Л. Н. СИНДАЛОВСКИЙ

АNSDIMAT программный комплекс для определения параметров водоносных пластов



#### РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК Санкт-Петербургское отделение Института геоэкологии РАН Санкт-Петербургский государственный университет Геологический факультет

International International Control (2017) and a control of the control of the

### Л. Н. СИНДАЛОВСКИЙ

## ANSDIMAT программный комплекс для определения параметров водоносных пластов



САНКТ-ПЕТЕРБУРГ «НАУКА» 2011 УДК 556 ББК 26.35 С38

### Синдаловский Л. Н. ANSDIMAT – программный комплекс для определения параметров водоносных пластов. – СПб.: Наука, 2011. – 335 с.

#### ISBN 978-5-02-025477-0

Книга является руководством пользователя по работе с многофункциональным программным комплексом ANSDIMAT, ориентированным на интерпретацию опытно-фильтрационных опробований и получение фильтрационных характеристик водоносных пластов. В книге подробно изложены все возможности программного комплекса, предложены удобные алгоритмы ввода данных и обработки исходной информации, описаны условия проведения полевых экспериментов и типовые гидрогеологические схемы, реализованные в комплексе. Большое место уделено математическому аппарату, зашитому в компьютерный код программы. Содержится полезная справочная информация о расчетных схемах, аналитических решениях и способах обработки.

Книга предназначена для пользователей программным комплексом ANSDIMAT, а также для гидрогеологов, занимающихся вопросами изучения, обработки и интерпретации данных опытно-фильтрационных опробований аналитическими и численными методами.

#### Рецензенты

чл.-корр. РАН В. Г. Румынин, д-р геол.-минер. наук С. П. Поздняков

© Л. Н. Синдаловский, 2011

© Издательство «Наука», редакционноиздательское оформление, 2011

ISBN 978-5-02-025477-0

#### введение

Программный комплекс ANSDIMAT (Analytical and Numerical Solutions Direct and Inverse Methods for Aquifer Test – аналитические и численные решения прямыми и обратными методами для опытных опробований водоносных пластов) предназначен для обработки опытно-фильтрационных опробований аналитическими и графоаналитическими методами практически по всем распространенным в гидрогеологической практике типовым расчетным схемам. Большинство схем учитывает влияние плановых и профильных границ с различным типом условий на них. Комплекс предусматривает возможность обработки данных, полученных при проведении откачек как с одной опытной скважиной, так и с системой взаимодействующих скважин. Расход каждой скважины может произвольно меняться во времени. Определение фильтрационных параметров осуществляется по периоду понижения и восстановления уровня в опытной или наблюдательной скважине.

В комплексе представлены аналитические зависимости для напорного водоносного пласта, безнапорного, напорно-безнапорного, планово-неоднородного, водоносных комплексов с перетеканием и слоистых (многопластовых) систем, позволяющих учитывать изменение уровня в смежных пластах и емкость разделяющих слабопроницаемых слоев. Дополнительно пользователю при анализе результатов опытных опробований предлагается оценить влияние плановой и профильной анизотропии, переменной мощности и наклона изучаемых пластов.

В комплексе учитываются несовершенство опытной и наблюдательной скважины по степени вскрытия водоносных пластов, а также емкость и кольматация опытной скважины, конфигурация пьезометра и его инерционность. Для ряда решений предусмотрена возможность сравнить понижение, полученное в пьезометре, с осредненным понижением в наблюдательной скважине.

Программный комплекс включает аналитические зависимости, описывающие понижение в трещиновато-пористых средах различной структуры (например, слоистая или ортогональная система трещин). При этом фильтрационные параметры трещин и блоков оцениваются по изменению уровня как в трещине, так и в блоке. Здесь же учитывается размер, форма блоков и скинэффект трещин. Рассмотрены решения для оценки изменения уровня в водоносном пласте для случая, когда опытная скважина пересекает одиночную вертикальную или горизонтальную трещину.

В комплексе реализован ряд решений для обработки экспресс-опробований, проведенных в различных гидрогеологических условиях. Этот способ опробования водоносных пластов все чаще используется на практике в силу своей простоты и дешевизны. Имеется также возможность получения фильтрационных параметров по данным, полученным при откачке с постоянным понижением в опытной скважине.

В комплекс интегрирован модуль для решения обратных задач, адаптированный для всех нестационарных аналитических зависимостей, находящихся в программном комплексе. Для специалистов, занимающихся численным моделированием, в программу добавлены два численных кода для решения осесимметричных задач фильтрации. Последнее позволяет интерпретировать опытные опробования в сложных гидрогеологических условиях, когда не представляется возможным сделать схематизацию, соответствующую типовой расчетной схеме, включенной в программный комплекс.

АNSDIMAT является программным продуктом, который востребован не только специалистами, занимающимися производственной деятельностью, – оценкой фильтрационных параметров водоносных пластов по данным опытных опробований, но может оказаться полезным для научных работников, изучающих аналитические и численные решения задач фильтрации. Практически для всех расчетных схем приводится несколько альтернативных решений для интерпретации опытных опробований. Эти решения широко освещены в гидрогеологической

литературе, имеют свою историю, свои преимущества и недостатки. В их разработке участвовали такие известные в гидрогеологии авторы, как Тейс (Theis), Джейкоб (Jacob), Хантуш (Hantush), Купер (Cooper), Болтон (Boulton), Ньюман (Neuman), Менч (Moench) и др. Исследователь получает возможность проводить быстрый и наглядный сравнительный анализ решений, проверять достоверность тех или иных зависимостей во времени и пространстве, используя численное моделирование.

Программный комплекс ANSDIMAT – это современная, многомодульная, постоянно развивающаяся и пополняющаяся структура, которая на сегодняшний момент включает:

широкий выбор типовых расчетных гидрогеологических схем;

– набор нестационарных аналитических решений (около 200) для обработки опытно-фильтрационных опробований прямыми и обратными методами; в том числе используются алгоритмы таких известных программ, как: DELAY2 (автор Ньюман, 1986 г.), WTAQ2 (автор Менч, 1995 г.), WTAQ3 (автор Менч, 1997 г.) и DP\_LAQ (автор Менч, 1990 г.);

 набор квазистационарных и стационарных решений для графоаналитической обработки опытно-фильтрационных опробований способом прямой линии (более 100 решений) и способом эталонных кривых (программа строит более 40 разновидностей эталонных кривых);

– редактор для ввода журнала откачек и подготовки файлов в формате программы ANSDIMAT;

– графический редактор для построения графиков индикаторных кривых (порядка 40 видов графиков временного, площадного и комбинированного прослеживания) и интерпретации опытнофильтрационных опробований всеми доступными методами;

 систему экспорта и импорта табличных данных и графических изображений через буфер обмена или файловую систему;

– программу UCODE, адаптированную для решения обратных задач аналитики;

– две численные программы (MODFE и RADFLOW) для решения двухмерных осесимметричных численных фильтрационных моделей;

 графический интерфейс (препроцессор и постпроцессор) для создания моделей и просмотра выходных данных программ MODFE и RADFLOW; – интерактивную справочную систему по использованию всех модулей программного комплекса и подробным описанием аналитических зависимостей, заложенных в него.

Программный комплекс ANSDIMAT разработан в Институте геоэкологии Российской академии наук (Санкт-Петербургское отделение) и Санкт-Петербургском государственном университете. Комплекс прошел все необходимые тесты и испытания, апробирован во многих геологических организациях и университетах России. Для пользователей программы периодически проходят тренинги и семинары. Программный комплекс зарегистрирован в Государственном реестре программ Российской Федерации (сертификат № 2009614366).

#### Глава 1

#### ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ANSDIMAT

Программный комплекс ANSDIMAT состоит из двух блоков: аналитического и численного. Аналитический блок является инструментом для обработки данных опытно-фильтрационных опробований (ОФО) аналитическими и графоаналитическими способами, а численный предназначен для моделирования опытных опробований в двухмерной осесимметричной постановке. Данная книга в основном посвящена работе аналитического блока: изложены правила ввода полевых данных и возможности обработки ОФО, приводится подробная информация о расчетных гидрогеологических схемах, входящих в программный комплекс, а также математический аппарат, описывающий изменение уровня для этих схем в опытных и наблюдательных скважинах в процессе опытного опробования. Краткое руководство по созданию численных моделей, их запуску и просмотру полученного результата на сеточной области изложено в разд. 1.9. Комплекс снабжен интерактивной справочной системой по работе со всеми модулями программы.

Работа с аналитическим блоком программного комплекса состоит из пяти главных этапов: 1) ввод данных опытного опробования в специальный редактор (разд. 1.3); 2) выбор расчетной схемы (разд. 1.4) и условий проведения опробования (разд. 1.5); 3) построение графика индикаторных кривых (разд. 1.6); 4) обработка введенных данных для получения фильтрационных параметров изучаемой среды (разд. 1.7); 5) сохранение полученного результата (разд. 1.8).

#### 1.1. Начало работы с программным комплексом

В разделе приведены основные действия для начинающих пользователей по вводу, просмотру и редактированию данных опытного опробования. Предложены алгоритмы пошаговой работы с программой. Изучение раздела требует запуска программного комплекса на выполнение.

#### 1.1.1. Запуск программного комплекса

Для работы с программным комплексом ANSDIMAT необходимо запустить файл Ansdimat.exe на выполнение. Файл запускается: 1) с рабочего стола компьютера с помощью ярлыка ANSDIMAT или 2) из каталога, куда он был предварительно установлен (например, C:\ANSDIMAT\Ansdimat.exe). После запуска на экране компьютера откроется главное окно программного комплекса (рис. 1.1), в верхней строке которого появится иконка программы, название программы и номер ее версии.



Рис. 1.1. Главное окно программного комплекса ANSDIMAT.

При открытии программы большинство пунктов меню остаются недоступными для использования. Их активизация произойдет после загрузки соответствующих данных (см. далее разд. 1.2 в описании меню «Создать» и «Открыть»).

#### 1.1.2. Создание нового проекта

Проект – набор данных для хранения и обработки одного опытно-фильтрационного опробования.

Внимание! Каждый проект (набор данных) сохраняется в нескольких файлах и должен находиться в отдельном каталоге.

#### Первые шаги к созданию нового проекта:

1) откройте меню «Файл > Создать»; появится диалоговое окно сохранения файла «Подготовить данные для обработки нового опробования»;

2) выберите каталог для сохранения нового проекта (например, C:\ANSDIMAT\TEST); если его нет, то создайте;

3) введите имя файла в соответствующем поле (например, test).

4) нажмите кнопку «*Сохранить*»; программа присвоит файлу расширение ЕАТ и подготовит необходимые данные для ввода требуемой информации; откроется диалоговое окно редактора «*Редактор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования*» (рис. 1.2, *a*); имя редактируемого проекта появится в заголовке редактора (например, [test.eat]).

При первой загрузке редактора проект будет содержать одну опытную скважину (1w) и одну наблюдательную скважину (1p). Это минимальное количество, которое может содержать проект. Оно задается: 1) когда при опробовании есть одна наблюдательная скважина и в опытной скважине не ведется наблюдений за



Рис. 1.2. Диалоговое окно «Редактор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования».

изменением уровня; 2) когда опытная скважина является одновременно и наблюдательной (например, при одиночной откачке или экспресс-опробовании).

Процесс ввода данных опытного опробования в редактор или перенос в него уже имеющегося в электронном виде журнала откачки достаточно прост при определенном навыке пользователя. Минимально, что требуется ввести – это мощность водоносного пласта, время замеров, данные изменения уровня, расход опытной скважины и расстояние от наблюдательной скважины до опытной скважины.

Основные характеристики опытного опробования (количество скважин, мощность пласта, длительность откачки и др.) задаются во вкладке «*Опробование*» (рис. 1.2, *a*). А табличные данные (время замеров, понижение, восстановление уровня, расходы, расстояния и др.) вводятся во вкладке «*Данные*» (рис. 1.2,  $\delta$ ), которая состоит из набора соответствующих электронных таблиц.

Для удобства пользователя в редакторе заложены большие возможности при вводе исходных данных. Ниже приводятся допустимые размерности вводимых величин:

 время замеров – сутки, часы, минуты, секунды или использование специального формата (см. разд. 1.3.2), каждый замер может содержать любую размерность;

– время (длительность откачки, задержка и т.д.) – сутки;

- понижение, восстановление уровня - метры;

мощность, расстояние, радиус скважины, длина фильтра – метры;

 – расход – метры кубические или литры в сутки, час, минуту или секунду (для проекта пользователь выбирает одну из размерностей).

В дальнейшем при обработке программа использует только фиксированные размерности, автоматически преобразуя введенные данные: размерность времени – сутки, длина – метр, расход – метр кубический в сутки. Это касается фактических данных, определяемых фильтрационных параметров и построения графиков. Тем не менее любые значения времени и расхода могут быть по запросу пересчитаны из одной размерности в другую.

Покажем последовательность ввода данных на примере одиночной откачки с постоянным расходом из совершенной опыт-

ной скважины, расположенной в неограниченном в плане изолированном напорном пласте (см. 2.1.1). Предполагается, что наблюдение за понижением уровня осуществляется в опытной скважине.

