременном обнаружении дефектов в конструкции положение можно поправить путем проведения работ по методу расходомерии реагирующих скважин. Оценив значение истинных срезов уровня для опробуемого пласта, можно внести поправки в величины наблюдаемого понижения, что также позволит использовать результаты эксперимента для расчетов\*.

При проведении исследований в терригенном разрезе нерешенной технической проблемой остается разглинизация фильтров и зафильтрового пространства ствола скважины. Традиционные приемы контроля позволяют установить степень разглинизации по косвенным признакам: величине общего дебита скважины, прозрачности воды и т. п. Все эти приемы недостаточны, если

\* Эта методика еще не опробована на практике.

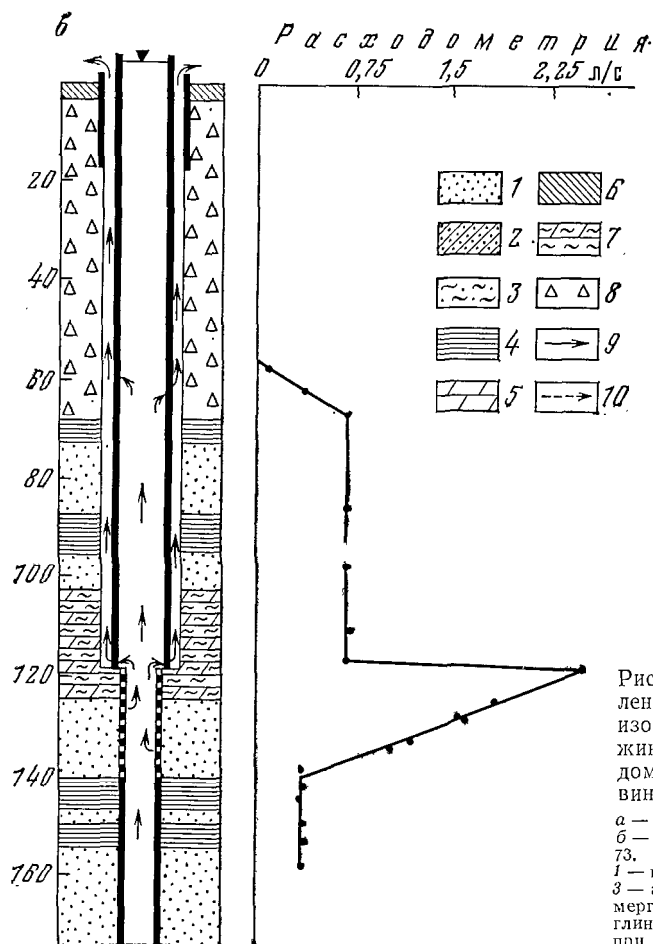


Рис. 62. Примеры выявления нарушений гидроизоляции ствола скважины по данным расходомерии. По М. С. Ровинскому.

а — Старо-Петровцы, скв. 47;  
б — Каменск-Уральск, скв. 73.

1 — пески; 2 — алевролиты;  
3 — алевроиты; 4 — глины; 5 — мергели; 6 — суглинки; 7 — глины; 8 — ополки; 9 — поток при  $S_1$ ; 10 — поток при  $S_2$

предусматривается оценка параметров водоносных горизонтов, так как остается невыясненной фактически работающая мощность водоносного горизонта. Это также достаточно просто устанавливается по расходограмме, полученной во время откачки.

На рис. 63 приведены две скважины, пробуренные в пределах конусов выноса в Киргизской ССР. Одна скважина (7к) вскрыла разрез, в котором водосодержащие породы представлены преимущественно галечниками, а в разрезе второй (628-2) — песками различной зернистости. Скважины оборудованы секционными фильтрами, установленными против водосодержащих пластов, выделенных по данным каротажа. По результатам расходомерии, проведенной в обеих скважинах, выявлено, что в скважине 7к работающей оказалась часть фильтра длиной 40 м, что составляет 89 % от установленной длины, в то время как в скважине 628-2 эти показатели соответственно равны 13 м и 43 %.

Установление фактической мощности работающих фильтров может считаться достаточным для корректировки данных опыта путем введения поправки на степень несовершенства вскрытия водоносного горизонта при условии его однородности либо исключением мощности неработающих пластов из расчетов коэффициента фильтрации в слоистых разрезах.

При исследовании слоистых водоносных горизонтов путем установки секционных фильтров эффективность разглинizations зависит не только от способа ее проведения. К сокращению длины

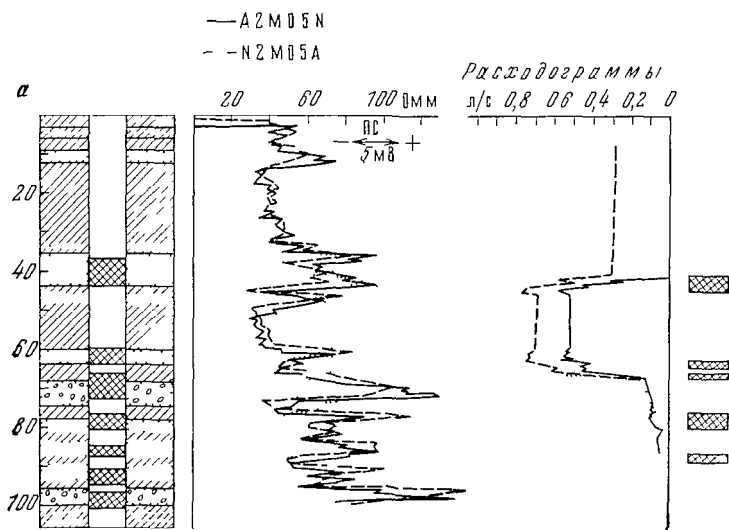


Рис 63 Пример выявления интервалов работающих фильтров в скважине (Киргизская ССР).

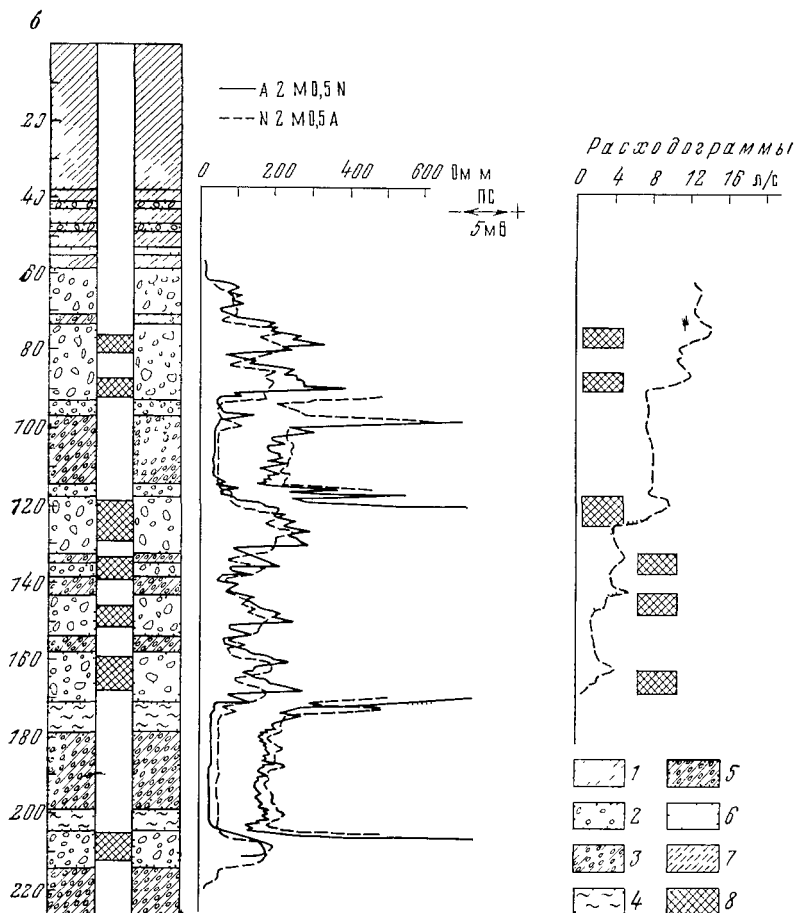
а — участок Атбашинский канач, скв 628 2, б — участок Кактус, скв 7к  
1 — суглинки плотные, 2 — пески с галькой, 3 — суглинки с гравием и галькой, 4 — суглинки запесоченные, 5 — суглинки с песком и гравием, 6 — пески разнородные, 7 — супеси легкие, 8 — фильтры установленные и работающие

рабочей части фильтров по сравнению с проектной часто приводят и другие факторы. Среди них основными являются:

1) отсутствие надежной предварительной информации о фильтрационных свойствах пластов, подлежащих опробованию;

2) технические ошибки в выборе типа фильтра, сборке и установке фильтровой колонны.

По данным М. С. Ровинского, обобщившего результаты исследования 47 скважин в Днепровско-Донецкой впадине, рабочая длина фильтров составляет в среднем 38 % по сравнению с проектной. Эта цифра довольно близко совпадает с нашей оценкой, полученной в результате рассмотрения материалов расходомерии в терригенных песчано-глинистых отложениях Северного Кавказа. В то же время наши оценки качества разглинizations скважин, пробуренных в галечниках конусов выноса Казахстана и Киргизии, показали более высокую эффективность: 80—90 %.



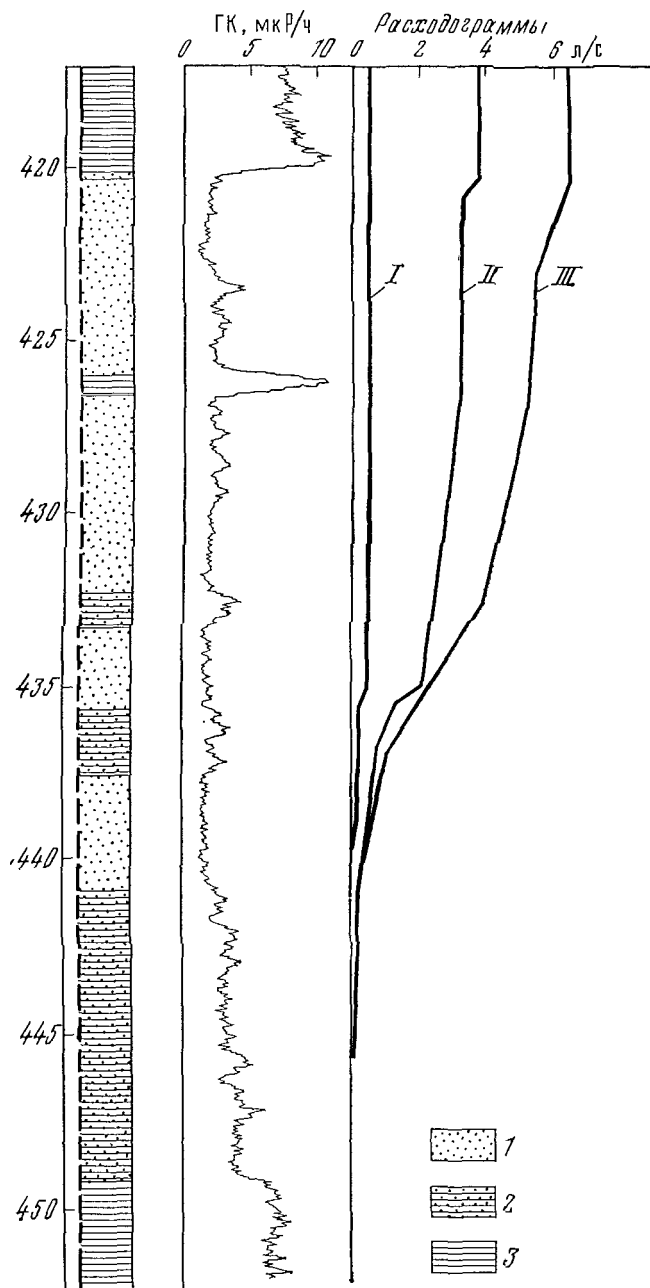


Рис. 64. Пример использования расходомерии и гамма-каротажа для оценки качества разглинизации фильтров. По М. С. Ровинскому. г. Полтава, скв. 131.  
 1 — пески; 2 — глинистые пески; 3 — глины; I — до разглинизации; II и III — после разглинизации  $S=41,0$  м;  $Q_1=0,5$  л/с;  $Q_2=3,8$  л/с;  $Q_3=6,5$  л/с