Алгоритм пошагового ввода данных зависит от наличия информации об изменении уровня: имеются только замеры понижения уровня, только замеры восстановления уровня или данные по понижению и восстановлению уровня.

**Внимание!** При наблюдении за изменением уровня в опытной скважине в качестве расстояния от наблюдательной до опытной скважины обычно принимается ее радиус.

Имеются только замеры понижения уровня:

1) в поле «*Мощность пласта*» задайте мощность водоносного пласта (рис. 1.2, *a*);

2) выберите вкладку «Данные» (рис. 1.2, б): введите время замеров понижения уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы «Время»;

3) нажмите кнопку «Понижение»: введите данные понижения уровня;

4) нажмите кнопку «*Pacxod*»: введите значение постоянного расхода в колонку «*Pacxod*» открывшейся таблицы;

5) нажмите кнопку «*Paccmoяние*»: введите расстояние до опытной скважины, здесь – ее радиус;

6) нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

Имеются только замеры восстановления уровня (данные по понижению уровня отсутствуют):

1) в поле «*Мощность пласта*» задайте мощность водоносного пласта (рис. 1.2, *a*);

2) в поле «Длительность откачки» укажите длительность откачки в сутках;

3) выберите вкладку «Данные» (рис. 1.2, б);

4) нажмите кнопку «*Pacxod*»: введите значение постоянного расхода на период откачки в колонку «*Pacxod*» открывшейся таблицы;

5) нажмите кнопку «*Расстояние*»: введите расстояние до опытной скважины, здесь – ее радиус;

6) нажмите кнопку «Время восстан.»: введите время замеров восстановления уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы;

7) нажмите кнопку «Восстановление»: введите данные восстановления уровня, значения вводятся исходя из условия: понижение в наблюдательной скважине на момент остановки откачки равно нулевому значению восстановления;

8) нажмите кнопку «*Окончание*»: введите понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки;

9) нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

#### Имеются замеры понижения и восстановления уровня:

1) в поле «Мощность пласта» задайте мощность водоносного пласта (рис. 1.2, *a*);

2) в поле «Длительность откачки» укажите длительность откачки в сутках;

3) выберите вкладку «Данные» (рис. 1.2, б): введите время замеров понижения уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы «Время»;

4) нажмите кнопку «Понижение»: введите данные понижения уровня;

5) нажмите кнопку «*Pacxod*»: введите значение постоянного расхода в колонку «*Pacxod*» открывшейся таблицы;

6) нажмите кнопку «*Paccmoяние*»: введите расстояние до опытной скважины, здесь – ее радиус;

7) выберите вкладку «Время восстан.»: введите время замеров восстановления уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы;

8) нажмите кнопку «*Восстановление*»: введите данные восстановления уровня, значения вводятся исходя из условия: понижение в наблюдательной скважине на момент остановки откачки равно нулевому значению восстановления;

9) нажмите кнопку «*Окончание*»: введите понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки;

10) нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

Перечисленного достаточно для перехода к обработке фактических данных (см. 1.1.3). Для более сложных схем и условий может потребоваться ввод дополнительных параметров (см. Приложение 5). Ниже приводится подробный универсальный алгоритм по созданию нового проекта, куда могут входить: задание нескольких опытных и наблюдательных скважин, учет их несовершенства, емкости и положения относительно границ, ввод данных переменного расхода и т.д. Пункты, в конце которых стоит «не обязательно», являются информационными и не влияют на результат обработки. Детальные пояснения к каждому пункту «*Редактора*...» см. в разд. 1.3.

*Создание нового проекта* (работа в диалоговом окне «*Pedakтор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования*»)

**Внимание!** Приведенная последовательность действий не является строгой. Пользователь может вводить данные в произвольном порядке.

1. В поле «*Название*» замените название опытного опробования (не обязательно).

2. В поле «*Имя скв.*» замените имя наблюдательной скважины (не обязательно).

3. Нажмите кнопку «Добавить», если в опробовании принимают участие более одной наблюдательной скважины (кустовая откачка). Программа автоматически присвоит имя скважине: номер, соответствующий положению курсора в списке скважин, плюс латинская буква «р» (например, «2р»).

4. Повторите пункты 2 и 3 для каждой наблюдательной скважины.

**Внимание!** Опытная скважина, в которой проводятся замеры изменения уровня, также является наблюдательной, и ее необходимо включать в список «*Набл. скв.*».

5. Нажмите кнопку «*Опытные скв.*» для переключения списка наблюдательных скважин на список опытных скважин.

6. В поле «Имя скв.» замените имя опытной скважины (не обязательно).

7. Нажмите кнопку «Добавить», если в опробовании принимают участие более одной опытной скважины (групповая откачка). Программа автоматически присвоит имя скважине: номер, соответствующий положению курсора в списке скважин, плюс латинская буква «w» (например, «2w»).

8. Повторите пункты 6 и 7 для каждой опытной скважины.

9. В поле «Мощность пласта» задайте мощность напорного водоносного пласта (см. *m* на рис. 2.1) или начальную обводненную мощность безнапорного пласта (см. *m* на рис. 2.18). Если пластов несколько, то здесь задается мощность основного пласта (пласт, где находится опытная скважина).

10. В поле «*Начальный напор*» задайте начальный напор в водоносном пласте. Служит для построения графиков временного прослеживания напора. Поле обязательно для напорно-безнапорного пласта, для которого необходимо указать начальный напор (см. *H* на рис. 2.19, *б*).

11. В поле «Длительность откачки» укажите длительность откачки в сутках. Требуется для обработки данных восстановления уровня.

12. В поле «Мощность разд. слоя» задайте мощность разделяющего (и/или слабопроницаемого слоя). Требуется для схем с перетеканием (учитывающих емкость разделяющего слоя), слоистых систем (см. *m*' на рис. 2.24 или 2.30) или для двухслойной системы (см. *m*' на рис. 2.28). Также участвует в расчете параметра перетекания (см. 1.7.1.3).

13. В поле «Мощность пласта №2» задайте мощность смежного пласта (см.  $m_2$  на рис. 2.24). Это информационное поле, ни в каких расчетах не участвует (не обязательно).

14. В поле «Мощность разд. слоя №2» задайте мощность второго разделяющего слоя при его наличии. Требуется для слоистых систем (см. *m*" на рис. 2.30). Также участвует в расчете параметра перетекания (см. 1.7.1.3).

15. В поле «Ширина» задайте ширину пласта-полосы (см. *L* на рис. 2.4). Требуется для схем, ограниченных в плане двумя прямолинейными границами.

16. Нажмите кнопку «*Схема*». Появится диалоговое окно «*Выбор расчетной схемы*». Этот пункт можно пропустить и перейти к пункту 17: по умолчанию программа назначит схему Тейса – неограниченный в плане напорный пласт (рис. 2.1).

16.1. Выберите расчетную схему (порядок работы см. в разд. 1.4).

16.2. Нажмите кнопку «*OK*» для подтверждения выбора схемы и закрытия диалогового окна «*Выбор расчетной схемы*».

17. Выберите вкладку «Данные».

**Внимание!** Если данные уже набраны в другом редакторе (например, Excel), то используйте «копирование» и «встав-ку» для переноса информации.

Внимание! Если данных по понижению уровня нет (проводились замеры только восстановления), то перейдите к пункту 20.

18. Введите время замеров понижения уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы. Каждый замер допускается проставлять в любой удобный для пользователя столбец. Соответственно в остальных столбцах пересчет времени происходит автоматически.

19. Нажмите кнопку «Понижение». Введите данные понижения уровня для каждой наблюдательной скважины.

20. Нажмите кнопку «*Pacxod*». Используется при откачке с постоянным расходом.

**Внимание!** Даже если предполагается обрабатывать данные опытного опробования как откачку с переменным расходом, то рекомендуется ввести в эту таблицу средний или начальный расход. Это может пригодиться для использования графоаналитических способов при приближенной обработке с постоянным расходом или при обработке начального участка (до первого изменения расхода).

20.1. Выберите размерность вводимого расхода в списке «*Pacxod*» в левом нижнем углу окна редактора.

20.2. Введите значение постоянного расхода для каждой опытной скважины в колонку «*Pacxod*».

20.3. В колонке «*Старт*» укажите время (в сутках) включения опытной скважины от начала опробования. Требуется при использовании групповой откачки с постоянным расходом и асинхронным началом работы опытных скважин. Используется только для схемы Тейса (см. 3.3.1.1). 20.4. В колонке «Понижение» укажите постоянное понижение в опытной скважине. Используется только для откачек с постоянным понижением (разд. 3.1).

**Внимание!** При откачке с постоянным расходом, постоянным понижением или при экспресс-опробовании перейдите к пункту 22.

21. Нажмите кнопку «*Pacxod dQ*». Введите значение переменного расхода для каждой опытной скважины. Размерность вводимого расхода выбирается в списке «*Pacxod*» в левом нижнем углу окна редактора.

**Внимание!** Размерность вводимого постоянного и переменного расхода должна быть одинаковой.

22. Нажмите кнопку «*Расстояние*». Введите горизонтальное расстояние от каждой опытной скважины до каждой наблюдательной скважины (см. *r* на рис. 2.1 или 3.6).

**Внимание!** При обработке одиночной откачки (наблюдение за изменением уровня проводят только в одной опытной скважине) или при экспресс-опробовании в пункте 22 в качестве расстояния обычно указывается радиус опытной скважины.

23. Нажмите кнопку «Смещение». Укажите вертикальное расстояние между центрами фильтров каждой опытной и каждой наблюдательной скважиной (см. *z* на рис. 2.16). Таблица используется для несовершенных по степени вскрытия скважин (схемы линейного и точечного источника). Если значения не заданы, то предполагается 0: центры фильтров всех скважин находятся на одном уровне.

Внимание! Для наблюдательной скважины, находящейся в разделяющем слабопроницаемом слое, в пункте 23 указывается расстояние от центра фильтра этой скважины до кровли или подошвы основного водоносного пласта (см.  $z_n$  на рис. 2.25).

**Внимание!** Для наблюдательной скважины, находящейся в блоке (схема трещиновато-пористой среды), в пункте 23 указывается расстояние от центра блока до точки, где определяется понижение (см. *z* на рис. 2.41).

24. Нажмите кнопку «Скважина». В таблице задаются значения для всех скважин: опытных и наблюдательных.

**Внимание!** Если опытная скважина является и наблюдательной, то значения для нее в таблице вводятся дважды: один раз как для опытной, а второй – для наблюдательной. Как правило, эти значения совпадают.

24.1. В колонке «Граница» задайте горизонтальное расстояние от каждой скважины до плановой границы. Используется для расчетных схем полуограниченных (рис. П2.2) и ограниченных в плане (рис. П2.4). На рисунках:  $L_w$  – расстояние до опытной скважины,  $L_p$  – до наблюдательной скважины.

Внимание! Для случая, когда опытная скважина расположена в вертикальной трещине (схема трещиновато-пористой среды, см. 2.11.2), в пункте 24.1 для наблюдательных скважин задается горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до трещины (см.  $L_p$  на рис. 2.42,  $\epsilon$ ).

24.2. В колонке «Верх/низ» задайте вертикальное расстояние от центра фильтра скважины до кровли пласта. Используется для полуограниченных и ограниченных в разрезе расчетных схем с несовершенными по степени вскрытия скважинами (см. на рис. 2.16:  $L_{Tw}$  – для опытной,  $L_{Tp}$  – для наблюдательной скважины). Для полуограниченного в разрезе пласта со стороны подошвы необходимо указать расстояние от центра фильтра скважины до подошвы (см. на рис. 2.14, *б*:  $L_{Bw}$  – для опытной,  $L_{Bp}$  – для наблюдательной скважины). **Внимание!** Если значения в пункте 24.2 не заданы, то принимается величина, равная половине мощности пласта, т.е. скважина находится в центре водоносного пласта.

**Внимание!** Для безнапорного пласта с несовершенными по степени вскрытия скважинами в пункте 24.2 задается вертикальное расстояние от центра фильтра скважины до начального уровня грунтовых вод.

24.3. В колонке «Граница 2» для схемы наклонного пласта задайте расстояние до горизонтальной линии, на которой находится опытная скважина (см.  $L'_p$  на рис. 2.40).

24.4. В колонке «Фильтр» задайте длину фильтра скважин (см. на рис. 2.16:  $l_w$  – для опытной скважины,  $l_p$  – для наблюдательной скважины). Используется для схем, учитывающих несовершенство по степени вскрытия скважины.

**Внимание!** Если значения в пункте 24.4 не заданы, то длина фильтра принимается равной мощности водоносного пласта (или обводненной мощности для безнапорного пласта), т.е. скважина совершенна по степени вскрытия.

24.5. В колонке «*Радиус*» задайте радиус опытной и наблюдательной скважины. Используется в экспресс-опробованиях и в схемах, где учитывается емкость опытной скважины или пьезометра.

Внимание! Если данных о восстановлении уровня нет, то перейдите к пункту 28.

25. Нажмите кнопку «Время восстан.». Введите время замеров восстановления уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы. Каждый замер допускается проставлять в любой удобный для пользователя столбец. Соответственно в остальных столбцах пересчет времени происходит автоматически. Начало отсчета времени восстановления – момент остановки откачки.