На рис. 64 приведен пример использования расходомерии и гамма-каротажа для выяснения качества разглинizations фильтра длиной 29 м, установленного в пласте песков сеноман-келловейского водоносного комплекса в Днепроовско-Донецкой впадине. Два цикла откачки с целью разглинizations фильтра и сопровождавшие их измерения расходограммы показали, что из нижней части фильтра длиной 9 м приток вызвать не удастся. Анализ кривой ГК позволяет установить истинную причину неуспешной разглинizations. Указанная часть разреза отмечается повышенной гамма-активностью, что по статистической зависимости (см. рис. 66) соответствует коэффициенту фильтрации, который более чем на порядок меньше по сравнению с его значением в верхней части пласта. Это является очевидным фактом ошибочного описания пласта как литологически однородного. В действительности 9 м его мощности в нижней части представлены глинными песками, что обусловило неэффективность разглинizations. В результате таких контрольных мероприятий пласт можно считать вскрытым на всю мощность, которая равна 20 м.

## **2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН В НЕОДНОРОДНЫХ ВОДОНОСНЫХ КОМПЛЕКСАХ, ПРЕДСТАВЛЕННЫХ СКАЛЬНЫМИ ПОРОДАМИ**

При задании поисково-разведочных скважин в неоднородных водоносных горизонтах, например трещинно-карстовых, помимо других материалов предусматривается получение сведений о характере водоносности изучаемого разреза по типу циркуляции подземных вод, сравнительной водообильности различных интервалов водоносного комплекса и распределении напоров, свидетельствующих о условиях питания и движения подземных вод.

Традиционная методика исследования скважин с этими целями предусматривает изучение:

а) условий проходки скважины (скорость бурения, провалы инструмента, выход керна и т. п.);

б) керна (литология, гранулометрический состав, характер цементации, трещиноватость);

в) расхода промывочной жидкости и ее свойств;

г) колебаний уровня воды в скважине в процессе бурения (при кратковременных остановках);

д) результатов кратковременных наливов и откачек по интервалам бурения;

е) результатов пробных откачек в интервалах бурения.

В дополнение к этим традиционным гидрогеологическим методам исследования поисково-разведочных скважин обычно используется комплекс методов электро- и радиоактивного каротажа.

Принципиальные возможности всех перечисленных методов исследования поисково-разведочных скважин неоднократно освещались в специальной литературе. По опыту работ в различных геологических и гидрогеологических условиях информативность



и уровень достоверности этих методов различны. Итог в большинстве случаев все же таков, что на основании этих данных можно составить лишь приближенное представление о пространственной водоносности отложений и характере циркуляции в них подземных вод. На основании интервального опробования можно получить сравнительные данные о водообильности, выраженные в величинах удельного дебита или дебита. Достоверность интервальных оценок водопроводимости из-за невозможности учета ряда факторов, определяющих несовершенство скважин, оказывается пригодной только для сопоставительных целей. Такие возможности отмеченного комплекса исследований поисково-разведочных скважин предусмотрены в методике гидрогеологических работ. Однако уровень представительности результатов бурения и исследования поисково-разведочных скважин можно считать достаточным лишь с учетом современных возможностей. Поэтому, повысив информационный уровень результатов исследования поисково-разведочных скважин, можно рассчитывать на радикальные изменения в методике также и в других звеньях гидрогеологических работ.

Принципиальные возможности для увеличения информативности поисково-разведочных скважин достаточно раскрыты в разделах 1, 2 и 6 главы V. Можно также существенно повысить технико-экономические показатели гидрогеологических работ. Так, в большинстве случаев разведки подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах на стадиях поисков и предварительной разведки уже накоплены достаточные данные для определения проектных глубин поисково-разведочных скважин. Этому способствовал ряд региональных исследований изменчивости фильтрационных свойств трещиноватых и закарстованных пород в зоне активного водообмена [61, 101], а также результаты обобщения данных расходомерии в ряде районов [18, 39, 52]. Поэтому технология проходки и исследования поисково-разведочных скважин может быть видоизменена, что впервые было сделано в Западно-Сибирском геологическом управлении при разведке ряда месторождений подземных вод в Кузбассе. Из методики работ были исключены практически все так называемые элементарные гидрогеологические наблюдения в процессе бурения: кратковременные наливы и откачки, пробные интервальные откачки.

При достижении проектной глубины бурения из каждой поисково-разведочной скважины проводится опытная откачка на одну-две ступени понижения, с которой совмещаются расходометрические исследования. Благодаря такому усовершенствованию технологии гидрогеологических работ этап бурения фактически отделен от этапа исследования скважины. Ритмичность работ обеспечивается благодаря функционированию трех отрядов: бурового, откачного (гидрогеологического) и каротажного, выполняющего расходометрические наблюдения и обработку полученных данных. Уменьшение простоя буровых станков повысило

производительность буровых работ на 5—10 %, что соответственно привело к сокращению общих сроков разведки месторождений. В 1964—1967 гг. такая технология исследования поисково-разведочных скважин была внедрена в Западно-Сибирском геологическом управлении. За отмеченный период получена экономия 65 тыс. руб. (рис. 65).

Значительный опыт работ по описанной технологической схеме накоплен уже во многих экспедициях Мингео РСФСР, Мингео КазССР, Мингео УССР. В ряде случаев для оперативного проведения работ целесообразно создать комплексный гидрогеофизический отряд со средствами возбуждения скважин и их исследования. Однако эффективность такой организации работ будет еще выше, если разработать и создать комплексное технологическое оборудование и приборы, включая водоподъемные и нагнетательные установки, систему контрольно-измерительных приборов давления и расхода, функционально связанных с подъемным и регистрирующим оборудованием каротажных станций.

В различных природных условиях, определяемых такими факторами, как гидрохимическая изменчивость подземных вод, глубина залегания кровли водоносного горизонта, напорный или безнапорный характер подземных вод, глубина разведки и др., а также в зависимости от условий бурения каждой конкретной скважины описанную технологическую схему можно модифицировать. При этом, однако, остается ее главная отличительная особенность: расходометрический метод применяется в технологическом комплексе исследований для количественной дифференциации фильтрационного разреза открытой неоднородной толщи по основным гидрогеологическим характеристикам.

Данная технологическая схема не исключает применения комплексных геофизических исследований, а наоборот, открывает

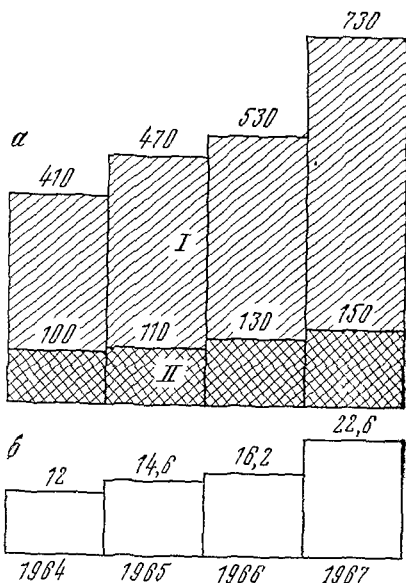


Рис 65 Техничко-экономические показатели использования метода расходометрии (Красноярская ГГП Западно-Сибирского ГГУ).

а — затраты труда на исследование скважин, бригадо смена (I — без применения метода расходометрии, II — с применением этого метода), б — экономический эффект, тыс. руб

\* Ю. Н. Акуленко. Опыт применения метода расходометрии при гидрогеологических исследованиях в Кузбассе. М., ОНТИ ВИЭМС, 1969. 12 с.

перед ними новые возможности. В этом случае для обоснования их качественной и количественной интерпретации могут быть привлечены результаты оценки фильтрационных свойств пород по расходометрическим исследованиям, обеспечивающим по существу абсолютную привязку интервалов исследования по глубине и представительность материала на уровне современных возможностей. В этом направлении какие-либо завершенные разработки отсутствуют, хотя поиски уже ведутся.

### **3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОИСКОВО-РАЗВЕДОЧНЫХ СКВАЖИН В СЛОИСТЫХ ВОДОНОСНЫХ СИСТЕМАХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ПОРОД**

Поисково-разведочные скважины в слоистых разрезах песчано-глинистых пород по геологотехническим причинам часто бурятся с применением глинистых растворов. Для сохранения ствола скважины используется крепление его обсадными и фильтровыми колоннами. Поисково-разведочные скважины в указанных разрезах при гидрогеологических съемках и разведке в артезианских бассейнах платформенного типа, конусах выноса нередко имеют телескопическую конструкцию, что связано с проведением гидродинамического и гидрохимического опробования. Окончательная конструкция имеет один или несколько этажно установленных фильтров в наиболее перспективных по водоносности и качеству пластах.

Традиционная методика гидрогеологических работ в процессе бурения в этом случае аналогична описанной в разделе 1. Некоторая разница состоит в том, что слоистый характер геологического разреза предопределяет приуроченность подземных вод к крупнообломочным разностям, что облегчает обнаружение водоносных пластов. Данные электро- и радиоактивного каротажа в этих условиях также более определенные, поэтому выбор пластов для оборудования фильтрами и для опробования более надежен. В то же время при частом переслаивании песчано-глинистых пластов возникают затруднения с раздельным их опробованием. Поэтому такие исследования проводятся, как правило, не по всем пластам, хотя информация по другим пластам, исключенным из интервалов опробования, также представляет интерес.