26. Нажмите кнопку «Восстановление». Введите данные восстановления уровня для каждой наблюдательной скважины. Значения вводятся исходя из условия: максимальное понижение в скважине равно нулевому значению восстановления.

27. Нажмите кнопку «Окончание». Введите понижение уровня на момент остановки откачки для каждой наблюдательной скважины. При обработке восстановления уровня этот пункт является обязательным.

**Внимание!** Для экспресс-опробования в пункте 27 вводится начальный скачок уровня в опытной скважине (см.  $s^0$  на рис. 3.2).

28. Нажмите кнопку «Создать». Программа преобразует введенную информацию в формат обработки данных программного комплекса ANSDIMAT и создаст файл с расширением ОАТ.

29. Нажмите кнопку «*OK*». Программа сохранит все изменения в редакторе и закроет диалоговое окно редактора.

### 1.1.3. Открытие проекта для обработки

После создания проекта пользователь может перейти непосредственно к определению фильтрационных параметров, для чего необходимо открыть проект для обработки. При нехватке информации или ее ошибочности (например, нет расстояния до опытной скважины, неправильно заданы временные замеры и т.д.) программа выдаст соответствующее предупреждение (см. Приложение 6) и загрузит окно редактора (рис. 1.2). Необходимо в редакторе найти и исправить ошибочные данные, а затем нажать кнопку «*Создать*» редактора для повторного преобразования информации в формат обработки данных (см. 1.1.2).

# Последовательность действий при открытии проекта для обработки:

1) откройте меню «Файл > Открыть», появится диалоговое окно «Открыть данные опробования»;

2) в списке «*Tun файла*» внизу диалогового окна выберите «График (\*.oat)»;

3) выберите проект для обработки: файл с расширением ОАТ;

4) нажмите кнопку «Открыть»;

5) появится графическое диалоговое окно «Основной график» с графиком временного прослеживания изменения уровня по всем имеющимся наблюдательным скважинам (см. рис. 1.25), имя загруженного проекта отобразится в заголовке главного окна программы (например, [C:\ANSDIMAT\TEST\test.oat]);

б) для построения графика в других координатах используйте меню «Выбор > График» (см. 1.6.1.1);

7) для обработки данных используйте меню «Обработка» (разд. 1.7).

При первом открытии проекта для обработки программа переходит: 1) к условию постоянства расхода опытной скважины и 2) к данным периода понижение уровня, если в редакторе есть данные понижения, или к данным по периоду восстановления уровня, если данные о понижении отсутствуют. Для изменения этих условий используйте меню «Выбор > Опробование» (разд. 1.5).

**Внимание!** При выборе схемы «Откачка с постоянным понижением» программа всегда загружает данные о понижении уровня, а при выборе схемы «Экспресс-опробование» – данные о восстановлении уровня.

#### 1.1.4. Редактирование ранее созданного проекта

Для внесения дополнительной информации в проект (например, новые скважины, замеры уровня) или ее изменения необходимо войти в редактор.

## Последовательность действий при редактировании ранее созданного проекта:

1) откройте меню «Файл > Открыть»; появится диалоговое окно «Открыть данные опробования»;

2) в списке «Тип файла» внизу диалогового окна выберите «Редактор (\*.eat)»;

3) выберите нужный для редактирования проект: файл с расширением ЕАТ;

4) нажмите кнопку «Открыть»;

5) появится диалоговое окно «*Редактор для ввода данных* опытно-фильтрационного опробования» (см. рис. 1.10), имя редактируемого проекта отобразится в заголовке редактора (например, [test.eat]);

6) внесите необходимые изменения в требуемые поля редактора (разд. 1.3);

7) нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

Если проект уже открыт для обработки, то редактор можно вызвать через меню «Файл > Редактор». В этом случае программа автоматически загрузит данные проекта в окно редактора, но вступление в силу сделанных изменений произойдет при повторном открытии проекта для обработки (см. 1.1.3).

#### 1.1.5. Работа с диалоговыми окнами

При вызове различных пунктов меню в окне программного комплекса будут появляться специальные диалоговые окна, работа с которыми подробно описана ниже. Диалоговые окна, как правило, блокируют работу других модулей программного комплекса до их закрытия. На большинстве окон располагаются кнопки, предназначенные для выполнения тех или иных действий. Ниже приводится описание кнопок общего назначения:

– кнопка «*OK*» – закрытие диалогового окна с сохранением сделанных изменений в этом окне и их применением;

– кнопка «*Отмена*» – выход из диалогового окна без сохранения изменений;

– кнопка «Применить» – сохранение сделанных изменений и их применение без закрытия диалогового окна;

кнопка «Закрыть» – закрытие диалогового окна: используется, как правило, в окнах, где не требуется вносить какиелибо изменения, влияющие на работу других окон или режимов программного комплекса;

– кнопка «*Справка*» – вызов справочной системы с выходом на описание текущего диалогового окна; справочная система также вызывается с помощью клавиши клавиатуры F1.

#### 1.2. Главное меню программы ANSDIMAT

Основное управление программным комплексом ANSDIMAT осуществляется через главное меню (рис. 1.3). Все пункты меню «Файл», «Вид», «Выбор», «Обработка», «Инструменты» (а также панель инструментов) относятся к работе с аналитическим блоком. Меню «Модель» предназначено для работы с численными блоками. Остальные имеют общее назначение. Пользователь может одновременно работать как с аналитическим блоком, так и с одним из численных блоков.



Рис. 1.3. Главное меню и панель инструментов программы ANSDIMAT.

Ниже дается краткое описание всех пунктов меню программного комплекса. Более подробную информацию смотри в посвященных им разделах. Пункты меню, которые вынесены на панель инструментов для быстрого доступа, сопровождаются соответствующими им иконками. Доступность тех или иных пунктов меню зависит от выбранной схемы, условий проведения опробования, наличия соответствующей информации и выбранного графика для обработки данных.

**Меню** «*Файл*». Меню (рис. 1.4) предназначено для создания и открытия проектов, для сохранения информации в табличном или графическом виде, а также для изменения основных настроек графического редактора.

Меню «*Создать*». Создание нового проекта: ввод данных для обработки нового опробования. Необходимо присвоить имя файлу для нового проекта. Осуществляется загрузка диалогового окна «*Редактор...*» (подробнее см. разд. 1.3).

**Внимание!** Данные для обработки каждого опробования хранятся в нескольких файлах и должны находиться в отдельном каталоге.

Создать Открыть	Ctrl+O
Редактор	Ctrl+E
Сохранить dat-файл	
Сохранить bmp-файл	
Настройки	
C:\ANSDIMAT\SAMPLE1\sample1.oat	
C:\ANSDIMAT\SAMPLE3\sample3.oat	
C:\ANSDIMAT\SAMPLE2\sample2.oat	
Выход	

Рис. 1.4. Пункты меню «Файл».

Меню «Открыть». Открытие ранее созданного проекта в окне графика (выберите тип графика «График (\*.oat)») или окне редактора (тип графика «Редактор (\*.eat)»). В первом случае проект открывается для обработки, во втором – для редактирования (подробнее см. 1.1.3 или 1.1.4). Открытие проекта автоматически закрывает окно «Основной график» с данными из другого проекта при его наличии.

Меню «*Pedakmop*». Загрузка диалогового окна «*Pedakmop*...» для просмотра, изменения или добавления данных проекта, который открыт в окне «*Основной график*» (подробнее см. разд. 1.3). Для вступления в силу сделанных изменений необходимо вновь открыть данные опробования в окне графика (см. меню «*Открыть*»).

Меню «*Coxpaнumь dat-файл*». Сохранение данных изменения уровня или расхода во времени в выбранных скважинах в текстовом (табличном) формате DAT (подробнее см. разд. 1.8).

Меню «*Coxpaнumь bmp-файл*». Сохранение окна «*Oc*новной график» в графическом формате ВМР (подробнее см. разд. 1.8).

Меню «*Настройки*». Настройка внешнего вида графика и элементов управления (подробнее см. 1.6.6).

Список файлов. Список ранее загруженных проектов. Осуществляется открытие данных опробования в виде графика (файлы с расширением ОАТ) или в виде таблиц (файлы с расширением EAT).

Меню «Выход». Выход из программы ANSDIMAT.

	Все графики	
	s - lg(t)	
	s - lg(t / r ^ 2)	
	s - lg(r)	
	$\lg(s) - \lg(t \mid r \land 2)$	
	lg(s) - lg(t)	
	s-t≙n	
	H-t	
	H - lg(t)	
	Q-t	
	Q - lg(t)	
	Обновить	F5
v	Таблица	

Рис. 1.5. Пункты меню «Bud».

Меню «Вид». Меню (рис. 1.5) предназначено для загрузки графиков индикаторных кривых в дополнительных (вспомогательных) графических окнах, перерисовки основного графика и отображения таблицы фактических данных.

Меню «Все графики». Загрузка для просмотра всех основных графиков, а также графиков напора и расхода в дополнительных графических окнах для выбранных наблюдательных скважин (подробнее см. 1.6.3).

Список графиков. Загрузка для просмотра одного из основных графиков, графика напора или расхода в дополнительном графическом окне (подробнее см. 1.6.3).

Меню «Обновить». Перерисовка графического окна «Основной график». Все ранее построенные теоретические кривые и другие построения (за исключением фактических данных и текстовой информации) стираются.

Меню «Таблица». Показать / спрятать таблицу с исходными данными в левой части экрана программного комплекса.

Схема Опробование	
График	F3
Скважина	F2
Время	Ctrl+F2

Рис. 1.6. Пункты меню «Выбор».

Меню «Выбор». Меню (рис. 1.6) предназначено для смены расчетной гидрогеологической схемы, выбора периода опробования и условий его проведения, построения требуемого графика индикаторных кривых, а также для выбора наблюдательных скважин и временных замеров для обработки.

Меню «Схема». Временная замена расчетной гидрогеологической схемы для последующей обработки. Осуществляется загрузка диалогового окна «Выбор расчетной схемы» (подробнее см. разд. 1.4).

Меню «Опробование». Выбор условий проведения и периода (откачка, восстановление) опробования для обработки. Осуществляется загрузка диалогового окна «Условия проведения опробования» (подробнее см. разд. 1.5).

Меню «График». Выбор графика индикаторной кривой для обработки фактических данных опытного опробования и определения по ним фильтрационных параметров водоносного пласта. Осуществляется загрузка диалогового окна «Выбор графика» с переходом на вкладку «График» (подробнее см. 1.6.1.1).

Меню «*Скважина*». Выбор наблюдательных скважин для обработки. Осуществляется загрузка диалогового окна «*Выбор* графика» с переходом на вкладку «*Скважина*» (подробнее см. 1.6.1.2). При обработке откачки с переменным расходом здесь также выбирают опытные скважины для построения графика Q - t (см. 1.6.4).

Меню «*Время*». Выбор временных замеров для обработки данных на графиках площадного прослеживания. Осуществляется загрузка диалогового окна «*Выбор графика*» с переходом на вкладку «*Время*» (подробнее см. 1.6.1.3).

Меню «Обработка». Меню (рис. 1.7) предназначено для обработки фактических данных опытно-фильтрационного опробования аналитическими и графоаналитическими способами.





Рис. 1.7. Пункты меню «Обработка» и пункты подменю «Обратное решение».

Меню «Прямое решение». Решение прямой фильтрационной задачи путем подбора искомых коэффициентов. Осуществляется загрузка диалогового окна «Подбор параметров» (подробнее см. 1.7.1.1).

Меню «Графоаналитический способ». Определение фильтрационных параметров графоаналитическим способом. Способ (прямая линия, горизонтальная прямая линия или эталонная кривая) программа выбирает автоматически в зависимости от расчетной схемы, условий проведения опробования и выбранного графика (подробнее см. 1.7.2).

Меню «Способ биссектрисы». Определение пьезопроводности способом биссектрисы. Осуществляется загрузка диалогового окна «Способ биссектрисы» (подробнее см. 1.7.3).

Меню «Обратное решение». Решение обратной задачи фильтрации при помощи метода наименьших квадратов и/или программы UCODE. Меню содержит два подменю: «Метод наименьших квадратов» и «UCODE».

1. Подменю «*Memod наименьших квадратов*» осуществляет загрузку диалогового окна «*Автоматический подбор*» для поиска фильтрационных параметров методом наименьших квадратов (подробнее см. 1.7.4.1).

2. Подменю «UCODE» осуществляет загрузку диалогового окна «Обратное решение (UCODE)» для поиска фильтрационных параметров с помощью адаптированной для каждого аналитического решения программы UCODE (подробнее см. 1.7.4.2).

Меню «Инструменты». Меню (рис. 1.8) предназначено для просмотра фактических и расчетных значений, для оформления графика, разбивки переменного расхода на ступени и др.

Меню «Значение». Детальный просмотр фактических или расчетных данных в окне «Основной график» (подробнее см. 1.6.5).

Меню «Прямая». Перемещение линии на графике для поиска прямолинейных участков. Данный пункт меню не предназначен для определения фильтрационных параметров (подробнее см. 1.7.2.1).

Значение	Ctrl+F5
Прямая	Ctrl+L
Название графика	
Текст	Ctrl+T
Копия и буфер обмена	F9
Свойства осей	F4
Вид кривых	Shift+F4
Инверсия	Shift+F2
Ступени расхода	
Наложить график расхода	I

Рис. 1.8. Пункты меню «Инструменты».

Меню «*Название графика*». Заменить заголовок графика. Осуществляется загрузка диалогового окна «*Надпись*» (подробнее см. 1.6.2.3).

Меню «*Текст*». Поместить текстовую информацию в окно построения графика (подробнее см. 1.6.2.3).

Ш Меню «Копия и буфер обмена». Создать дополнительное окно с копией окна «Основной график». Автоматически изображение помещается в буфер обмена операционной системы.

Меню «Свойства осей». Изменение координатных осей графика и их свойств. Осуществляется загрузка диалогового окна «Свойства координатных осей» (подробнее см. 1.6.2.1).

Меню «Вид кривых». Изменение внешнего вида индикаторных кривых. Осуществляется загрузка диалогового окна «Вид индикаторных кривых» (подробнее см. 1.6.2.2).

ЦТ Меню «Инверсия». Изменение оси ординат. Например, вместо графика  $(s_1/s_2)$ —lgt строится  $(s_2/s_1)$ —lgt и наоборот, а вместо графика  $(s_1 - s_2)$ —lgt строится  $(s_2 - s_1)$ —lgt. Используется для графиков, построенных по изменению уровня в двух скважинах (подробнее см. разд. 1.6).

Меню «*Ступени pacxoda*». Разбивка переменного во времени расхода на ступени. Осуществляется загрузка диалогового окна «*Ступени переменного расхода*». Использование данного пункта меню обязательно при обработке опробования с учетом переменного расхода. Требуются данные об изменении расхода опытной скважины во времени (подробнее см. 1.6.4.1).

Меню «*Наложить график расхода*». Наложение графика расхода на график временного прослеживания (подробнее см. 1.6.4).

Меню «*Modeль*». Меню (рис. 1.9) предназначено для работы с одним из численных блоков, включенных в программный комплекс ANSDIMAT: препроцессор и постпроцессор для программ MODFE и RADFLOW (см. разд. 1.9).



Создать... Открыть... Запуск RADFLOW... Постпроцессор...

Рис. 1.9. Пункты меню «Модель», подменю «MODFE» и «RADFLOW».

Подменю «Создать». Создание новой численной модели в формате программы MODFE или RADFLOW. Необходимо присвоить имя файлу для новой модели. Загрузка диалогового окна «Создать новую модель».

Внимание! Данные для моделирования хранятся в нескольких файлах и для каждой модели должны находиться в отдельном каталоге.

Подменю «*Открыть*». Открытие ранее созданной численной модели для редактирования и просмотра. Загрузка графического редактора (препроцессор для программы MODFE или RADFLOW).

Подменю «Зоны неоднородности». Задание зон неоднородности для модели программы MODFE. Вызов диалогового окна «Фильтрационные свойства зон неоднородности».

Подменю «Запуск MODFE». Запуск программы MODFE на выполнение. Загрузка диалогового окна «Запуск MODFE».

Подменю «Запуск RADFLOW». Запуск программы RADFLOW на выполнение. Загрузка диалогового окна «Запуск RADFLOW».

Подменю «Постпроцессор». Просмотр выходного файла программы MODFE или RADFLOW. Загрузка диалогового окна «Постпроцессор для MODFE» или «Постпроцессор для RADFLOW». Необходимо указать имя выходного файла.

Меню «Язык». С помощью данного меню осуществляется переключение языка интерфейса и справочной системы между русским и английским.

Меню «Окно». Расположение и список загруженных окон. В программе ANSDIMAT предусмотрено одновременное хранение большого количества окон: основной график, вспомогатель-

ные графики, окно численной программы, копии сохраненных окон. Через данное меню пользователь может быстро переходить к любому окну или располагать их на экране в каком-либо порядке: по горизонтали, по вертикали или каскадом.

Меню «Справка». Вызов справочной системы программного комплекса ANSDIMAT. Справка интерактивна и, как правило, соответствует текущей работе программы. В справку также включена информация о расчетных схемах, входящих в комплекс, аналитических и графоаналитических зависимостях для определения фильтрационных параметров и о базовых уравнениях фильтрации, описывающих изменение уровня в опытных и наблюдательных скважинах.

### 1.3. Ввод данных ОФО: диалоговое окно «Редактор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования»

Информация об опытном опробовании заносится в специальный редактор. Редактор позволяет сохранять, добавлять или заменять имеющуюся информацию. Прежде чем перейти к непосредственной обработке фактических данных, необходимо преобразовать введенную информацию нажатием кнопки «*Coздаmь*» диалогового окна «*Pedakmop...*» (рис. 1.10).

Внимание! Программный комплекс хранит данные опытного опробования в двух форматах: 1) в формате редактора для их отображения и изменения в окне «*Редактор...»* и 2) в специальном формате, предназначенном для построения графиков и получения искомых параметров. Формат редактора программа запоминает при нажатии кнопки «*Сохранить»*. Второй формат создается на его основе нажатием кнопки «*Создать»*.

Диалоговое окно «*Редактор*...» вызывается через главное меню «Файл > Открыть» (открытие файла с расширением ЕАТ) или «Файл > *Редактор*» (открытие редактора для уже загруженного для обработки проекта). В первом случае открытый ранее для обработки проект будет закрыт.

Окно состоит из трех вкладок: «Опробование», «Данные» и «Опции». С правой стороны окна (рис. 1.10) расположены специальные кнопки, назначение которых описано в табл. 1.1. Недоступные кнопки на рис. 1.10 предназначены для работы с табличной информацией и активизируются при работе с вкладкой «Данные». Функции этих кнопок будут объяснены в соответствующих разделах.

Таблица 1.1

Кнопка «Загрузить»	Загрузить данные изменения уровня в формате DAT. Параметры загрузки определяются в опциях (см. вкладку «Опции», см. 1.3.3)
Кнопка «Создать»	Создать набор входных файлов в специальном формате программы ANSDIMAT. После нажатия кнопки пользова- тель может непосредственно переходить к обработке опыт- ного опробования (при условии достаточности для этого данных)
Кнопка « <i>Coxpaнum</i> ь»	Сохранить сделанные в окне « <i>Редактор</i> » изменения в формате редактора
Кнопка «ОК»	Сохранить сделанные изменения и закрыть диалоговое окно « <i>Pedakmop</i> »

Пояснение к кнопкам диалогового окна «Редактор...»

**Внимание!** Кнопка «*OK*» сохраняет данные в формате редактора. Чтобы подготовить проект для обработки, необходимо нажать кнопку «*Создать*».

# 1.3.1. Общая информации по опытному опробованию: вкладка «Опробование»

Данная вкладка (рис. 1.10, табл. 1.2) предназначена для задания основных характеристик ОФО: выбирается предполагаемая расчетная схема, определяется количество опытных и наблюдательных скважин, участвующих в опробовании, вводится их номер, задается мощность водоносного пласта и разделяющего слоя, начальный напор, длительность откачки и др. Часть этих параметров обязательна для последующей обработки, другие вводятся по мере необходимости.



Рис. 1.10. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Опробование».

#### Таблица 1.2

#### Пояснения к вкладке «Опробование»

Поле «Название»	Название опытного опробования (до 80 символов). При первой загрузке диалогового окна « <i>Pedakmop</i> » в поле появятся слово «Опробование» и имя редактируе- мого проекта (например, «Опробование – test)
Список	Список имеющихся в проекте опытных или наблю- дательных скважин (см. ниже кнопки переключения)
Кнопка переключе- ния «Опытные скв.»	Переход к отображению списка опытных скважин
Кнопка переключе- ния «Набл. скв.»	Переход к отображению списка наблюдательных скважин
Кнопка «Вверх»	Перемещение скважины в списке на одну позицию вверх
Кнопка «Вниз»	Перемещение скважины в списке на одну позицию вниз
Кнопка «Добавить»	Добавить новую скважину. Новая скважина добавля- ется в конец списка

Кнопка «Вставить»	Вставить новую скважину на место курсора в списке скважин
Кнопка «Удалить»	Удалить текущую скважину. Все ранее введенные данные по этой скважине будут удалены
Поле «Имя скв.»	Заменить имя выделенной в списке скважины
Поле «Мощность пласта»	Задание мощности напорного водоносного пласта или начальной обводненной мощности безнапорного пласта (см. <i>m</i> на рис. 2.1 или 2.18). Для пласта пере- менной мощности здесь задается мощность пласта в районе опытной скважины (см. <i>m</i> <sub>w</sub> на рис. 2.38) Поле обязательно для перехода к обработке
Поле «Начальный напор»	Задание начального напора. Значение используется для построения графиков изменения напора во времени Для схемы напорно-безнапорного пласта здесь необ- ходимо задать начальный напор, отсчитанный от по- дошвы напорного пласта (см. <i>H</i> на рис. 2.19, <i>б</i> )
Поле «Длительность откачки»	Задание длительности откачки (в сут). Используется для обработки данных восстановления уровня Нажатие левой кнопки мыши и клавиши Ctrl – вызов информационного окна с пересчетом времени для раз- ных размерностей (рис. 1.11, <i>a</i> ) Нажатие левой кнопки мыши и клавиши Shift – вы- зов диалогового окна для пересчета времени в сутки из секунд, минут или часов (рис. 1.11, <i>б</i> )
Поле «Мощность разд. слоя»	Задание мощности разделяющего слоя при его на- личии. Используется для схем с перетеканием и слоис- тых систем (см. <i>m</i> ' на рис. 2.20). Для схемы двух- слойного безнапорного комплекса здесь задается на- чальная обводненная мощность верхнего слабопроница- емого слоя (см. <i>m</i> ' на рис. 2.28)
Поле «Мощность пласта №2»	Задание мощности второго водоносного пласта при его наличии. Используется для схем с перетеканием или слоистых систем (см. m <sub>2</sub> на рис. 2.24). Значение в поле является информативным и не участвует в каких-либо расчетах
Поле «Мощность разд. слоя №2»	Задание мощности второго разделяющего слоя при его наличии. Используется для схем с перетеканием или слоистых систем (см. <i>m</i> <sup>"</sup> на рис. 2.29). Значение в поле участвует в оценке параметров слоистых систем (см. решение (2.7.10)) и в пересчете параметра перетекания (см. 1.7.1.3)

Поле «Ширина пласта-полосы»	»	Задание ширины пласта для схемы пласт-полоса (см. <i>L</i> на рис. 2.4). Используется для ограниченных в плане пластов					
Поле «Угол»		Задание у настоящей в	угла (в 1 ерсии н	град) для с е использу	схем ется	ы углово	ого пласта. В
Кнопка « <i>Схема</i>	»	Вызов ди (разд. 1.4) д схемы. Если окну, то про ченного в пл	алогово для выб и польз грамма ане нап	ого окна «А ора расче: ователь но назначит с орного пла	Выбо гной е об ехем <u>р</u> аста	ор расчен гидроге бращается у Тейса д (см. 2.1.1	пной схемы» сологической а к данному для неограни- )
а	t = 1 $t = 3$ $t = 3$ $lg(t)$ $ln(t)$	0.1 сут 2.4 ч 144 мин 8640 с = -1 = -2.302585	б	Сутки Часы Минуты Секунды	> > >	Сутки Сутки Сутки	

Рис. 1.11. Вспомогательные окна для просмотра значения времени в различных размерностях (*a*) и пересчета времени в сутки (*б*).

# 1.3.2. Ввод табличных данных по опытному опробованию: вкладка «Данные»

Вкладка представляет собой набор электронных таблиц для ввода данных изменения уровня, геологических и технических условий проведения опробования и другой необходимой информации для обработки и интерпретации полевых данных. Выбор таблицы осуществляется через кнопки переключения, имеющие соответствующие названия (рис. 1.2, б):

«Время» – ввод времени замеров понижения уровня,

«Понижение» – ввод данных понижения уровня в наблюдательных скважинах,

«Pacxod» - ввод постоянного расхода опытных скважин,

«*Pacxod dQ*» – ввод переменного во времени расхода опытных скважин,

«Расстояние» - ввод расстояния до опытных скважин,

«Смещение» – ввод вертикального расстояния между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин при их несовершенстве по степени вскрытия, «Скважина» – ввод дополнительной информации по скважинам: расстояние до границ, длина фильтра, радиус скважины и т.д.,

«Время восстан.» – время замеров восстановления уровня,

«Восстановление» – ввод данных восстановления уровня в наблюдательных скважинах,

«*Окончание*» – ввод изменения уровня на конец откачки / нагнетания в наблюдательных скважинах,

«Замеры по скв.» – ввод временных замеров и данных понижения или восстановления уровня по выборочным наблюдательным скважинам.

Первые две кнопки переключения (*«Время»* и *«Понижение»*) предназначены также для ввода данных повышения уровня при условии, что при опробовании осуществляется не откачка, а нагнетание жидкости. Ряд таблиц сопровождается пояснительными рисунками с указанием необходимого для ввода параметра.

В таблицах для ввода данных допускается пропуск недостающих значений, за исключением специально оговоренных случаев (см. описание таблиц ниже).