Принципиальная возможность получения детализированной гидрогеологической информации о разрезе с достоверностью на уровне современных требований может быть обеспечена применением соответствующей технологии бурения, оборудования скважины и исследования ее комплексом методов каротажа в определенной последовательности. Для того чтобы эта технологическая схема была рациональной и в технико-экономическом отношении, в каждом конкретном случае следует оценивать возможные варианты ее применения. Общая схема может быть примерно такой.

Скважина бурится малым диаметром до проектной глубины (как правило, с полным отбором керна) с применением глинистой

промывки. В процессе бурения с помощью фильтров-опробователей отбираются пробы воды из определенных пластов. После завершения бурения в скважине проводятся исследования комплексом каротажных методов: КС, БК, МБК, ПС, ППС, ГК и др. [80, 83]. Эти данные используются для литологического расчленения разреза, выделения проницаемых пластов, предварительной оценки минерализации пластовых вод и выбора на этой основе глубин для постановки фильтров. Затем скважина разбуривается проектным диаметром с применением облегченных растворов и оборудуется фильтрами на определенные пласты. После проведения необходимых мероприятий по очистке скважины и фильтров от шлама и глинистого раствора проводится опытная откачка или опытное нагнетание с расходометрическими исследованиями в соответствии с принципами, изложенными в разделах 1 или 2 главы V. Естественно, что по данным расходометрии в этих условиях может быть получена информация о фильтрационных свойствах только открытых для исследования пластов. Именно здесь и могут обнаружиться достоинства геофизических методов, с помощью которых утраченная информация может быть восполнена. Базой для создания методики интерпретации служат данные, полученные методом расходометрии по открытым пластам. Такой комплекс позволяет устранить недостатки каждого метода в отдельности. Следует несколько подробнее пояснить этот методический прием, поскольку его применение еще мало известно.

Как отмечено выше, существующие способы интерпретации результатов многих геофизических методов (электрических, радиоактивных) при оценке водообильности пород относятся к эмпирическим. Это предопределяет необходимость предварительного построения корреляционных зависимостей на основе статистического анализа данных о свойствах исследуемых пород. Важно при этом, чтобы в анализируемых выборках использовались объективные показатели свойств пород, которые в дальнейшем будут оцениваться на основании полученных эталонных зависимостей. Например, использование для этой цели результатов анализа образцов керна, как это практикуется в промысловой геофизике, часто не обеспечивает необходимой надежности эталонной зависимости, а иногда дискредитирует сам принцип по следующим причинам:

- 1) несоответствие структуры образца структуре породы в естественном залегании;
- 2) непредставительность единичных образцов породы;
- 3) методическое несоответствие лабораторных и опытно-фильтрационных определений свойств пород.

Кроме того, очень часто совсем не удается получить образцы из необходимых для анализа пластов. Этим, видимо, в основном объясняется весьма небольшой опыт количественной интерпретации геофизических данных на основании эмпирических зависимостей в гидрогеологических исследованиях по сравнению с опытом промысловой геофизики.

Использование результатов поинтервальных откачек из скважин также несовершенно из-за следующих причин:

1) несоответствия проектных конструкций скважин фактическим в связи с неконтролируемыми техническими осложнениями;

2) отсутствия данных о степени и характере вскрытия испытываемого пласта в связи с глинизацией стенок скважины и фильтров;

3) отсутствия объективных способов расчета истинного понижения при исследовании одиночных скважин.

Кроме того, получение информации по каждому пласту многослойной водоносной системы с помощью поинтервальных откачек является довольно сложной производственной задачей, поэтому практически она никогда не может быть выполнена специально для этой цели в требуемых объемах. Когда же необходимая выборка будет создана по ряду разрозненных определений, использование геофизических данных уже теряет значение.

Технологическая схема исследования скважин на базе применения в комплексе расходометрического метода дает возможность устранить все отмеченные недостатки. На основании расходометрических исследований по методике, изложенной в разделе 1 или 2 главы V, в статистическую выборку для последующего анализа включаются данные только по тем пластам, которые вскрыты фильтрами и хорошо разглинзированы. При таких комплексных исследованиях возникает возможность учета всех факторов, определяющих достоверность оценки параметров каждого пласта при обычном рядовом гидродинамическом опробовании скважины и использования для анализа лишь тех, которые не вызывают сомнения. Полученные в результате эталонные корреляционные зависимости имеют следующее важное свойство: исходные данные для их построения методически однотипны, отвечают наиболее достоверному гидродинамическому способу их оценки, пространственно скоординированы с геофизическими показателями и практически равнозначны.

На основании этих зависимостей оценке подлежат пласты, изолированные обсадными трубами и не разглинзированные. Все перечисленные достоинства такого комплексирования логически вытекают из принципиальных возможностей каждого метода. Так, предварительное расчленение терригенных отложений на проницаемые и непроницаемые пласты по перечисленным комплексным геофизическим исследованиям не представляет в настоящее время принципиальных затруднений. Литологическую однородность пластов, выделенных как проницаемые, также несложно установить по данным тех же методов. Это обстоятельство, а также ряд факторов, определяемых методикой гидрогеологических работ, могут помочь при выборе пластов для исследования с помощью откачек. Применение расходометрии на этой стадии обеспечивает получение информации о степени и качестве вскрытия определенных пластов и позволяет одновременно отбраковывать те из них, которые по техническим причинам оказались

дефектными. С учетом этих данных производится оценка фильтрационных параметров пластов, которые включаются в выборку.

Геологическая эффективность такой методики обнаруживается на ранних стадиях работ. Накопление фактических данных в процессе работ позволяет оперативно улучшать представительность статистических выборок и корректировать результаты ранее выполненной интерпретации геофизических данных. В дальнейшем по данным комплексных геофизических исследований можно прогнозировать значения фильтрационных свойств пластов с тем, чтобы выбирать вариант конструкции скважины для опробования наиболее перспективных интервалов.

Выше дана лишь общая методическая схема комплексных исследований поисково-разведочных скважин в песчано-глинистых разрезах. Аналогичная методика может быть применена для повторного исследования фонда старых скважин. В этом случае следует лишь провести работы по методу расходомерии (если раньше другие геофизические исследования были проведены). Необходимость в этом может возникнуть в связи с региональной переоценкой ресурсов и запасов подземных вод или решением других водохозяйственных задач.

Конкретная разработка методики комплексных исследований поисково-разведочных скважин и скважин старого фонда (скважины режимной сети, эксплуатационные и др., к которым в данном исследовании предъявляются требования как к поисково-разведочным) в связи с региональной оценкой эксплуатационных запасов подземных вод Днепроовско-Донецкой впадины для водоснабжения г. Киева была осуществлена М. С. Ровинским. Комплекс каротажа состоял из методов КС, ПС и ГК. Данные ГК использовались для построения корреляционных зависимостей  $I_{ГК} = f(k)$ . В основе использования ГК лежит многократно наблюдавшаяся во многих районах связь гамма-активности терригенных пород с глинистостью и некоторыми другими коллекторскими характеристиками, определяющими фильтрационные свойства пород.

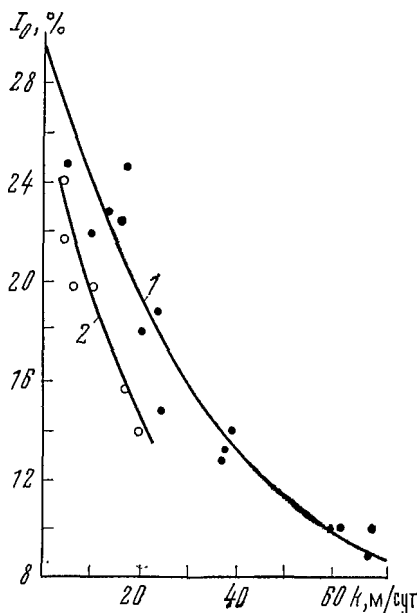


Рис. 66. Корреляционные зависимости между относительной гамма-активностью и коэффициентом фильтрации песчаных пород (Днепровско-Донецкая впадина). По М. С. Ровинскому

Гамма-активность испытываемого пласта оценивалась в относительных единицах, что исключало влияние нестабильности показаний радиометрической аппаратуры различного типа