Копировать	
Вставить	
Вырезать	

Рис. 1.12. Контекстное меню для редактирования. При нажатии правой кнопки мыши в поле одной из таблиц появится контекстное меню (рис. 1.12, табл. 1.3), предназначенное для редактирования и обмена информацией между внешними электронными таблицами (или текстовыми редакторами) и редактором программного комплекса ANSDIMAT через буфер обме-

на операционной системы компьютера.

Таблица 1.3

Меню «Копировать»	Копировать значения выделенных ячеек в буфер обмена
Меню «Вставить»	Вставить значения из буфера обмена в таблицу. При вставке времени замеров таблица при необходи- мости автоматически увеличивается до требуемого количества строк
Меню «Вырезать»	Удалить значения в выделенных ячейках и копи- ровать их в буфер обмена

Пояснения к контекстному меню для редактирования

П р и м е ч а н и е. Для копирования, вставки и вырезания значений также допускается применять стандартные сочетания клавиш. Соответственно: Ctrl + Ins (Ctrl + C), Shift + Ins (Ctrl + V) и Shift + Del (Ctrl + X).

Значения в таблицах редактора выделяются с помощью клавиш управления курсором и нажатой клавишей Shift или с помощью мыши. При выделении мышью и одновременно нажатой клавишей Shift с выделенными ячейками автоматически производятся математические операции (см. 1.3.3).

В левом нижнем углу окна расположен список «*Pacxod*» (см. рис. 1.15), который предназначен для выбора размерности вводимого расхода: м<sup>3</sup>/сут, м<sup>3</sup>/ч, м<sup>3</sup>/мин, м<sup>3</sup>/с, л/сут, л/ч, л/мин, л/с. При смене размерности введенные ранее расходы по всем опытным скважинам автоматически пересчитываются.

Внимание! Размерность постоянного и переменного расходов должна быть одинаковой.

Ниже приводится подробное описание, необходимое пользователю для заполнения информации в таблицах диалогового окна «*Pedakmop*...».

Таблица «Время». Таблица для ввода времени замеров понижения уровня и расхода (рис. 1.13, табл. 1.4) (для откачки с пе-

Опробование		Данные		Опции			]	
	Nº	Сутки	Час	Минута	Секунда		Добавить	
Время	1	6.944445E-04	1.666667E-02	1	60			
- 1	2	1.388889E-03	3.333334E-02	2	120		Вставить	
Понижение	3	2.083333E-03	0.05	3	180			
- I	4	2.777778E-03	6.666667E-02	4	240			
Расход	5	3.472222E-03	8.333334E-02	5	300		эдалить	
	6	6.94444E-03	0.1666667	10	600			
Расход оч	7	1.041667E-02	0.25	15	900		Встави	
December 1	8	1.388889E-02	0.3333333	20	1200		GNDG/KPI	
Расстояние	9	1.736111E-02	0.4166667	25	1500		Загрузи	
	10	2.083333E-02	0.5	30	1800		скважи	
Смещение	11	2.777778E-02	0.6666667	40	2400			
	12	3.472222E-02	0.8333334	50	3000			
Скважина	13	4.166667E-02	1	60	3600			
n	14	5.555556E-02	1.333333	80	4800		Загрузит	
время восстан.	15	6.944445E-02	1.666667	100	6000			
n	16	8.333334E-02	2	120	7200		Создат	
Босстановление	17	0.1041667	2.5	150	9000			
	18	0.125	3	180	10800		Сохрани	
Окончание	19	0.1458333	3.5	210	12600			
2	20	0.1666667	4	240	14400		OK OK	
замеры по скв.	21	0.1875	4.5	270	16200			
	22	0.2083333	5	300	18000		Отмен	
асход:	23	0.2291667	5.5	330	19800			

Рис. 1.13. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Время».
ременным расходом). Время вводится в одном из четырех столбцов в сутках, часах, минутах или секундах. В остальных столбцах пересчет времени происходит автоматически. Редактор сохраняет время каждого замера в размерности, которая соответствует столбцу ввода. Таблица при необходимости автоматически увеличивается до требуемого количества строк при вставке в нее данных из буфера обмена.

**Внимание!** Первое время замера должно быть больше нуля и находиться в первой строчке таблицы. Таблица заполняется без пропусков и время каждого следующего замера должно быть больше предыдущего.

Колонка «№»	Номер замера
Колонка «Сутки»	Ввод времени в сутках или в специальном формате
Колонка «Час»	Ввод времени в часах или в специальном формате
Колонка «Минута»	Ввод времени в минутах или в специальном формате
Колонка «Секунда»	Ввод времени в секундах
Кнопка «Добавить ряд»	Добавляет новое время замера в конец таблицы. До- бавляется замер для всех наблюдательных и опытных скважин
Кнопка «Вставить ряд»	Вставляет новое время замера на место курсора. До- бавляется замер для всех наблюдательных и опытных скважин. Все следующие за курсором данные сдвига- ются на одну строчку вниз
Кнопка «Удалить ряд»	Удаляет текущее время замера. Удаляется замер для всех наблюдательных и опытных скважин. Все данные сдвигаются на одну строчку вверх

Пояснения к таблице «Время»

Таблица 1.4

Пользователь может вводить время в колонках «Сутки», «Час» или «Минута» в одном из специальных форматов редактора: сутки/час[/минута[/секунда]], час/минута[/секунда] и минута/секунда. Значения в квадратных скобках не обязательны для ввода. Вместо знака слеш «/» допускается использование обратного слеша «\». Приведем примеры возможных вариантов ввода времени замера для трех колонок. Колонка «*Сутки*»: 1/2/40/30 – 1 сут 2 ч 40 мин и 30 с, 2/10/15 – 2 сут 10 ч и 15 мин, 5/6 – 5 сут и 6 ч. Колонка «*Час*»: 4/20/15 – 4 ч 20 мин и 15 с, 8/40 – 8 ч и 40 мин. Колонка «*Минута*»:

лонка «*минути»*.

6/45 – 6 мин и 45 с.

При таком вводе автоматический пересчет времени в оставших-ся колонках также осуществляется.

Несмотря на то что время замеров пользователь вводит в любой размерности, при переходе к построению графиков, обработке данных и получения фильтрационных параметров размерность времени – сутки.

Таблица «Понижение». Ввод данных понижения уровня по всем наблюдательным скважинам (рис. 1.14, табл. 1.5) для времени замеров из таблицы «Время». В таблице «Понижение» допускаются пропуски вводимых значений.

Опробование		Данные	Ľ		Опции		
	Время	1	1f	22g	15/1		Добавить ря
Время	1м	0	0.08	0	0		( <u> </u>
	2 м	0	0.19	0	0.02		Вставить ря
Понижение	3 м	0.02	0.27	0	0.05		
	4 м	0.03	0.34	0	0.08		
Расход	5м	0.05	0.39	0	0.12		9далить ря
	10 м	0.13	0.56	0	0.24		
Pacxog dų	15 м	0.2	0.67	0.01	0.32		Вставить
	20 м	0.26	0.74	0.02	0.39		скважину
Расстояние	25 м	0.31	0.8	0.03	0.44		Загрузить
	30 м	0.35	0.85	0.04	0.49		скважину
Смещение	40 м	0.42	0.93	0.07	0.56		
	50 м	0.47	0.99	0.1	0.62		
Скважина	60 м	0.52	1.04	0.13	0.67		
L	80 м	0.59	1.12	0.17	0.74		Загрузить.
Время восстан.	100 м	0.65	1.18	0.22	0.8		
-	2 ч	0.7	1.23	0.25	0.85		Создать
Восстановление	2.5 ч	0.76	1.29	0.3	0.91		
	3 ч	0.81	1.35	0.34	0.96		Сохранить
Окончание	3.5 ч	0.85	1.39	0.38	1.01		
	4 ч	0.88	1.43	0.41	1.04		OK
Замеры по скв.	4.5 ч	1.28	1.67	0.54	1.13		<u></u>
	5ч	1.39	1.77	0.64	1.21		Отмена
Расход:	55 ч	1 47	1.85	0.7	1.28	-	

Рис. 1.14. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Понижение».

Колонка «Время»	Время замера из таблицы «Время». После значения указана размерность введенного замера: д – сутки, ч – часы, м – минуты, с – секунды
Колонка с именем наблюдательной скважины	Ввод данных понижения уровня. Количество колонок равно количеству заданных наблюдательных скважин
Кнопка «Вставить ряд»	Сдвигает значения понижений на одну строчку вниз (от места курсора) только для выбранной наблюдательной скважины. Количество замеров при этом не меняется
Кнопка «Удалить ряд»	Удаляет текущий замер и сдвигает значения пониже- ний на одну строчку вверх (от места курсора) только для выбранной наблюдательной скважины. Количество заме- ров при этом не меняется

Пояснения к таблице «Понижение»

Таблица «*Pacxod*». Ввод постоянного расхода по всем опытным скважинам (рис. 1.15, табл. 1.6). При асинхронном начале работы опытных скважин здесь также необходимо указать время

🕯 Редактор для ввод	а данных опы	тно-фильтр	рационного	опробования [sample2.eat]	_ 🗆 ×
Опробование	Y	Даннь	ie	Опции	]
	Скважина	Pacxon	Старт, сул	Понижение м	Добавить ряд
Время	1c	100	01001,031	110100000000000000000000000000000000000	
Понижение	2c	700			Вставить ряд
Расход					Удалить ряд
Pacxog dQ					Вставить
Расстояние					Загрузить
Смещение					скважину
Скважина					
Время восстан.					Загрузить
Восстановление					Создать
Окончание					Сохранить
Замеры по скв.					ОК
Baamaa					Отмена
м^3/сут					Справка

Рис. 1.15. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Расход».

начала работы каждой скважины относительно начала опытного опробования. Таблица используется при откачке с постоянным расходом. Размерность вводимого расхода выбирается в списке «*Pacxod*».

**Внимание!** Таблица «*Pacxod*» также используется при обработке откачки с постоянным понижением уровня в опытной скважине.

Таблица 1.6

Колонка « <i>Скважина</i> »	Имена заданных опытных скважин
Колонка « <i>Pacxod</i> »	Постоянный расход опытной скважины. Размерность для ввода расхода выбирается пользователем. При смене размерности введенный расход автоматически пересчитывается Нажатие левой кнопки мыши и клавиши Ctrl (рис. 1.40, <i>a</i> ) или Shift (рис. 1.40, <i>б</i> ) при вводе значения – вызов контекстного меню с пересчетом расхода
Колонка «Старт»	Вводится время начала работы каждой скважины в сутках. Время отсчитывается от начала опробования. Используется при групповой откачке с асинхронным началом работы опыт- ных скважин. При отсутствии данных предполагается «0», т.е. начало работы опытной скважины совпадает с началом опыт- ного опробования Нажатие левой кнопки мыши и клавиши Ctrl (рис. 1.11, <i>a</i> ) или Shift (рис. 1.11, <i>б</i> ) при вводе значения – вызов контекст- ного меню для пересчета времени
Колонка «Понижение»	Постоянное понижение в опытной скважине. Используется при обработке откачки с постоянным понижением уровня

Пояснения к таблице «Pacxod»

**Таблица** «*Расход* dQ». Ввод переменного расхода по всем опытным скважинам (рис. 1.16, табл. 1.7). Время замеров берется из таблицы «*Время*». Таблица используется при откачке с переменным расходом. Размерность вводимого расхода выбирается в списке «*Расход*». В таблице допускаются пропуски значений.

Таблица 1.7

Колонка «Время» Время замера из таблицы «Время». После значения указана размерность ввода замера: д – сутки, ч – часы, м – минуты, с – секунды. Для обработки замеры пересчитываются в сутки

Пояснения к таблице «Pacxod dQ»

Опробование		Данные		Опции	<u>]</u>
	Время	1вп	Звп	<b>•</b>	Добавить
Время	.67 д	1302.12	1765.2		
- 11	.707 д	1302.12	1765.2		Вставить
Понижение	.7882 д	1328.88	1809.36		
	.958 д	1330.44	1962.84		<b>I</b>
Расход	1.125 д	1342.8	1845.9		9далить
	1.292 д	1351.08	1841.28		
Pacxog dQ	1.458 д	1348.44	1856.4		Встави
- 1	1.542 д	1349.28	1876.98		скважи
Расстояние	1.708 д	1382.7	1867.5		Загризи
	1.958 д	1388.36	1839.48		скважи
Смещение	2.125 д	1384.02	1801.56		I — —
	2.375 д	1403.94	1783.84		
Скважина	2.583 д	1382.1	1791.03		
Время восстан.	2.833 д	1440	1888.84		Загрузит
	3.083 д	1440	1791.24		
<u> </u>	3.292 д	1440	1791.24		Создат
Восстановление	3.583 д	1440	1446.9		
	3.917 д	1440	1446.9		Сохрани
Окончание	4.25 д	1440	1446.9		· ·
- 1	4.583 д	1440	1446.9		OK
Замеры по скв.	4.92 д	1440	1446.9		L
	5.25 д	1440	1446.9		Отмен
Расход:	5.583 д	1440	1446.9		

Рис. 1.16. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Расход dQ».