$$I_{\eta} = \frac{I_{\Pi}}{I_{\Gamma\Gamma}}, \quad (\text{VIII.1})$$

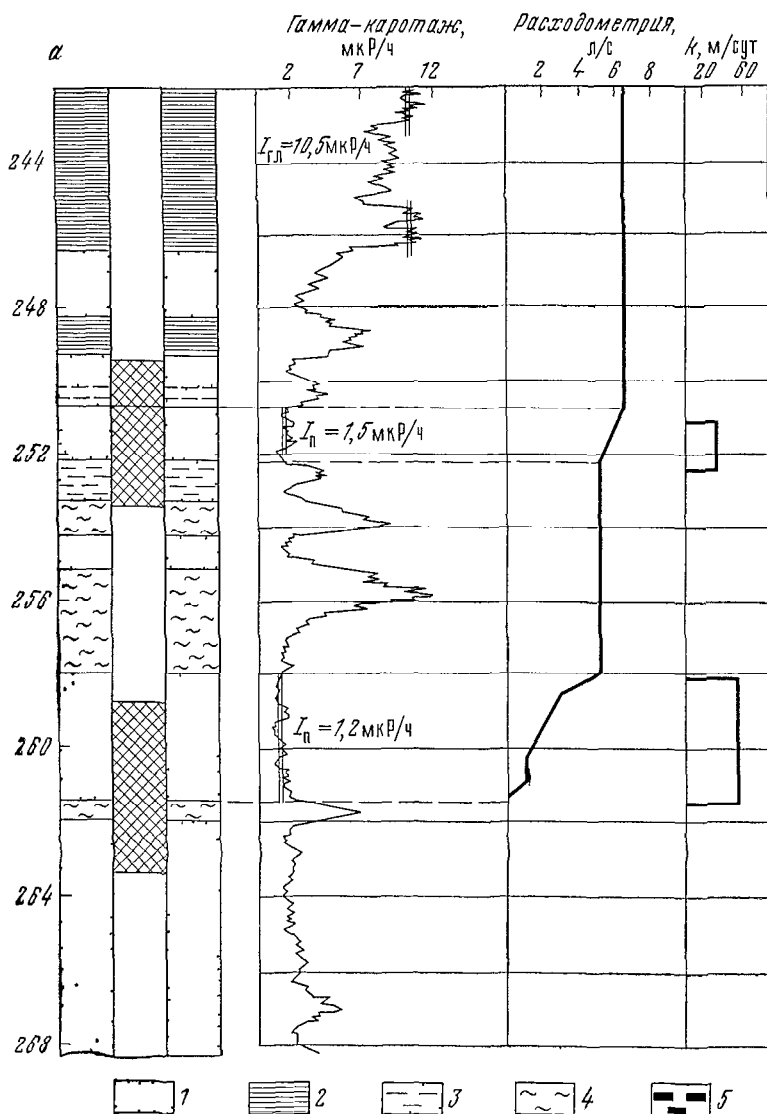
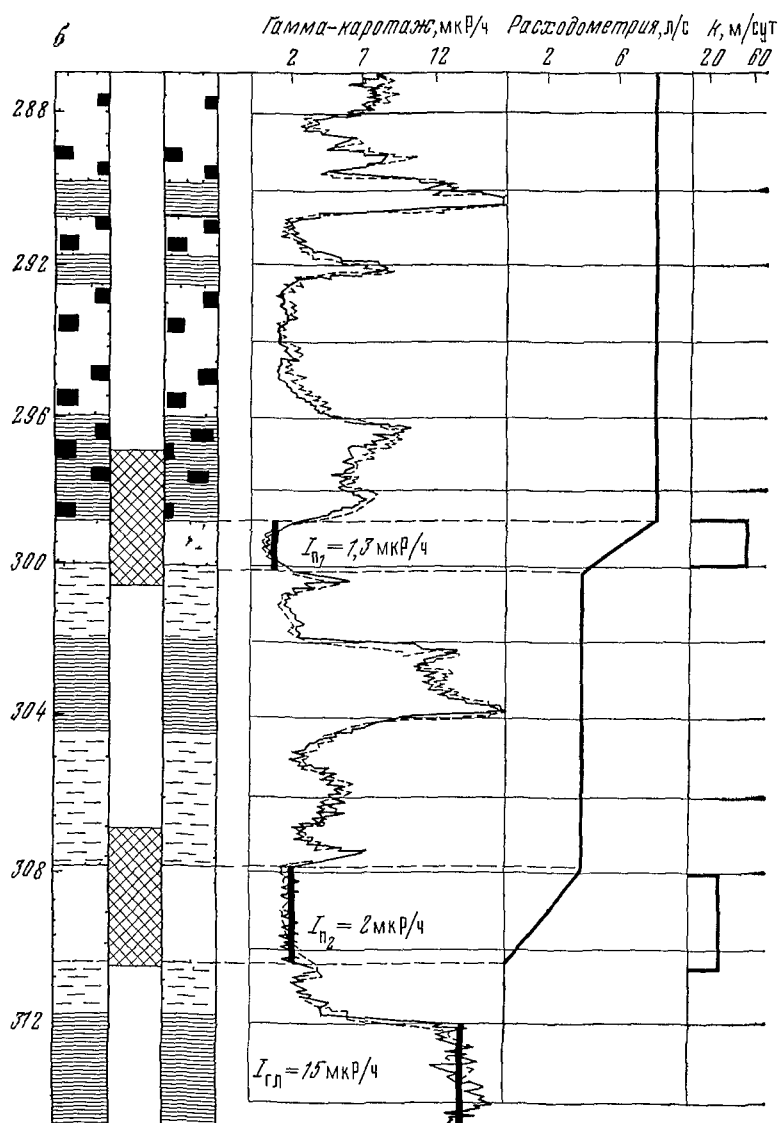


Рис 67 Практический пример к методике комплексирования расходомерии по фактически работающим интервалам фильтров и восполнения информации  
 а — участок Погребы, скв 150, б — участок Светильнов, скв 162—163 1 — пески, 2 — глины,

где  $I_n$  — средняя естественная гамма-активность испытываемого пласта,  $I_{гг}$  — средняя гамма-активность опорного пласта монолитных глин достаточно большой мощности

С помощью расходомерии, выполненной при откачке, для каждого пласта в интервале опробования определялся коэффициент фильтрации по формуле



с другими геофизическими методами для уточнения оценки параметров пластов по изолированным пластам По М. С. Ровинскому

3 — пески глинистые, 4 — алевроиты, 5 — угленосность



$$k_j = \frac{\Delta Q_j \left( \ln \frac{R}{r_0} + 0,217\varepsilon_0 \right)}{2\pi m_j (S - \Sigma \Delta S_j)}. \quad (\text{VIII.2})$$

Мощность испытываемого пласта определялась путем совместного анализа каротажных диаграмм КС, ПС, ГК, зарегистрированных в масштабе 1:50, и материалов геологического описания керна. Длина рабочей части фильтра  $l_p$ , и дебит пласта  $\Delta Q$ , при заданном понижении  $S$  устанавливались по расходограмме. Значение поправки  $\varepsilon_0$  на степень несовершенства вскрытия данного пласта определялось по номограмме Н. Н. Веригина [22], с использованием значений  $l_p/m_j$  и  $m_j/r_0$ . Значения  $\ln R/r_0$  и  $\Sigma \Delta S_j$  оценивались приемами, изложенными в главах V и IV. На основании полученных данных были определены зависимости  $k=f(I_0)$  для пластов, принадлежащих к различным статиграфическим горизонтам (рис. 66). В большинстве случаев в выборку включались пласты, для которых  $l_p=m_j$ . Графики  $k=f(I_0)$  были использованы затем для определения коэффициента фильтрации тех пластов песка, которые по разным причинам не были опробованы при откачке (перекрыты трубами, не разглинизированы). Мощность этих пластов устанавливалась по данным комплексного каротажа. Практические примеры реализации описанной методики приведены на рис. 67, а, б.

В результате выполненных исследований удалось восполнить утраченную информацию по части пластопересечений и выполнить более детальный анализ изменчивости фильтрационных свойств пород в разрезе и плане в пределах изученного района. В 1974 г. эти материалы были апробированы в ГКЗ СССР при утверждении эксплуатационных запасов подземных вод в пределах ДДВ для обеспечения хозяйственно-питьевыми водами г. Киева.

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НАБЛЮДАТЕЛЬНЫХ СКВАЖИН ОПЫТНЫХ КУСТОВ

Наблюдательные скважины опытных кустов обычно разбуриваются для определения фильтрационных свойств оцениваемого водоносного горизонта и изучения условий формирования эксплуатационных запасов подземных вод. Поэтому глубина и конструкция этих скважин определяются конкретной гидрогеологической обстановкой участка. Нередко в качестве наблюдательных используются поисково-разведочные скважины.

Можно выделить несколько моделей наблюдательных скважин:

- а) наблюдательные скважины на оцениваемый водоносный горизонт, совершенные по степени вскрытия;
- б) наблюдательные скважины на оцениваемый водоносный горизонт, несовершенные по степени вскрытия;
- в) наблюдательные скважины на выше- или нижележащую толщу.

Могут быть и другие варианты, но они не входят в круг наших интересов.

В процессе проведения опытно-фильтрационных работ наблюдательные скважины используются для прослеживания изменений уровня подземных вод, вызванных возмущением центральной скважины куста. Использование расходометрических измерений в дополнение к этим наблюдениям может выявлять такие факторы, которые обычно не фиксируются в традиционных экспериментах, однако отражаются на их полноте и достоверности. Рассмотрим некоторые из них.

1. Изучение фильтрационной неоднородности оцениваемого горизонта в разрезе и плане. Использование расходометрических исследований для этих целей обычно имеет смысл при разведке трещинно-карстовых водоносных горизонтов значительной мощности. Исследуя наблюдательные скважины опытных кустов, вскрывающих оцениваемый горизонт, можно получить информацию о путях фильтрации подземных вод к центральной скважине, дифференцировать разрез по степени гидравлической связи, выяснить изменчивость фильтрационных свойств в разрезе и плане для выявления анизотропии. При разведке трещинно-карстовых водоносных горизонтов поведение уровня в той или иной наблюдательной скважине куста ставит иногда перед исследователем сложные вопросы. Использование расходометрии в этом случае может помочь в выявлении причин данного явления.

Методика исследования наблюдательных скважин, совершенных по степени вскрытия оцениваемого водоносного горизонта, предусматривающая изучение перечисленных вопросов, осуществляется в соответствии с принципами, изложенными в разделах 3, 4 или 5 главы V, если эти скважины были предварительно исследованы как одиночные или если предполагается в последующем такое исследование. Подобные исследования наблюдательных скважин по изложенной методике только начинают входить в практику, поэтому технико-экономические показатели ее применения оценить еще невозможно. Геологические же результаты были неоднократно использованы при разведке подземных вод в Кузбассе, при разведке Туймазинского месторождения подземных вод [39] и в ряде других случаев для углубленного и более объективного представления об условиях циркуляции подземных вод в толще трещиноватых пород.

Могут встретиться условия (гидрогеологические, технологические), когда исследование поисково-разведочных скважин по методике, предусматривающей их собственное возбуждение, оказывается невозможным. Например, при изучении высокопроницаемых безнапорных горизонтов использование откачек или наливов для возмущения скважин иногда нецелесообразно. В первом случае это привело бы к потере для исследования верхней части горизонта, а во втором — для создания заметных превышений уровня требуется большой расход воды. То же относится к разведочным скважинам на рудных месторождениях, использу-

мым для изучения гидрогеологических условий. В таких условиях может оказаться более удобным проведение исследований этих скважин как реагирующих во время откачки из центральной скважины куста или других соседних разведочных скважин.

2. Контрольно-методические исследования несовершенных наблюдательных скважин. Методикой опытно-фильтрационных работ обычно предусматривается минимально необходимое число наблюдательных скважин. Это предъявляет повышенные требования к достоверности экспериментального материала, получаемого в таких скважинах. Вместе с тем практика показывает, что нередко конструкции наблюдательных скважин не обеспечивают этих условий. К числу наиболее частых причин этого можно отнести повреждения конструкции (разрывы обсадных труб, разуплотнение сальников, разрушение цементного кольца и др.), в результате чего не достигается гидроизоляция водоносных пластов, исключенных из опыта. Не всегда отмеченные дефекты могут быть своевременно выявлены и устранены. Иногда по поведению уровней во время опытно-фильтрационных работ можно предположить характер помехи, однако часто исследователю неизвестны действительные причины получения искаженных результатов.

Проведя расходометрические исследования в наблюдательных скважинах перед началом опытно-фильтрационных работ, можно по виду самой расходограммы относительно просто выявить повреждения в конструкции (см. рис. 62). Исследования дефектных скважин в процессе опытно-фильтрационных работ в соответствии с требованиями, изложенными в разделах 3, 4 или 5 главы V, позволяют реконструировать опытные данные, исключив влияние помехи. В частности, на основании уравнения (V.71) можно рассчитать понижение, которое должно было наблюдаться в опыте. Если эта наблюдательная скважина была исследована как одиночная, функция действительного понижения в ней при откачке может быть определена путем сканирования истинной индикаторной кривой по фиктивной (см. рис. 42).

Геологическая и технико-экономическая эффективность расходометрии наблюдательных скважин с этими целями может быть различной в зависимости от гидрогеологической обстановки конкретных конструкций скважин. Однако более правильно, видимо, рассматривать использование расходометрии в комплексе работ в качестве обязательного контрольно-методического метода для проверки соответствия наблюдательных скважин тем целям, для которых они предусмотрены, и при необходимости корректировать их данные. За счет использования контрольно-методических возможностей по оценке ВСЕГИНГЕО может быть получена экономия в размере 235 руб. на одну скважину типового строения.