Таблица 1.7 (продолжение)

Колонка с именем опытной скважины	Ввод данных расхода. Количество колонок равно ко- личеству заданных опытных скважин. Размерность вво- димого расхода выбирается в списке « <i>Pacxod</i> ». Подроб- нее о пересчете размерности см. в описание колонки « <i>Pacxod</i> » в табл. 1.6
Кнопка «Вставить ряд»	Сдвигает значения расхода на одну строчку вниз (от места курсора) только для выбранной опытной скважины. Количество замеров при этом не меняется
Кнопка «Удалить ряд»	Удаляет текущий замер и сдвигает значения расхода на одну строчку вверх (от места курсора) только для выбранной опытной скважины. Количество замеров при этом не меняется

Таблица «Расстояние». Ввод горизонтального расстояния от каждой опытной скважины до каждой наблюдательной скважины (рис. 1.17, табл. 1.8). При обработке одиночной откачки или экспресс-опробования в качестве расстояния укажите радиус опытной скважины. Все поля в таблице должны быть заполнены.

🛃 Редактор для ввод	а данных опы	тно-фильтра	ционного	опробования [sample2.eat]	_ 🗆 ×
Опробование		Данные		Опции	Ì
Время	Скважина 1	1c 15	2c 40		Добавить ряд
Понижение	1f 22g	30 50	15 100		Вставить ряд
Расход	15/1 S-2	70 100	30 50		Удалить ряд
Pacxog dQ					Вставить скважину
Расстояние					Загрузить скважини
Смещение					
Время восстан					Загрузить
Восстановление					Создать
Окончание					Сохранить
Замеры по скв.					ОК
Расход:					Отмена
м^3/сут 🔽					Справка

Рис. 1.17. Диалоговое окно «*Редактор…*»: вкладка «Данные», таблица «*Расстояние*».

#### Таблица 1.8

#### Пояснения к таблице «Расстояние»

Колонка « <i>Скважина</i> »	Имена заданных наблюдательных скважин
Колонка с именем опытной скважины	Ввод горизонтального расстояния от текущей опытной скважины до каждой наблюдательной сква- жины. Количество колонок равно количеству задан- ных опытных скважин

**Таблица** «Смещение». Ввод вертикального расстояния (рис. 1.18, табл. 1.9) между центрами фильтров каждой опытной скважины и каждой наблюдательной скважины (см. z на рис. 2.16 и на вспомогательной схеме рис. 1.18). Таблица используется для несовершенных по степени вскрытия скважин для схем линейного (разд. 2.3) и точечного источника (разд. 2.2). Если значения не заданы, то предполагается ноль: центры фильтров всех опытных и наблюдательных скважин находятся на одном уровне.



Рис. 1.18. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Смещение».

Таблица 1.9

#### Пояснения к таблице «Смещение»

Колонка «Скважина»	Имена заданных наблюдательных скважин
Колонка с именем опытной скважины	Ввод вертикального расстояния от центра фильтра те- кущей опытной скважины до центра фильтра каждой наблюдательной скважины (см. <i>z</i> на рис. 2.16 или на вспомогательном графике рис. 1.18). Количество колонок равно количеству заданных опытных скважин

Внимание! Для наблюдательных скважин, находящихся в разделяющем слабопроницаемом слое (см. 2.5.3) здесь указывается расстояние от центра фильтра этой наблюдательной скважины до кровли или подошвы основного водоносного пласта (см.  $z_p$  на рис. 2.25).

Внимание! Для опробований в трещиновато-пористой среде (см. 2.11.1) здесь указывается расстояние от центра блока до точки в блоке, где определяется понижение (см.  $z_p$  на рис. 2.41).

Таблица «Скважина». Ввод горизонтальных и вертикальных расстояний (рис. 1.19, табл. 1.10) до границ фильтрационного потока в плане и разрезе, длины фильтра скважин, радиуса скважин. Значения в таблице заполняются для всех имеющихся в проекте скважин: опытных и наблюдательных. Если значения не заданы, то принимается ноль, за исключением случаев, оговоренных в табл. 1.10 в комментариях к колонкам.

Редактор для ввод	а данных с	опытно-ф	ильтрацио	нного опр	обования	[point-	dq-2w.eat]	
Опробование	ĭ	ற	анные	Ľ		Опции		
Время	Скважина 1с	Граница	Верх/Низ	Граница 2	Фильтр	Радиус	Пласт	Добавить ряд
Понижение	2c							Вставить ряд
Расход	2n 3n							Удалить ряд
Расход dQ	4n 5n							Вставить скважину
Расстояние								Загрузить
Смещение								окражину
Скважина				 		-	- 1	Samueum
Время восстан.				f	<u> </u>	1.	-	Создать
Восстановление					L <sub>Tw</sub> lp	<u>8</u> _ <i>n</i>		Сохранить
Окончание				lw 🕅				
Замеры по скв.					^ 2		_	Отмена
Расход: м^3/сут								Справка

Рис. 1.19. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Скважина».

Таблица 1.10

Пояснения к таблице «Скважина»

Колонка «Скважина»	Имена заданных опытных и наблюдательных скважин
Колонка «Граница»	Горизонтальное расстояние от скважины до плановой границы. Используется для полуограниченных и ограниченных в плане расчетных схемах (см. рис. П2.2: $L_w$ – для опытной скважины, $L_p$ – для наблюдательной)
	Если значения не заданы, а выбрана схема пласта с грани- цей обеспеченного питания, то расчетные значения измене- ния уровня всегда будут нулевыми

Колонка	Вертикальное расстояние от центра фильтра скважины до кровли пласта. Используется для полуограниченных и ограниченных в разрезе расчетных схемах для несовершенных по степени вскрытия скважин (см. рис. 2.16: $L_{Tw}$ – для опытной скважины, $L_{Tp}$ – для наблюдательной)
<i>«Верх/низ»</i>	Для полуограниченного со стороны подошвы пласта здесь задается расстояние до подошвы пласта (см. рис. 2.14: $L_{Bw}$ – для опытной скважины, $L_{Bp}$ – для наблюдательной). Для опытной скважины до начального уровня грунтовых
	вод Если значения не заданы, то принимается величина, равная половине мощности пласта: скважина находится в центре водоносного пласта
Колонка «Граница 2»	Горизонтальное или вертикальное расстояние от скважи- ны до второй границы при сложных граничных условиях (угловые и U-образные пласты). В данной версии программы не используется Для пласта переменной мощности и наклонных пластов здесь для наблюдательных скважин задается расстояние до горизонтальной линии, на которой находится опытная сква- жина (см. $L'_p$ на рис. 2.40)
Колонка	Длина фильтра скважины. Используется для схем с несовершенной по степени вскрытия скважиной (см. рис. 2.16: $l_w$ – для опытной скважины, $l_p$ – для наблюдательной)
«Фильтр»	Если значения не заданы, то длина фильтра принимается равной мощности водоносного пласта или начальной обводненной мощности для безнапорного пласта: скважина совершенна по степени вскрытия
Колонка «Радиус»	Радиус опытной и наблюдательной скважины. Исполь- зуется в экспресс-опробованиях и в схемах, где учитывается емкость опытной скважины или пьезометра Если значение пропущено, то для экспресс-опробований радиус скважины берется из таблицы « <i>Расстояние»</i> (рис. 1.17), а для остальных схем в расчетах используется значение 0.1 м
Колонка	Вспомогательная колонка. Вводится любая текстовая ин-
«Пласт»	формация. В расчетах не участвует

Примечание. При перемещении по колонкам таблицы требуемые для ввода геометрические данные подсвечиваются красным цветом на вспомогательном графике (рис. 1.19).

**Таблица** «*Время восстан.*». Таблица для ввода времени замеров восстановления уровня. Внешний вид электронной таблицы аналогичен таблице «*Время*» (рис. 1.13), описание работы в ней см. выше в ее описании и в табл. 1.4.

**Внимание!** Начало отсчета времени восстановления – момент остановки откачки. Первое время замера должно быть больше нуля и находиться в первой строчке таблицы.

**Внимание!** В таблицах *«Время восстан.»* и *«Восстановление»* вводятся данные по экспресс-опробованиям (см. Приложение 5).

Таблица «Восстановление». Ввод данных восстановления уровня по всем наблюдательным скважинам для времени замеров из таблицы «Время восстан.». Внешний вид электронной таблицы аналогичен таблице «Понижение» (рис. 1.14). Описание работы в ней см. в табл. 1.5.

**Внимание!** Восстановление вводится от минимального значения: понижение на момент остановки откачки в наблюдательной скважине равно нулевому значению восстановления.

Таблица «Окончание». Ввод понижения уровня на момент остановки откачки / нагнетания для каждой наблюдательной скважины (рис. 1.20, табл. 1.11). Таблица используется при обработке данных восстановления уровня способом прямой линии (табл. 3.13), а также при обработке экспресс-опробований.

**Внимание!** Для экспресс-опробований здесь указывается начальный скачок уровня в скважине (см.  $s^0$  на рис. 3.2).

Таблица 1.11

Колонка « <i>Скважина</i> »	Имена заданных наблюдательных скважин
Колонка «Понижение»	Понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки / нагнетания
	Клавиша Ins – вставить данные из таблицы «Понижение» на послелний заланный момент времени

Пояснения к таблице «Окончание»

🛃 Редактор для ввод	а данных опытно-фильтрацие	онного опробования [sample3.eat]	_ 🗆 ×
Опробование	Данные	Опции	
Время Понижение Расход Расход dQ Расстояние	Скважина Понижение 1с 17.16 2n 7.30 3n 6.41 4n 3.45		Добавить ряд Вставить ряд Удалить ряд Вставить скважину Загрузить скважину
Скважина Скважина Время восстан. Восстановление Окончание Замеры по скв. Расход: м <sup>3</sup> /сут			Загрузить Создать Сохранить ОК Отмена Справка

Рис. 1.20. Диалоговое окно «Редактор»:	вкладка «Данные»,	, таблица «Окончание».
--	-------------------	------------------------

Опробование		Ĺ	lанные	Ľ		Опции		]
Время	Набл. скв	ажина: 1			<b>Τ</b> ο	нижение	•	Добавить
	Nº	Сутки	Час	Минута	Секунда	Понижение		
Понижение	21	0.1875	4.5	270	16200	1.28		Вставить р
	22	0.2083333	5	300	18000	1.39		I
Расход	23	0.2291667	5.5	330	19800	1.47		9далить р
	24	0.25	6	360	21600	1.52		· · · ·
Pacxog dQ	25	0.2916667	7	420	25200	1.61		Вставит
	26	0.3333333	8	480	28800	1.69		скважин
Расстояние	27	0.375	9	540	32400	1.74		
	28	0.4166667	10	600	36000	1.8		Загрузит
Смещение	29	0.4583333	11	660	39600	1.62		скважин
	30	.5	12	720	43200	1.58		
Скважина	31	0.5833334	14	840	50400	1.57		
	32	0.6666667	16	960	57600	1.58		2
Время восстан.	33	0.75	18	1080	64800	1.6		Загрузить
	34	0.8333334	20	1200	72000	1.62		
Восстановление	35	0.9166667	22	1320	79200	1.99		Создать
	36	1	24	1440	86400	2.06		C
Окончание	37	1.125	27	1620	97200	2.13		сохрани
	38	1.25	30	1800	108000	2.19		
Замеры по скв.	39	1.375	33	1980	118800	2.23		
	40	1.5	36	2160	129600	2.27		0
асход:	41	1.625	39	2340	140400	1.9		Отмена
<u>^</u>	42	1.791667	43	2580	154800	1.77	<b>_</b>	

Рис. 1.21. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Данные», таблица «Замеры по скв.».

Таблица «Замеры по скв.». Ввод замеров понижения или восстановления уровня для отдельной скважины (рис. 1.21, табл. 1.12). Таблица может использоваться, если время замеров в скважине не совпадает с общим режимом замеров. Это вспомогательная таблица. Для внесения данных в общую таблицу следует нажать кнопку «Вставить скважину». Время вводится в одном из четырех столбцов в сутках, часах, минутах или секундах. Соответственно в остальных столбцах пересчет времени происходит автоматически. Редактор сохраняет время каждого замера в размерности, которая соответствует столбцу ввода.

Таблица 1.12

Список «Набл. скважина»	Список заданных наблюдательных скважин
Список «Понижение / восстановление»	Определяет понижение или восстановление уров- ня заносится в таблицу
Колонка «№»	Номер замера
Колонка «Сутки»	Ввод времени в сутках или в специальном формате
Колонка «Час»	Ввод времени в часах или в специальном формате
Колонка «Минута»	Ввод времени в минутах или в специальном формате
Колонка «Секунда»	Ввод времени в секундах
Колонка «Понижение / восстановление»	Ввод понижения или восстановления уровня
Кнопка «Добавить ряд»	Добавляет новое время замера в конец таблицы. Добавляется замер для выбранной наблюдательной скважины
Кнопка «Вставить ряд»	Вставляет новое время замера на место курсора. Добавляется замер для выбранной наблюдательной скважины
Кнопка «Удалить ряд»	Удаляет текущее время замера. Удаляется замер для выбранной наблюдательной скважины
Кнопка «Вставить скважину»	Вставляет введенные данные в общие для всех скважин таблицы с добавлением или с заменой ин- формации
Кнопка «Загрузить скважину»	Загружает для редактирования данные по скважи- не, выбранной в списке «Набл. скважина» из общей таблицы

#### Пояснения к таблице «Замеры по скв.»

## 1.3.3. Вспомогательные действия для ввода данных: вкладка «Опции»

В данной вкладке расположены вспомогательные опции для редактирования и загрузки данных (рис. 1.22, табл. 1.13). Кроме этого, здесь определяется количество отражений при использовании принципа суперпозиции для ограниченных пластов.

🚽 Редактор для ввода данных опытно-фильтрационного опробования [sample2.eat]	_ 🗆 ×
Опробование Данные Опции	Ì
Выбор действия для выделенных ячеек	Добавить ряд
Копировать выделенные ячейки (ВЯ)	
О Добавить значение к выделенным ячейкам (ВЯ + 3)	Вставить ряд
О Умножить значение на выделенные ячейки (ВЯ * 3)	
О Поделить выделенные ячейки на значение (ВЯ / 3)	эдалить ряд
О Вычесть выделенные ячейки из значения (3 · ВЯ)	Вставить
О Поделить значение на выделенные ячейки (З / ВЯ)	скважину
0 Значение (3)	Загрузить скважину
Загрузка файла в формате dat	
Первая строка - заголовок колонки	Загрузить
Глобальная загрузка (переписывается время, понижение/восстановление)	Создать
<ul> <li>Загрузить колонку номер:</li> </ul>	Сохранить
Размерность для времени: Сутки	Отмена
20 Количество отражений (для ограниченных пластов)	Справка

Рис. 1.22. Диалоговое окно «Редактор...»: вкладка «Опции».

Таблица 1.13

Рамка «Выбор действия для выделенных ячеек»	Выбор математической операции с вы- деленными в таблице ячейками. Операции проходят при выделении ячеек мышью с нажатой клавишей Shift. Действует для ячеек, в которых находятся значения
Переключатель «Копирование выделенных ячеек»	Первое значение в выделенных ячейках копируется во все выделенные ячейки
Переключатель «Добавить значение к выделенным ячейкам»	К значениям в выделенных ячейках до- бавляется число в поле «Значение»

#### Пояснения к вкладке «Опции»

Переключатель «Умножить значение на выделенные ячейки»	Значения в выделенных ячейках умно- жаются на число в поле «Значение»
Переключатель «Поделить выделенные ячейки на значение»	Значения в выделенных ячейках делятся на число в поле «Значение»
Переключатель «Вычесть выделенные ячейки из значения»	Значения в выделенных ячейках вычи- таются из числа в поле «Значение»
Переключатель «Поделить значение на выделенные ячейки»	Делится число в поле «Значение» на значения в выделенных ячейках
Поле «Значение»	Число, с которым проводится математи- ческая операция
Рамка «Загрузка файла в формате dat»	Выбор действия при нажатии кнопки «Загрузить»: загрузить данные изменения уровня из файла в формате DAT
Флажок «Первая строка – заголовок колонки»	Отмеченная галочкой опция указывает на то, что в загружаемом файле в первой строке записаны имена наблюдательных скважин. При глобальной загрузке они учитываются, а при загрузке определенной колонки из файла пропускаются
Переключатель «Глобальная загрузка»	Используется для загрузки файла, где первая колонка – время замеров, а после- дующие колонки понижения (или восста- новления – зависит от открытой таблицы во вкладке «Данные») в наблюдательных скважинах. При загрузке имеющиеся в редакторе данные замещаются
Переключатель «Загрузить колонку»	Загружает одну колонку из файла (ука- зать номер колонки) в колонку текущей таблицы редактора (колонка, на которой стоит курсор)
Список «Размерность для времени»	При глобальной загрузке выбрать раз- мерность времени (первая колонка в загру- жаемом файле)
Поле «Количество отражений»	Количество отражений, которые учиты- ваются при определении параметров огра- ниченных (в плане или в разрезе) пластов с помощью решений, использующих прин- цип суперпозиции (см. Приложение 2, рис. П2.4, П2.6). Для длительных откачек может потребоваться увеличение данного числа

### 1.4. Выбор расчетной схемы: диалоговое окно «Выбор расчетной схемы»

Выбор расчетной схемы во многом определяет достоверность определяемых фильтрационных параметров. Ошибочная схематизация гидрогеологических условий может привести к серьезным погрешностям в интерпретации данных опытного опробования. От расчетной схемы также зависят набор графиков, предоставляемых программным комплексом, для построения индикаторных кривых, доступность тех или иных способов обработки и определяемые по ним параметры.

Диалоговое окно «Выбор расчетной схемы» (рис. 1.23) позволяет подобрать наиболее приемлемую гидрогеологическую расчетную схему, задать в случае необходимости и возможности границу фильтрационного потока в плане или разрезе и тип граничного условия.



Рис. 1.23. Диалоговое окно «Выбор расчетной схемы».

Окно вызывается из главного меню программы «Выбор > Схема» или из окна редактора (кнопка «Схема» на рис. 1.10) и состоит из двух вкладок: «Схема» и «Информация».

**Внимание!** При загрузке диалогового окна из окна редактора выбранная схема может быть сохранена во входном файле проекта, а при загрузке из главного меню – схема используется только для текущей обработки. Последнее необходимо для сравнения результатов количественной интерпретации индикаторных кривых по разным расчетным схемам.

Вкладка «*Схема*» предназначена для выбора расчетной схемы и граничных условий (рис. 1.23).

В табл. 1.14. перечислены все доступные схемы и граничные условия, заложенные в программный комплекс ANSDIMAT. Напротив названия схемы в списке «*Схема*» в скобках указаны разделы с их описанием и перечислением базовых уравнений фильтрации, на основе которых пользователь может определять искомые свойства водоносных пластов.

Таблица 1.14

Пояснения к диалоговому окну	«Выбор	расчетной	схемы»
------------------------------	--------	-----------	--------

Список	Выбор доступных расчетных схем:
«Схема»	«Схема Тейса» (разд. 2.1);
	«Точечный источник: напорный пласт» (разд. 2.2);
	«Линейный источник: напорный пласт» (разд. 2.3);
	«Безнапорный пласт» (разд. 2.4);
	«Пласт с перетеканием: постоянный напор в смежном пласте»
	(См. 2.3.1), $\mu$ Плост с перетекзицем: переменний напор в смежном плосте»
	(mr. 2.5.2).
	(CM. 2.3.2);
	«пласт с перетеканием: учет емкости разд. слоя» (см. 2.5.5);
	«Пласт с перетеканием: линейный источник» (см. 2.5.4);
	«Двухслойный пласт» (разд. 2.6);
	«Слоистые системы: решения Хантуша» (разд. 2.7);
	«Слоистые системы: решения Менча» (разд. 2.7);
	«Планово-неоднородный пласт» (разд. 2.8);
	«Откачка около реки» (разд. 2.9);
	«Наклонный пласт» (разд. 2.10);
	«Трещиновато-пористая среда» (разд. 2.11);
	«Откачка с постоянным понижением» (разд. 3.1);
	«Экспресс-опробование» (разд. 3.2)

Список «Граничное условие»	Выбор доступных типов граничных условий: «І род», «І род», «І-І род», «ІІ-ІІ род» или «І-ІІ род». Пример: «І род» – полуограниченный пласт с границей обеспеченного питания; «ІІ-ІІ род» – пласт-полоса с двумя параллельными непроницае- мыми границами Список доступен только для первых пяти схем
Список «Ограни- чение»	Положение границ фильтрационного потока: в плане или разрезе (для полуограниченных и ограниченных водоносных пластов): «Слева / Справа» – граница потока в плане, «Кров- ля / Подошва» – граница потока в разрезе. При выборе хотя бы одной границы I рода следует, что граница может быть только плановой Список доступен только для точечного и линейного источников
Кнопка «<» Кнопка «>»	Смена рисунка (при наличии более одного рисунка). В верхнем правом углу окна указывается номер рисунка и их ко- личество для выбранной схемы. В случае, если рисунок выхо- дит за границы окна, кликните на него мышкой

Во вкладке «*Схема*» отображаются рисунки, иллюстрирующие возможные варианты проведения полевого эксперимента в рамках выбранной схемы.

Внимание! Рисунки в окне (рис. 1.23) носят информативный характер и показывают возможности схемы, а не ее выбор.

Вкладка «Информация» отображает краткую текстовую информацию о выбранной схеме, о заложенных в нее решениях и об определяемых параметрах. Для полной информации нажмите кнопку «Справка».

## 1.5. Выбор условий проведения опробования: диалоговое окно «Условия проведения опробования»

Окно используется для выбора технических условий проведения опробования и выбора периода опробования для обработки. Программа запоминает настройки в данном окне и отражает их при последующей загрузке проекта для обработки.

Окно (рис. 1.24, табл. 1.15) открывается через главное меню «Выбор > Опробование».

Условия проведения о	пробования	×	
Опытная скважина		(	
С Одна 🔍 Г	руппа		
Расход	Задержка —	Отмена	
Постоянный	🖲 Нет	Справка	
Переменный	О Да		
Обработать			
Откачка / нагнетание			
О Восстановление (s - от начала откачки)			
О Восстановление (s - от начала восстановления)			
О Восстановление как откачка/нагнетание			
О Откачка / нагнетание и восстановление			

Рис. 1.24. Диалоговое окно «Условия проведения опробования».

Таблица 1.15

Рамка «Опытная скважина»	Определение количества опытных скважин	
Переключатель «Одна»	Обработка опробования с одной опытной сква- жиной	
Переключатель «Группа»	Обработка групповой откачки: в опробовании участвуют больше одной опытной скважины	
Рамка «Расход»	Определение постоянства расхода	
Переключатель «Постоянный»	Расход не меняется в процессе опробования или его изменением можно пренебречь	
Переключатель «Переменный»	Расход меняется в процессе опробования. В дальнейшем потребуется разбить расход на ступе- ни (см. 1.6.4.1)	
Рамка «Задержка»	Используется при асинхронном начале работы опытных скважин и только для групповой откачки с постоянным расходом	
Рамка «Обработать»	Выбор периода опробования для обработки	
Переключатель «Откачка / нагнетание»	Для обработки используются данные периода откачки (или нагнетания жидкости)	
Переключатель «Восстановление (s – от начала откачки)»	Для обработки используются данные периода восстановления уровня, при этом изменение уровня отсчитывается от начала откачки (рис. 3.7, <i>a</i> )	

#### Пояснения к диалоговому окну «Условия проведения опробования»

Переключатель «Восстановление (s – от начала восстановления)»	Для обработки используются данные периода восстановления уровня, при этом изменение уровня отсчитывается от окончания откачки (рис. 3.7, б)
Переключатель «Восстановление как откачка / нагнетание»	Для обработки используются данные периода восстановления уровня, но обработка осуществляется способами, предназначенными для откачки. Влияние откачки здесь не учитывается. Изменение уровня отсчитывается от окончания откачки (рис. 3.7, $\delta$ )
Переключатель «Откачка / нагнетание и восстановление»	Для обработки используются замеры понижения и восстановления уровня. При выборе данной оп- ции предполагается обработка откачки с перемен- ным расходом, где для периода восстановления прини- мается нулевой расход опытной скважины (рис. 3.8) Эта опция используется также для обработки пе- риода восстановления после откачки с переменным расходом или после групповой откачки с постоян- ным расходом, но с асинхронным возмущением

П р и м е ч а н и е. При отсутствии тех или иных данных соответствующие им опции будут недоступны для выбора.

**Внимание!** При смене опций данного диалогового окна программа автоматически возвращает расчетную схему, выбранную в редакторе при подготовке проекта.

### 1.6. График индикаторных кривых

При открытии проекта для обработки (см. 1.1.3) появится графическое диалоговое окно «Основной график» (рис. 1.25) с графиком временного прослеживания изменения уровня по всем имеющимся в проекте наблюдательным скважинам. Кроме названия программы и ее версии в заголовке главного окна пропишется имя обрабатываемого проекта с маршрутом его расположения (например, [C:\ANSDIMAT\SAMPLE1\sample1.oat]).

Диалоговое окно «Основной график» является главным окном аналитического блока программного комплекса. При его закрытии закрывается загруженный проект. В окне могут отображаться графики, построенные в различных координатах по фактическим замерам изменения уровня или расхода.



Рис. 1.25. Графическое диалоговое окно «Основной график».

Окно предназначено для отображения индикаторных кривых и интерпретации опытно-фильтрационных опробований аналитическими и графоаналитическими способами. Ниже кратко перечислены основные действия, которые пользователь может выполнять в графическом окне.

1. Построение нового графика: меню «Выбор > График» или нажатие правой кнопки мыши на поле построения графика (см. 1.6.1.1).

2. Выбор отдельных наблюдательных скважин или замеров, участвующих в построении графиков: соответственно меню «Выбор > Скважина» и «Выбор > Время» (см. 1.6.1.2 и 1.6.1.3) или нажатие правой кнопки мыши в поле графика и переход к требуемой вкладке.

3. Обработка данных способом подбора параметров (решение прямой задачи): меню «*Обработка* > *Прямое решение*» или нажатие правой кнопки мыши в левом нижнем углу графического окна «*Основной график*» (см. 1.7.1.1).

4. Обработка данных графоаналитическим способом: меню «Обработка > Графоаналитический способ» (см. 1.7.2).