## **5. УПРАВЛЕНИЕ ГИДРОХИМИЧЕСКИМ ОПРОБОВАНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ВОД**

Дифференцированное гидрохимическое опробование подземных вод различных горизонтов в практике гидрогеологических

работ осуществляется различными методами. Наиболее распространен метод отбора проб у водослива при проведении откачек из скважины, оборудованной на интервал опробования. При этом методе достигается представительность пробы, но теряется детальность исследования разреза. Как показано в предыдущих разделах этой главы, без соответствующих мер контроля технического состояния скважины всегда присутствует риск получения искаженной пробы в результате смешения с другими водами, проникающими в скважину через места повреждения в обсадной колонне.

При другом методе пробы для гидрохимического анализа получают с помощью глубинных пробоотборников. Шаг отбора проб выбирается либо произвольным, либо на основании сведений об общем гидрогеологическом строении разреза. Этот метод также не лишен недостатков, поскольку не учитывает долевого участия различных водоносных зон, одновременно взаимодействующих в эксперименте. Поэтому глубина отбора и химический состав пробы часто не соответствуют глубине залегания опробованного горизонта и составу содержащейся в нем воды. Таким образом, проблема идентификации пробы и объекта опробования при этом методе также не решена.

Достоверность гидрохимического опробования подземных вод, различных горизонтов во многих случаях может быть повышена при условии комплексирования этого вида работ в период откачки с расходометрией. В данном случае отбор проб осуществляется в точках выше каждой водоносной зоны, выделенной в разрезе по расходограмме. На основании расходограммы и данных о химическом составе подземных вод на различных глубинах отбора могут быть составлены балансовые уравнения, последовательное решение которых позволяет получить дифференцированную картину его изменения в изучаемом разрезе.

Расчетная формула компонентного состава будет в этом случае иметь вид

$$X_j = \frac{q_K X_K - q_{II} X_{II}}{q_K - q_{II}}, \quad (\text{VIII.3})$$

где  $X_j$  — содержание оцениваемого компонента в подземных водах данного объекта опробования;  $X_K$ ,  $X_{II}$  — содержание оцениваемого компонента соответственно в пробах, взятых выше кровли и ниже подошвы данного объекта;  $q_K$ ,  $q_{II}$  — расход потока соответственно выше кровли и ниже подошвы данного объекта.

Следует отметить, что эта расчетная формула может быть применена в случае, если смешение вод различного состава не ведет к таким химическим преобразованиям, в результате которых могут возникнуть нерастворимые осадки или газообразные вещества, т. е. смешение рассматривается как процесс растворения.

Описанная методика успешно применялась при разведке радоновых подземных вод на Украине.

Таблица 17

Геологическая задача	Методика решения	Виды работ, обеспечивающие решение геологической задачи	Мероприятия, обеспечивающие экономию средств и времени	Оценка условной экономии на одно мероприятие	
				Содержание мероприятия, обеспечивающего экономический эффект	Условия, экономия, руб
Послойная оценка основных гидрогеологических параметров водонасыщенных пород в неоднородных разрезах	Поинтервальные откачки из одиночных скважин	Расходомерия возмущающей скважины, совершенной по степени вскрытия исследуемого разреза	Сокращение поинтервальных пробных откачек из скважины в разрезах трещиноватых и карстовых пород	Сокращение одной пробной откачки продолжительностью 10 бригадо-смен с сопутствующими работами	212
		Поинтервальные откачки в комплексе с расходомерией возмущающей скважины	Использование скважины с дефектной конструкцией без переоборудования	Отказ от проведения аварийной цементации в одной скважине	235
		Комплексные геофизические исследования с использованием расходомерии возмущающей скважины в качестве опорных данных для количественной интерпретации	Сокращение интервалов фильтров в слоистых терригенных разрезах	Сокращение длины фильтра на 10 м	213
		Поинтервальные откачки в комплексе с геофизическими исследованиями на базе расходомерии	Выбор интервалов для разглинizations фильтров и учет их результатов	Оценка экономического эффекта возможна по результатам работ	
	Откачки с использованием наблюдательных скважин	Расходомерия реагирующей скважины, совершенной по степени вскрытия исследуемого разреза	Сокращение объемов бурения кустов ярусных скважин в слоистых терригенных разрезах	Отказ от бурения двух наблюдательных скважин глубиной 50 м в породах III—IV категории	167
		Расходомерия реагирующей скважины	Использование скважин с дефектной конструкцией без их ремонта	Проведение аварийной цементации в одной скважине	235
Гидрохимическое опробование подземных вод в неоднородных разрезах	Опробование разрезов с помощью поинтервальных откачек	Комплексирование расходомерии с опробованием разреза глубинными пробоборниками при откачке из скважины с открытым стволом	Сокращение объемов поинтервального опробования скважин	Исключение одного опробования испытательным инструментом (ИИВ)	47
Диагностика технического состояния скважин на воду с целью их ремонта	Косвенные методы	Комплексные исследования на основе данных расходомерии в качестве контрольного метода	Выявление мест нарушения колонны и кольматажа фильтров с целью выбора способа их ремонта	Оценка экономического эффекта возможна по результатам работ в каждом конкретном случае	
Определение глубины разведки подземных вод в трещинно-карстовых породах	Прогноз на основании общегеологической и гидрогеологической изученности	Анализ пространственной изменчивости фильтрационных свойств пород по данным расходомерии скважин в регионе или на месторождениях-аналогах с целью обоснования оптимальной глубины разведки	Сокращение проектной глубины поисковых, разведочных и разведочно-эксплуатационных скважин	Сокращение глубины бурения одной скважины на 10 м в породах VI категории	40
Оценка эффективной мощности и величины допустимых понижений при расчете эксплуатационных запасов подземных вод	Анализ результатов работ традиционными методами	Анализ результатов расходомерии на конкретных объектах	Повышение достоверности исходной информации о изменчивости фильтрационных свойств в вертикальном разрезе месторождений	Оценка экономического эффекта возможна по результатам эксплуатации водозаборов	

## **6. ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РАСХОДОМЕТРИИ ПРИ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ РАБОТАХ**

Данный раздел не претендует на глубокий и всесторонний анализ экономической эффективности применения различных модификаций расходомерии в возможных ситуациях гидрогеологического производства, поскольку это большая и самостоятельная тема экономических исследований. Поэтому здесь дается лишь общая характеристика тех видов работ и мероприятий, которые могут быть осуществлены на базе применения расходомерии с положительным экономическим эффектом. Расчет условной экономии осуществлен в лаборатории экономических исследований ВСЕГИНГЕО для случая замены методом расходомерии мероприятий, которые следовало бы осуществить при решении поставленной геологической задачи обычным путем. Объем мероприятий принят с учетом опыта работ в различных природных условиях. В табл. 17 систематизированы возможные условия и цифры, но практика работ может внести коррективы как в целесообразность изменения традиционной технологии, так и в объем использования. Внедрение метода расходомерии в отрасли «Гидрогеология» Мингео СССР было предусмотрено планом основных мероприятий по повышению эффективности гидрогеологических и инженерно-геологических работ на 1971—1975 гг. В результате его реализации в IX пятилетке было достигнуто сокращение затрат в размере 1 млн. 450 тыс. руб. В числе основных мероприятий, обеспечивающих такую эффективность, было сокращение объемов поинтервального опробования неоднородных водоносных горизонтов.

### **ВЫВОДЫ**

Комплексное использование расходомерии при проведении опытно-фильтрационных исследований по традиционной методике позволяет:

- 1) выявлять и устранять погрешности, связанные с дефектами в конструкции одиночных возмущающих и реагирующих (наблюдательных) скважин, при осуществлении гидродинамических расчетов;
- 2) в скважинах, вскрывших скальные устойчивые породы, дифференцировать фильтрационный разрез в пределах исследуемой части водоносного горизонта;
- 3) в скважинах, вскрывших неустойчивые горные породы, оценивать фильтрационные свойства по открытым пластам и на основе комплексирования с геофизическими методами электрического, радиоактивного и других видов каротажа, интерполировать их для пластов, обсаженных трубами или закольматированных в результате применения тяжелых промысловых жидкостей при бурении;
- 4) пространственно привязывать точку отбора проб подземных вод на химический анализ с объектами опробования в условиях смешения вод с различным компонентным составом.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мы постарались системно изложить научно-методические основы исследования гидрогеологических скважин на базе применения глубинной расходометрии. Трактовка аспектов гидродинамики неоднородных сред и гидравлики скважин, формирующих теоретические основы применения расходометрии для исследования фильтрационной изменчивости природных объектов, дана на уровне современных представлений, что не исключает возможность дальнейшего углубления и совершенствования этих разделов метода. Впервые рассмотрены теоретические вопросы метрологии глубинных измерителей расхода, применяемых при гидродинамических исследованиях. Нам хотелось бы, чтобы читатель заметил триединство этих аспектов научно-методических основ расходометрии. Метод расходометрии широко применяется в настоящее время в практике разведочных и изыскательских организаций. Вместе с тем приходится констатировать неполное представление о содержании его теории и методологии. Поэтому в книге намечено два уровня использования расходометрии соответственно с функциями:

- самостоятельного гидродинамического метода исследования скважин;

- контрольно-методического в комплексе других методов исследования.

Расходометрический метод исследования гидрогеологических скважин в различных модификациях — рациональное дополнение к комплексу других средств исследования, и целесообразное их сочетание является необходимым условием достижения высокой геологической эффективности и технико-экономических показателей. Этот тезис нашел отражение в разработке схемы рационального использования расходометрии в комплексе гидрогеологических работ.

Прогресс разведочной гидрогеологии связан с выявлением количественных закономерностей движения подземных вод и совершенствованием на этой основе фильтрационной схематизации объектов исследования. Такие тенденции развития гидрогеологической науки и практики объясняются систематическим усложнением объектов исследования и необходимостью повышения достоверности гидрогеологических прогнозов в связи с расширением масштабов использования подземных вод в народном хозяйстве. Опыт использования данных расходометрии для этих целей еще недостаточен, однако такие возможности не вызывают сомнения и некоторые из них показаны в книге.

Естественнонаучный (познавательный) и экономический результаты от тех или иных мероприятий в конечном счете определяются вариантом решения инженерной задачи уже на стадиях, далеких от проведения собственно изыскательских работ.

Понятно, что выбор варианта обосновывается результатами изысканий, и тем он будет экономичней, чем ближе наши представления об объекте изысканий соответствуют реальной природной обстановке. Однако уместно, видимо, разграничить экономическую эффективность, получаемую в результате совершенствования технологии изыскательских работ, и эффективность, получаемую от прироста информации в результате усовершенствований. Поэтому в книге дана общая характеристика тех видов работ и мероприятий, которые могут быть осуществлены на основе применения расходомерии, чтобы обеспечить положительный экономический эффект на стадии изысканий. На некоторых конкретных примерах показано, кроме того, как использование результатов расходомерии способствует повышению информативности исследований и качества прогноза гидрогеологических условий, обеспечивая более надежное обоснование инженерных проектов и мероприятий.

В дальнейшем развитии теории и практики исследования скважин на базе глубинной расходомерии важное значение получают:

- более углубленные разработки математических моделей притока в скважину при условии изменения гидравлических характеристик прискважинной зоны в пространственных координатах, а также экспериментальные исследования таких объектов с целью обоснования достоверности методики оценки скин-эффекта и фильтрационных параметров водонасыщенных пород;

- совершенствование алгоритмов интерпретации данных исследования реагирующих скважин и экспериментальное обоснование достоверности оценки параметров пластов на их основе;

- разработки рациональных методик исследования гидрогеологических скважин в различных природно-технологических условиях на базе комплексирования гидродинамических и геофизических методов с целью повышения информативности и снижения общих затрат;

- разработка типового технологического оборудования и приборов для комплексных гидродинамических и геофизических исследований скважин при условии автоматизации всех видов измерений.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Аксельрод С М, Путкарадзе Л А Определение профиля поглощения с помощью радиоактивного расходомера — Новости нефтяной техники Сер Геология, 1959, № 3, с 30—31
- 2 Алексеев В С Выбор длины и диаметра фильтров скважины с учетом неравномерности их нагрузки — Гидротехническое строительство, 1968, № 8, с 46—48
- 3 Алексеев В С, Гребенников В Т, Курманенко А Д Опыт оценки зональной проницаемости водоносных пластов — В кн Экспресс информация Сер Гидрогеология и инженерная геология, № 1 — М 1973 19 с (ВИЭМС)
- 4 Алексеев В С, Курманенко А Д, Суханов В Ф О методике оценки зональной проницаемости водоносных пластов по данным расходомерии — Разведка и охрана недр, 1970, № 5, с 46—49
- 5 Агиев Т М, Рагимов Н А, Мамедов Ф С К аппроксимации данных профиломеров для построения профиля поперечного сечения скважины — Нефтегазовая геология и геофизика, 1976, № 1, с 51—53
- 6 Альпин Л М Теория поля — М Недра, 1966 — 384 с
- 7 Альтовский М Е Расчет дебита по откачкам из одиночных скважин — М — Л Госгеолтехиздат, 1940 — 117 с
- 8 Альтишуль А Д Гидравлические сопротивления М Недра, 1970 — 216 с
- 9 Альтишуль А Д Обобщенная зависимость для гидравлического расчета трубопроводов — Гидротехническое строительство, 1952, № 6, с 44—47
- 10—11 Альтишуль А Д О распределении скоростей при турбулентном течении жидкостей в технических трубопроводах — Теплоэнергетика, 1956, № 2, с 47—50
- 11 Бошняк Л П, Бызов Л Н Тахометрические расходомеры — Л Машиностроение, 1968
- 12 Баренблатт Г И, Желтов Ю П, Кочина И П Об основных представлениях теории фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах — Изв АН СССР Нов сер Прикладная математика и механика, 1960, т 24, вып 5, с 852—854
- 13 Баренблатт Г И, Желтов Ю П Об основных уравнениях фильтрации однородных жидкостей в трещиноватых породах — Докл АН СССР, 1960, т 132, № 3, с 545—548
- 14 Башта Т М Машиностроительная гидравлика — М Машгиз, 1963 696 с
- 15 Биндеман Н Н, Язвин Л С Оценка эксплуатационных запасов подземных вод — М Недра, 1970 — 214 с
- 16 Блинов А Ф, Дияшев Р Н Исследование совместно эксплуатируемых пластов — М Недра, 1971 — 176 с
- 17 Бореvский Б В, Самсонов Б Г, Язвин Л С Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек — М Недра, 1973 — 304 с
- 18 Бореvский Б В, Хордикийнен М А, Язвин Л С Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах — М Недра, 1976 — 247 с
- 19 Борисов А А Палеоклиматы территории СССР — Л Изд-во ЛГУ, 1965 — 112 с
- 20 Борисов Ю П К гидродинамическим расчетам при упругом режиме — Тр ВНИИ нефти и газа, 1956, вып 8, с 208—231
- 21 Бочевев Ф М, Алексеев В С Оценка сопротивления водозаборных скважин по опытному и эксплуатационным откачкам — Разведка и охрана недр, 1965, № 3, с 39—45.
- 22 Бочевев Ф М, Веригин Н Н Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения — М Стройиздат, 1961 — 199 с
- 23 Бочевев Ф М Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод М Недра, 1968 — 325 с
- 24 Бузинов С Н, Умрихин И Д Исследование пластов и скважин при упругом режиме фильтрации — М Недра, 1964 — 273 с

25. Васильев В. А., Шульгин Д. Ф. О работе фильтра буровой скважины. — Изв. АН СССР, Сер. Механика и машиностроение, 1961, № 1, с. 135—139.
26. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости/А. Бан, А. Ф. Богомолова, В. А. Максимов и др. — М.: Гостехиздат, 1962. — 275 с.
27. Вопросы методики изучения трещиноватых пород в связи с их коллекторскими свойствами/Е. М. Смехов, Л. П. Гмид, И. Г. Ромашева и др. — Тр. ВНИГРИ, 1958, вып. 121, с. 7—66.
28. Временная инструкция по гидрогеологическим исследованиям пластов и скважин. — М.: Гостехиздат, 1963. — 69 с.
29. Временная инструкция по исследованию поглощающих горизонтов в скважинах расходомером ДАУ-3. — Луганск: Изд. МУП УССР, 1967.
30. Прейс В. Ф., Ровинский М. С. Временное руководство по проведению гидрокаротажных работ методом расходомерии. — Свердловск: 1969 (Уралгеолуправления МГ РСФСР).
31. Гатальский М. А. Применимость формулы Дюпюи при расчете движения подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. — Советская геология, 1948, № 35, с. 102—107.
32. Гершанович И. М., Каринская И. Д., Кузьменко Э. Д. О форме расходограммы против однородного водоносного горизонта в открытой скважине. — Геофизические и изотопные методы гидрогеологических и инженерно-геологических исследований, 1975, вып. 90, с. 5—24.
33. Гершанович И. М., Макаридин Н. А. Метод измерения объемной скорости движения жидкости по скважине для решения ряда вопросов гидрогеологии. — Геофизическая разведка, 1962, вып. 7, с. 102—110.
34. Гершанович И. М. Об определении статических уровней напорных водоносных пластов, опробуемых суммарной откачкой с применением расходомерии. — Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях, 1968, вып. 2, с. 96—106.
35. Гершанович И. М. О количественной интерпретации данных расходомерии гидрогеологических скважин. — Разведка и охрана недр, 1970, № 8, с. 47—52.
36. Гершанович И. М. Оценка водопроницаемости трещиноватых пород методом расходометрического каротажа. — В кн.: Новые технические средства, используемые при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. М., 1973, с. 22—31 (ВСЕГИНГЕО).
37. Гершанович И. М., Плетнев А. А. Метод расходомерии при нестационарном возбуждении скважин. — Вопросы оценки эксплуатационных запасов подземных вод. 1971, вып. 44, с. 119—129.
38. Гершанович И. М. Прямая задача расходометрического каротажа для реальной скважины. — Вопросы оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод. 1976, вып. 93, с. 44—59.
39. Гершанович И. М. Разведка месторождений подземных вод в трещиноватых породах геофизическими методами. — М.: Недра, 1975. — 128 с.
40. Гершанович И. М. Расходомер скважинный тахометрический для гидродинамических исследований и результаты его испытания. — Исследование и разработка новых технических средств для гидрогеологических и инженерно-геологических изысканий, 1971, вып. 56, с. 22—32.
41. Гершанович И. М. Расходометрический каротаж реагирующих скважин. — В кн.: Вопросы оценки эксплуатационных запасов подземных вод. — М.: 1973, с. 93—104 (ВСЕГИНГЕО).
42. Гершанович И. М. Расходомерия одиночных гидрогеологических скважин для послысного определения гидродинамических характеристик. — Разведка и охрана недр, 1966, № 9, с. 53—56.
43. Гершанович И. М. Скважинный расходомер на трехжильном кабеле для гидродинамических исследований. — Разведочная геофизика, 1965, вып. 9, с. 113—118.
44. Гиринский Н. К. Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившемся дебите и понижении. — М.: Госгеолгиздат, 1950. — 136 с.
45. Градуирование турбинно-тахометрических расходов/Л. И. Бошняк,

Л. Н. Бызов, Б. А. Казначеев и др. — Измерительная техника, 1962, № 7, с. 45—49.

46. Греф Э. Прибор для определения зон поглощения или притока жидкости в бурящейся скважине. — Нефтяник, 1960, № 7, с. 34.

47. Грикевич Э. А. Влияние гидравлических сопротивлений скважины на приток воды. — Рига: Знание, 1969. — 245 с.

48. Грикевич Э. А. Определение зон фильтрационной неоднородности и коэффициента  $m\mu$  по данным гидрокаротажа скважин. — В кн.: Вопросы расходомерии скважин. Рига: Изд-во Рижского политех. ин-та, 1972, с. 9—25.

49. Грикевич Э. А., Руселис А. А. О точности определения фильтрационных свойств пласта методом расходомерии скважин. — В кн.: Вопросы расходомерии скважин. — Рига: Изд-во Рижского политех. ин-та, 1972, с. 3—8.

50. Гринбаум И. И. Геофизические методы определения фильтрационных свойств горных пород. — М.: Недра, 1965. — 188 с.

51. Гринбаум И. И. Использование данных расходомерии при проектировании оптимальных фильтров водозаборных скважин. — В кн.: Новые технические средства, используемые при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях. — М.: 1973, с. 65—72. (ВСЕГИНГЕО)

52. Гринбаум И. И. Исследование трещиноватых и закарстованных коллекторов подземных вод методом расходомерии. — Разведка и охрана недр, 1960, № 2, с. 41—45.

53. Гринбаум И. И. О повышении точности расходометрических измерений в гидрогеологических скважинах. — Экспресс-информация. Сер. Гидрогеология и инженерная геология, 1970, № 17. — 12 с.

54. Гринбаум И. И. Расходомерия гидрогеологических и инженерно-геологических скважин. — М.: Недра, 1975. — 271 с.

55. Гурьев М. А. Повышение эффективности гидрогеологических и инженерно-геологических работ. — М.: Недра, 1975. — 15 с.

56. Дерун А. М., Ровинский М. С. Аппаратура для расходомерии скважин алмазного бурения. — Геофизическая аппаратура, 1967, вып. 33, с. 148—153.

57. Дерун А. М., Ровинский М. С. Скважинный расходомер и результаты его испытания. — Геофизическая аппаратура, 1965, вып. 25, с. 16—21.

58. Диткин В. А., Прудников А. П. Интегральные преобразования и операционное исчисление. — М.: Физматгиз, 1961. — 524 с.

59. Диткин В. А., Прудников А. П. Справочник по операционному исчислению. — М.: Высшая школа, 1965. — 466 с.

60. Ермолаев М. М. О палеогеоморфологии восточного склона Балтийского щита. — Изв. ВГО, 1959, № 2, с. 17—21.

61. Изучение гидрогеологических и инженерно-геологических условий при разведке и освоении месторождений твердых полезных ископаемых/В. Д. Бабушкин, Д. И. Пересунько, С. П. Прохоров и др. — М.: Недра, 1969. — 408 с.

62. Изыскания и оценка запасов промышленных подземных вод/С. С. Бондаренко, Л. В. Боровский, Н. В. Ефремович и др. — М.: Недра, 1971. — 244 с.

63. Исследования водоносных горизонтов в скважинах, проходимых для давления водопритоков при сооружении шахтных стволов/Э. Я. Кипко, Ю. А. Полозов, О. Ю. Лушникова и др. — Уголь Украины, 1973, № 1, с. 46—48.

64. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. — М.: Наука, 1964 — 487 с.

65. Кемниц Ю. В. Теория ошибок измерений. — М.: Недра, 1967. — 175 с.

66. Керкис Е. Е. Об оценке водообильности водоносных горизонтов. — Труды Лабор. гидрогеол. проблем им. Г. П. Саваренского АН СССР, 1948, т. III, с. 201—209.

67. Керкис Е. Е. Определение радиуса влияния при расчете водопритоков. — М.: Углетехиздат, 1955. — 100 с.

68. Климентов П. П., Пыхачев Г. Б. Динамика подземных вод. — М.: Госгортехиздат, 1961. — 515 с.

69. Комаров С. Г. К вопросу оценки коллекторских свойств пластов по результатам геофизических исследований скважин. — Прикладная геофизика, 1963, вып. 36, с. 195—213.

70. Комаров С. Г. Техника промысловой геофизики. — М.: Гостоптелиздат, 1957. — 562 с.

71. Котяхов Ф. И., Мельникова Ю. С. О границе нарушения линейного закона фильтрации в трещиноватых породах. — Труды ВНИИГаз, 1961, вып. 15, с. 10—16.
72. Кремлевский П. П. Расходомеры. — М. — Л.: Машгиз, 1963. — с. 656.
73. Ликвидация поглощений при колонковом бурении/Н. И. Титков, Л. М. Ивачев, Э. Я. Кипко и др. — М.: Недра, 1972. — 116 с.
74. Литвинов А. А. Количественная оценка гидродинамического совершенства эксплуатационных скважин при различных видах перформации по данным промысловых исследований. — Труды ТатНИИ, 1960, вып. 2, с. 328—338.
75. Лыков А. В. Теория теплопроводности. — М.: Гостехтеориздат, 1952. — 392 с.
76. Манукян В. А. Решение задачи о притоке подземных вод к скважине в двух пластах, разделенных непроницаемым слоем. — Гидротехника и инженерная гидрогеология, 1972, вып. 38, с. 88—92.
77. Маскет М. Течение однородной жидкости в пористой среде. — М. — Л.: Гостоптехиздат, 1949. — 628 с.
78. Маскет М. Физические основы технологии добычи нефти. — М.: Гостоптехиздат, 1953.
79. Матвеев Т. И. О неустановившейся фильтрации в одном и двух пластах. — Изв. АН СССР, ОТН, 1957, № 6, с. 126—129.
80. Методические рекомендации по каротажу гидрогеологических скважин/И. М. Гершанович, Г. Я. Черняк, И. Т. Гаврилов и др. М.: Недра, 1972. — 191 с.
81. Методические рекомендации по производству ремонта скважин на воду. — М.: 1976. 43 с. ВСЕГИНГЕО.
82. Методы геофизики в гидрогеологии и инженерной геологии (методическое руководство)/В. С. Матвеев, Л. С. Язвин, Г. Я. Черняк и др. М.: Недра, 1972. — 296 с.
83. Мироненко В. А., Шестаков В. М., Язвин Л. С. О постановке опытных откачек. — Разведка и охрана недр, 1974, № 5, с. 35—40.
84. Мятнев А. Н. Напорный комплекс подземных вод и колодцы. — Изв. АН СССР, ОТН, 1947, № 9, с. 1069—1088.
85. Ненько Т. Я. О движении жидкости с переменной вдоль потока массой. — Харьков, 1938. — 58 с.
86. Об определении параметров нефтеносного пласта по данным о восстановлении давления в остановленных скважинах/Г. И. Баренблатт, Ю. П. Борисов, С. Г. Каменецкий и др. — Изв. АН СССР, 1957, № 11, с. 84—91.
87. Огильви Н. А. Новый метод определения мест и количеств притекающей воды в буровые скважины (скоростной каротаж). — Разведка недр, 1940, № 1, с. 47—49.
88. Огильви Н. А., Федорович Д. И. Электролитический метод определения скорости фильтрации подземных вод и условия его практической применимости. — М.: Недра, 1964. — 43 с.
89. О погрешности метода скважинной расходомерии/Л. М. Ивачев, Э. Я. Кипко, А. Ю. Лушникова и др. Изв. вузов. Геология и разведка, 1975, № 9, с. 80—83.
90. Основы гидрогеологических расчетов/Ф. М. Бочеввер, И. В. Гармонов, А. В. Лебедев и др. — М.: Недра, 1965. — 306 с.
91. Пастухов Ю. В., Ястржембский А. Л. Об одном алгоритме оптимизации, использующим модификацию метода вращающихся координат. — Вычислительная математика и вычислительная техника, 1973, вып. 4, с. 3—8.
92. Паукер Н. Г. О притоке воды к несовершенным скважинам при наличии турбулентного и ламинарного режимов фильтрации. — Зап. Ленинград. горного и-та, 1958, т. 34, вып. 2, с. 101—126.
93. Петров А. И., Васильевский В. Н. Техника и приборы для измерения расхода жидкости в нефтяных скважинах. — М.: Недра, 1967. — 191 с.
94. Петров А. И., Дробах В. Т. Измерения давлений и расходов жидкостей и газа на нефтяных промыслах. — М.: Гостоптехиздат, 1959. — 179 с.
95. Петров А. И. Методы и техника измерений при промысловых исследованиях скважин. М.: Недра, 1972. — 272 с.
96. Петров Г. А. Гидравлика переменной массы (движение жидкости с

изменением расхода вдоль пути). — Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964.—224 с.

97. *Пехучек Ф., Филдс Р. К.* Индикатор мест ухода бурового раствора.— В кн.: IV Международный нефтяной конгресс. Т. 2.— М., 1956, с. 367—370.

98. *Плетнев А. А.* Об изменении во времени уровня и межпластовых дебитов в скважине, «мгновенно» вскрывающей водоносные горизонты с различными напорами.— Применение математических методов при гидрогеологических и инженерно-геологических исследованиях, 1970, вып. 34, с. 14—25 (ВСЕГИНГЕО).

99. *Полубаринова-Кочина П. Я., Пряхинская В. Г., Эмих В. Н.* Математические методы в вопросах орошения.— М.: Недра, 1969.—414 с.

100. *Полубаринова-Кочина П. Я.*: Теория движения грунтовых вод.— М.: Гостеортехиздат, 1952.—676 с.

101. *Прогноз водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах*/В. Д. Бабушкин, З. П. Лебедянская, Л. З. Леви и др.— М.: Недра, 1972.—с. 196.

102. *Пыхачев Г. Б.* Подземная гидравлика.— М.: Гостоптехиздат, 1961.—383 с.

103. *Разумова В. Н., Херсаков М. П.* Геологические типы кор выветривания и закономерности их размещения.— Труды ГИН, 1963, вып. 77.

104. *Рекомендации по обработке результатов опытных работ на основе уравнений неустановившегося движения.*— М.: 1967.—169 с. (Мингео СССР).

105. *Руднев О. В.* Разработка новых образцов скважинной радиометрической аппаратуры.— В кн.: Ядерная геофизика.— М.: 1959, с. 222—227.

106. *Сивоконенко И. М.* Опоры подвижных систем.— М.: Судпромгиз, 1952.

107. *Скабалланович И. А.* Гидрогеологические расчеты по динамике подземных вод. М.: Госгорттехиздат, 1960.—407 с.

108. *Смехов Е. М.* Закономерности развития трещиноватости горных пород и трещинные коллекторы.— Л.: Гостоптехиздат, 1961.—145 с.

109. *Соколов В. В.* Опыт оценки гидродинамических параметров пород электролитическим методом.— Разведка и охрана недр, 1969, № 9.

110. *Соколов Д. С.* Основные условия развития карста.— М.: Госгеолтехиздат, 1962.—322 с.

111. *Соломазов А. И.* Способ измерения скорости движения жидкости по стволу скважины.— Бюл. НТИ, 1963, 3(47), с. 88.

112. *Справочное руководство гидрогеолога.* Т. 1.— М.: Недра, 1967.—592 с.

113. *Сушили В. А.* Методы и техника глубинных исследований в скважинах. М.: Недра, 1964.—109 с.

114. *Сушили В. А.* Нефтепромысловые глубинные измерения.— М.: Гостоптехиздат, 1958.—169 с.

115. *Тампонаж водоносных горизонтов с поверхности при сооружении ствола*/Э. Я. Кипко, О. Ю. Лушникова, Ю. А. Полозов и др. Шахтное строительство, 1972, № 11, с. 23—25.

116. *Техника проведения и методика обработки опытно-фильтрационных работ*/Под ред. В. М. Шестакова и Д. Н. Башкатова. М.:—1969. 196 с. (ВСЕГИНГЕО).

117. *Титков Н. И., Кукин А. Н.* Комплексные исследования поглощающих горизонтов при бурении скважин.— М.: Недра, 1966.—159 с.

118. *Тихов М. Н.* Математическая теория притока к центральной несовершенной скважине.— Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964.—155 с.

119. *Тихонов А. Н., Гласко В. Б.* Применение метода регуляризации в нелинейных задачах.— Журнал вычислительной математики и математической физики 1965, т. 5, № 3, с. 463—473.

120. *Тихонов А. Н.* Решение некорректно поставленных задач и метод регуляризации.— Докл. АН СССР, 1963, т. 151, № 3, с. 501—504.

121. *Торсуев Н. П.* Карст Онего-Северодвинского междуречья.— Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1964.—103 с.

122. *Фитцджеральд Е., Мартинец С. Д.* Методы выявления проницаемых

пластов. — В кн.: IV Международный нефтяной конгресс. Т. 2, М.: Гостоптехиздат, 1956, с. 340—349.

123. Хейн А. Л. Приближенная теория установившегося притока жидкости и газа к несовершенным скважинам с меридианально-симметричной конструкцией забоя. — Труды ВНИИГаз, 1956, вып. VIII, с. 142—178.

124. Хейн А. Л. Теория линейного притока жидкости и газа к скважинам, несовершенным по характеру и степени вскрытия пласта, и новые формулы по расчету их продуктивности. Труды ВНИИГаз, 1953, с. 145—182.

125. Хованский Г. С. Помогамма для расчета трубопроводов при ламинарном и турбулентном режимах течения. — Нефтяное хозяйство, 1956, № 6, с. 53—56.

126. Чарный И. А. О притоке к несовершенным скважинам при одновременном существовании различных законов фильтрации в пласте. — Изв. АН СССР, ОНТ, № 6, 1950, с. 801—818.

127. Чарный И. А. Основы подземной гидравлики. — М., Гостоптехиздат, 1956.

128. Чарный И. А. Подземная гидромеханика. — М. — Л.: Гостехиздат, 1948.—196 с.

129. Чернов Б. С., Базлов М. Н., Жуков А. И. Гидродинамические методы исследования скважин и пластов. — М.: Гостоптехиздат, 1960.—319 с.

130. Черный В. Б. Скважинный термоэлектрический дебитомер. — Прикладная геофизика, 1965, вып. 46, с. 189—204.

131. Шевелев Ф. А. Исследование основных гидравлических закономерностей турбулентного движения в трубах. М.: Госстройиздат, 1953.—208 с.

132. Шевелев Ф. А. Таблицы для гидравлического расчета стальных, чугунных и асбестоцементных водопроводных труб. — М.: Госстройиздат, 1962.—140 с.

133. Шестаков В. М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1974.—327 с.

134. Шестаков В. М. Неустановившаяся фильтрация в двухслойной среде. — Изв. АН СССР, ОНТ. Сер. Механика и машиностроение, 1963, № 6, с. 93—96.

135. Шестаков В. М. Об определении гидрогеологических параметров пласта по данным опытных откачек в условиях неустановившейся фильтрации. — Разведка и охрана недр, 1962, № 12, с. 35—42.

136. Щелкачев В. Н. Анализ существующих методов исследования скважин. — Грозный: 1945.—84 с.

137. Щелкачев В. Н. Влияние проницаемости призабойной области и диаметра скважины на дебит. — Нефтяное хозяйство, 1945, № 10, с. 21—27.

138. Щелкачев В. Н. Влияние проницаемости призабойной области и диаметра скважины на дебит. — Нефтяное хозяйство, 1946, № 2, с. 23—29.

139. Щелкачев В. Н., Лапук Б. Б. Подземная гидравлика. — М.—Л.: Гостоптехиздат, 1949.—524 с.

140. Щелкачев В. Н. Упругий режим пластовых водонапорных систем. — М.—Л.: Госгеолтехиздат, 1948.—144 с.

141. Яблонский В. С. Краткий курс технической гидромеханики. — М.: Физматгиз, 1961.—355 с.

142. Язвин Л. С., Боровский Б. В. Опыт определения расчетных гидрогеологических параметров по данным групповых откачек. — Разведка и охрана недр, 1963, № 4, с. 42—47.

143. Янке Е, Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. — М.: Наука, 1968.—344 с.

144. Bennet G. D., Patten E. P. Constant-Head Pumping. Test of a multiaquifer well to determine characteristics of individual aquifers. — Geol. Surv. Water-Supply Paper. 1536—g, w. 1962, p. 23 (181—203).

145. Chapman H. T., Robinson A. E. A thermal flowmeter for measuring velocity of flow in a well. — Geol. Surv. Water-Supply Paper. N 1544—E, w 1962, III. 12 p.

146. *Dall C. R.* Bottom hole flow survey for determination of fluid and gas movements in wells. — Trans. AIME, 1949, v. 186, p. 205—210.
147. *Hantush M. S.* Drawdown around wells of variable discharge. — Journal of Geophysical Research, 1964, v. 69, N 20, p. 4221—4235.
148. *Hantush M. S.* Hydraulics of wells. — Advances in Hydrosience. v. 1. Academic Press. New-York and London. 1964, p. 281—432.
149. *Jacob C. E., Lohman S. W.* Nonsteady flow to a well constant drawdown in extensive aquifer. — Trans. Am. Geophys. Union. 33, 1959, p. 559—569.
150. *Jacob C. E.* One flow of water in elastic artesian aquifer. — Trans. Amer. Geophys. Union. Ground Water hole. 8, 1940.
151. *Jaeger S.* Numerical values for the temperature in radial heat flow. — J. Math. Phys., 34, 1956, p. 316—321.
152. *Papadopoulos I. S.* Nonsteady flow to multiaquifer wells. — J. of geophysical research. v. 71, N 20, 1966, p. 4791—4797.
153. *Patten E. P., Bennett G. P.* — Methods of flow measurement in well bores. — Geol. Surv. Water-Supply Paper. w. 1962, N 1544—C, IV, p. 28.
154. *Petersen J. S., Rochwer C., Albertson M. L.* Effect of well screens on flow into wells. — Proc. Amer. Soc. Civil Engrs., 1953, 79, N 365, 24 p.
155. *Pfister R. J.* An improved water-input profile instrument. Trans. AIME. Jan. 1948, v. 174, p. 205—210.
156. *Saner W. D.* Methods of determining water injection profiles. — Producers Monthly. Dec. 1960, v. 24, N 14, p. 12—14, 16—19.
157. *Wade R. T., Cantroll R. C., Poupon A., Moulin J.* Production logging — the key to optimum well performance. — J. Petrol. Technol., 1965, 17, N 2, p. 137—144.
158. *Walker T., Sherwood J., Sumner C. R., Marshall R.* — The fluid travel log. — J. Petrol. Technol., 1964, 16, N 8, p. 851—858.
159. *Willis D., Glenn J.* Determining injection profiles. — J. Oil and Refining. Feb. 1960, California USA, p. 11—15.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие . . . . .	3
<b>Глава I. Состояние проблемы исследования гидрогеологических скважин с помощью дистанционных методов измерения . . . . .</b>	<b>6</b>
1. Общие принципы исследования гидрогеологических скважин с помощью дистанционных методов . . . . .	6
2. Состояние проблемы исследования скважин в неоднородных водоносных разрезах горных пород на базе глубинной расходомерии . . . . .	8
Выводы . . . . .	16
<b>Глава II. Гидродинамический режим совершенной скважины, заложенной в неоднородной водонасыщенной среде . . . . .</b>	<b>17</b>
1. Гидродинамический режим неработающей скважины . . . . .	17
2. Гидродинамический режим работающей скважины . . . . .	27
3. Гидродинамический режим реагирующей скважины . . . . .	47
Выводы . . . . .	56
<b>Глава III. Гидравлика водопритока в скважину из неоднородной среды . . . . .</b>	<b>58</b>
1. Основное дифференциальное уравнение расходограммы . . . . .	58
2. Интегральная функция водопритока в скважину из однородного пласта (уравнение расходограммы для однородного пласта) . . . . .	71
3. Общее гидродинамическое уравнение водопритока в скважину из неоднородной среды (общее уравнение расходограммы) . . . . .	95
Выводы . . . . .	101
<b>Глава IV. Гидравлические потери напора . . . . .</b>	<b>103</b>
1. Оценка гидравлических потерь напора в стволе скважины . . . . .	103
2. Оценка гидравлических потерь напора в прискважинной зоне . . . . .	113
3. Оценка радиуса проявления скин-эффекта . . . . .	119
Выводы . . . . .	120
<b>Глава V. Методика интерпретации данных гидродинамических исследований скважин на основе глубинной расходомерии . . . . .</b>	<b>121</b>
1. Принципы методики интерпретации данных исследования одиночной возмущающей скважины при неустановившемся режиме возбуждения . . . . .	121
2. Принципы методики интерпретации данных исследования одиночной возмущающей скважины при установившемся режиме возбуждения . . . . .	128
3. Принципы методики интерпретации данных исследования реагирующей скважины при неустановившемся режиме водопритока к возмущающей скважине . . . . .	138
4. Принципы методики интерпретации данных исследования реагирующей скважины при установившемся режиме водопритока к возмущающей скважине . . . . .	147
5. Принципы методики интерпретации данных при комбинированном исследовании скважины . . . . .	150
6. Экспериментальные исследования одиночных возмущающих скважин на основе глубинной расходомерии . . . . .	153
7. Экспериментальные исследования реагирующих скважин на основе глубинной расходомерии . . . . .	190



8. Общие замечания по результатам экспериментальных работ. . . . .	198
Выводы . . . . .	202
<b>Глава VI. Техника расходомерии скважин . . . . .</b>	<b>203</b>
1. Общие принципы построения измерителей расхода жидкости по стволу скважины . . . . .	203
2. Условия работы скважинных расходомеров и основные требова- ния, предъявляемые к ним при гидродинамических исследованиях . . . . .	204
3. Подготовка скважин для расходомерических исследований . . . . .	212
4. Монтажные схемы вспомогательного оборудования для возбужде- ния скважин при расходомерических исследованиях . . . . .	215
Выводы . . . . .	222
<b>Глава VII. Метрология скважинных беспакерных расходомеров тахо- метрического типа . . . . .</b>	<b>223</b>
1. Внутренние (инструментальные) погрешности тахометрических расходомеров . . . . .	223
2. Внешние погрешности беспакерных скважинных расходомеров . . . . .	238
3. Область применения типоразмеров скважинных приборов . . . . .	251
4. Особенности формы расходограммы на местных сопротивлениях ствола скважины . . . . .	255
Выводы . . . . .	262
<b>Глава VIII. Использование расходомерии в комплексе гидрогеологи- ческих работ . . . . .</b>	<b>263</b>
1. Диагностика технического состояния скважин на воду . . . . .	263
2. Исследование поисково-разведочных скважин в неоднородных во- доносных комплексах, представленных скальными породами . . . . .	269
3. Исследование поисково-разведочных скважин в слоистых водо- носных системах песчано-глинистых пород . . . . .	272
4. Исследование наблюдательных скважин опытных кустов . . . . .	278
5. Управление гидрохимическим опробованием подземных вод . . . . .	280
6. Об экономической эффективности использования расходомерии при гидрогеологических работах . . . . .	284
Выводы . . . . .	284
Заключение . . . . .	285
Список литературы . . . . .	287

ИСААК МАРКОВИЧ ГЕРШАНОВИЧ

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В СКВАЖИНАХ МЕТОДОМ РАСХОДОМЕТРИИ

Редактор издательства Л. И. Березовская  
Переплет художника Ю. Е. Фомина  
Художественный редактор Е. Л. Юрковская  
Технические редакторы А. Е. Матвеева, Л. Н. Шиманова  
Корректор А. А. Передерникова

ИБ 2930

---

Сдано в набор 03.12.80 Подписано в печать 06.04.81. Т-06094  
Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Бумага книжно-журнальная. Гарнитура «Литературная» Печать высокая.  
Усл.-печ. л. 18,5. Усл. кр.-отт. 18,75. Уч.-изд. л. 19,61 Тираж 1875 экз. Заказ 2083/7301-2  
Цена 3 р. 10 к.

---

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12, Третьяковский проезд, 1/19.

Московская типография № 6 Союзполиграфпрома  
при Государственном комитете СССР  
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.  
109088, Москва, Ж-88, Южнопортовая ул., 24.