5. Изменение координатных осей: меню «Инструменты > Свойства осей» или двойное нажатие кнопки мыши на поле одной из координатных осей (см. 1.6.2.1).

6. Изменение вида индикаторных кривых: меню «Инструменты > Вид кривых» или двойное нажатие левой кнопки мыши на поле графика (см. 1.6.2.2).

7. Детальный просмотр фактических и расчетных данных: меню *«Инструменты > Значение»* (см. 1.6.5).

8. Размещение надписей на графике: меню «Инструменты > Текст» или «Инструменты > Название графика» (см. 1.6.2.3).

9. Создание окна с копией графика и размещением изображения в буфер обмена: меню «Инструменты > Копия и буфер обмена» (разд. 1.8).

С левой стороны главного окна программного комплекса расположена таблица с фактическими замерами (понижение, восстановление или расход), по которым построен активный график. При нажатии правой кнопки мыши в первой колонке поля таблицы (время замеров) вызывается информационное окно (рис. 1.11, a) с пересчетом выбранного временно́го замера в секунды, минуты, часы и сутки. А при нажатии на ячейку с величиной расхода (таблица расхода появляется при построении графика расхода) произойдет его пересчет в другие размерности (см. рис. 1.40, a).

Для обработки и просмотра опытных данных программа ANSDIMAT предоставляет пользователю широкий набор графиков. Их условно можно подразделить на три вида: стандартные (базовые) графики, графики по двум скважинам и нестандартные графики. Все графики, за исключением графиков по двум скважинам, строятся по любому имеющемуся количеству наблюдательных скважин. Графики площадного прослеживания (в реальных или приведенных координатах) – по выбранным временны́м замерам.

По опытным скважинам, при наличии соответствующей информации, программа предложит построить график изменения расхода во времени (см. 1.6.4).

*Стандартные графики* временного, комбинированного и площадного прослеживания даны для всех расчетных схем:

 полулогарифмический график временного прослеживания: *s* — lg*t*;

– полулогарифмический график комбинированного прослеживания:  $s - \lg t / r^2$ ;  полулогарифмический график площадного прослеживания: *s* — lg *r*;

 – билогарифмический график временного прослеживания: lg s — lg t;

— билогарифмический график комбинированного прослеживания:  $\lg s - \lg t / r^2$ ;

– график временного прослеживания:  $s - t^n$  (n – показатель степени).

При выборе схемы безнапорного неограниченного в плане водоносного пласта (см. 2.4.1) строятся также аналогичные графики в координатах приведенного понижения  $s^* = s(2m - s)$ , где m – начальная обводненная мощность безнапорного пласта (например, полулогарифмический график временного прослеживания s(2m - s)—lgt). Это позволяет использовать графоаналитические способы обработки данных изменения уровня в безнапорных пластах.

В ряде схем для обработки предлагается билогарифмический график площадного прослеживания  $\lg s - \lg r$ . При использовании нескольких опытных скважин (групповая откачка) графики площадного и комбинированного прослеживания недоступны. Взамен им, как правило, предлагаются нестандартные графики с приведенными координатами.

Графики изменения уровня по двум скважинам:

- график разности понижений:  $(s_1 - s_2)$ —lgt;

- график отношения понижений:  $(s_1 / s_2)$ —lg t.

Графики по двум скважинам предназначены для получения дополнительных способов определения фильтрационных параметров. Эти способы являются некоторым аналогом точечных способов с той разницей, что исследователь получает осредненные параметры по всему выбранному временному интервалу, а не по одному или двум замерам.

Для большинства расчетных схем на графике разности понижений появляется горизонтальный участок, по которому с помощью прямой линии определяется проводимость водоносного пласта (см. 4.1.2). Этот участок обычно соответствует стационарному или квазистационарному периоду, наступившему в двух наблюдательных скважинах. На графике отношения изменений уровня для ряда гидрогеологических схем расчетные изменения уровня на всем временном интервале опробования не зависят от проводимости пласта и расхода (см. 4.3.1). Подбор параметров в этом случае осуществляется только по пьезопроводности.

Данные изменения уровня в двух скважинах также необходимы для определения параметров по способу биссектрисы (см. 1.7.3).

Нестандартные графики строятся при обработке сложных опытно-фильтрационных опробований (влияние границ, переменный расход, групповая откачка, несовершенная скважина и т.д.), когда на стандартных графиках сложно (или невозможно) определить требуемые параметры. Преобразование соответствующих уравнений фильтрации позволяет построить графики изменений уровня в таких координатах, которые дают возможность использовать графоаналитические способы для нахождения параметров.

На рис. 1.26 показан пример графоаналитической обработки групповой откачки с переменным расходом на графике комбинированного прослеживания в координатах  $s/Q - \lg t'/r'^2$ , где по оси ординат откладывается отношение понижения уровня к расходу, а по оси абсцисс – логарифм отношения приведенного времени к квадрату приведенного расстояния. Для схемы точечного источника прямолинейный участок оп-

Для схемы точечного источника прямолинейный участок определяется на графике в координатах  $s - 1/\sqrt{t}$  (рис. 1.27), а, например, для определения параметров по данным о понижениях во всех наблюдательных скважинах способом эталонной кривой необходимо построить график в координатах  $lg(ds) - lgt/d^2$ , где d – расстояние от фильтра опытной скважины до фильтра наблюдательной скважины (см. рис. 2.5).

К нестандартным графикам можно отнести одномерный график s - well, который предлагается для построения, когда стандартный график площадного прослеживания теряет смысл. Например, изменение уровня зависит не только от расстояния до опытной скважины, но и до границы или в опробовании участвует несколько опытных скважин. График аналогичен графику площадного прослеживания  $s - \lg r$ , где по оси абсцисс откладываются не расстояния, а наблюдательные скважины через равные промежутки.



Рис. 1.26. Пример обработки групповой откачки с переменным расходом: определение фильтрационных параметров способом прямой линии на графике с приведенными координатами.

Во врезке – график временного прослеживания по обрабатываемым скважинам.



Рис. 1.27. Пример графика временного прослеживания для схемы точечного источника: определение параметров способом прямой линии.

# 1.6.1. Выбор графика, скважин и замеров: диалоговое окно *«Выбор графика»*

Диалоговое окно «Выбор графика» предлагает пользователю выбрать график, наблюдательные и опытные скважины, время (при построении графиков площадного прослеживания) для отображения индикаторных кривых и обработки данных опытно-фильтрационного опробования.

Окно вызывается через главное меню «Выбор > График», с помощью клавиши клавиатуры F3 или нажатием правой кнопки мыши на основном поле окна построения графика.

Диалоговое окно состоит из трех вкладок: «График», «Скважина» и «Время».

# 1.6.1.1. Выбор графика: вкладка «График»

Для каждой расчетной схемы и условий проведения опробования (постоянный или переменный расход, одиночная или групповая откачка, данные понижения или восстановления уровня представлены) программа предложит свой набор графиков (рис. 1.28). Доступные способы обработки, а иногда и определяемые параметры, в свою очередь, будут зависеть от выбранного графика.

Выбор графика 🔀	Выбор графика
График Скважина Время	График Скважина Время
s - lg(t)	s - lg(t) (s / Q) - lg(t)
s - lg(t / r * 2)	s - lg(t / r ^ 2) (s / Q) - lg(t' / r ^ 2)
s - lg(r)	s - lg(r) (s / Q) - lg(r)
lg(s) - lg(t / r * 2)	lg(s) - lg(t / r * 2) s - lg(t - t0)
lg(s) - lg(t)	lg(s) - lg(t)
lg(s) - lg(r)	lg(s) - lg(r)
(s1 / s2) - lg(t)	(s1 / s2) - lg(t)
(s1 - s2) - lg(t)	(s1 - s2) - lg(t)
s-t^n	s - t ^ n
Q - t	Q-t
ОК Отмена Применить Справка	ОК Отмена Применить Справка

Рис. 1.28. Примеры диалоговых окон «Выбор графика»: выбор графика для отображения и обработки ОФО.

Вкладка «График» состоит из кнопок переключения с названием графика. Для его построения нажмите требуемую кнопку и затем кнопку «*OK*». В графическом окне «*Основной график*» отобразятся индикаторные кривые в координатах выбранного графика.

При наличии одной наблюдательной скважины в проекте кнопки переключения для построения графиков по двум скважинам блокируются. Также блокируется кнопка построения графика расхода при отсутствии данных об изменении расхода.

### 1.6.1.2. Выбор скважин: вкладка «Скважина»

Вкладка «Скважина» диалогового окна «Выбор графика» (рис. 1.29, табл. 1.16) предназначена для выбора одной или нескольких наблюдательных скважин, по которым необходимо построить индикаторные кривые и обработать ОФО. По умолчанию графики строятся по всем наблюдательным скважинам, имеющимся в проекте. Опытные скважины выбираются только для построения графика Q-t и разбивки переменного расхода на ступени.

Окно с выходом на данную вкладку вызывается через главное меню «Выбор > Скважина» или с помощью клавиши клавиатуры F2.

Выбор графика				x
График	Скважин	a	Время	
Набл. скважины:	Расстояние, м	1:		
<b>☑</b> 1		1c	2c	
II ■ 11	1	15	40	
✓ 22g	1f	30	15	
I 10/1 III € 2	22g	50	100	
V 3.2	15/1	70	30	
	S-2	100	50	
Опытные скважины: ✓ 1с ✓ 2с				
OK 01	гмена П	оименить	Справка.	

Рис. 1.29. Диалоговое окно «Выбор графика»: выбор скважин.

Таблица 1.16

Пояснения к диалоговому окну «Выбор графика»: вкладка «Скважина»

Список «Набл. скважины»	Список всех имеющихся в проекте наблюдатель- ных скважин и их выбор
Список «Опытные скважины»	Список всех имеющихся в проекте опытных сква- жин и их выбор. Используется только для постро- ения графика $Q - t$ (рис. 1.37, 1.38)
Таблица «Расстояние»	Информационная таблица горизонтальных рас- стояний от каждой наблюдательной скважины до каждой опытной скважины

Выбрать все Снять выделение Инвертировать

Рис. 1.30. Контекстное меню для выбора скважин.

При нажатии правой кнопки мыши в одном из полей списка скважин появится контекстное меню для быстрого выбора скважин (рис. 1.30, табл. 1.17). При снятии выделения со всех скважин график будет построен по первой скважине в списке.

Таблица 1.17

Меню «Выбрать все»	Выбрать все скважины	
Меню «Снять выделение»	Снять выделение со всех скважин	
Меню «Инвертировать»	Выбрать невыделенные скважины и снять выделение с выделенных скважин	

Пояснение к контекстному меню для выбора скважин

# 1.6.1.3. Выбор временных замеров: вкладка «Время»

Вкладка «Время» диалогового окна «Выбор графика» позволяет выбрать временные замеры (рис. 1.31), по которым необходимо построить индикаторные кривые площадного прослеживания в реальных или приведенных координатах и обработать ОФО. Кроме этого, здесь выбираются некоторые дополнительные опции, связанные со временем (табл. 1.18).

Окно с выходом на данную вкладку вызывается через главное меню «Выбор > Время» или с помощью сочетания клавиш клавиатуры Ctrl + F2.



Рис. 1.31. Диалоговое окно «Выбор графика»: выбор временных замеров.

Таблица 1.18

Список «Время»	Сремя»         Список всех замеров и их выбор           Сременной         Список показывает время, когда меняется ступень расхода в какой-либо опытной скважине. Предназначе- но для обработки опробований способом прямой линии на графиках отношения изменения уровня к расходу (например, для групповой откачки с переменным расходом или с постоянным расходом, но с асинхрон- ным началом работы опытных скважин). В списке вы- бирается временной участок индикаторной кривой, по которому предполагается оценить параметры способом прямой линии	
Список «Временной шаг»		
Поле «Показатель степени»	Задание показателя степени для графика временного прослеживания в координатах $s - t^n$ . Задается величина обратная <i>n</i> (например: 2 – строится график понижения от корня времени $s - \sqrt{t}$ , 3 – от кубического корня $s - \sqrt{t}$ , 0.5 – от квадрата времени $s - t^2$ ). По умолчанию $n = 1$	
Список «Размерность»	Выбор размерности времени (сутки, час, минута, секунда). В таблицах программа отображает время в выбранной размерности. Время для построения графи- ков и расчета параметров остается в сутках	

#### Пояснения к диалоговому окну «Выбор графика»: вкладка «Время»

При нажатии правой кнопки мыши в списке замеров времени появится контекстное меню для выбора замеров. Меню аналогично рис. 1.30 с объяснением в табл. 1.17, где вместо скважин выбираются временные замеры. При снятии выделения со всех замеров график будет построен на последний момент времени в списке.

### 1.6.2. Вид графика

Перед загрузкой графика в окне «Основной график» (рис. 1.25) программа автоматически определяет минимальные и максимальные координаты осей. Эти значения являются значениями по умолчанию. В дальнейшем пользователь может изменить координатные оси по своему усмотрению (меню «Инструменты > Свойства осей»), а затем вернуться к первоначальным значениям.

Также пользователю предоставляется возможность изменять внешний вид самих индикаторных кривых (см. 1.6.2.2).

## 1.6.2.1. Координатные оси: диалоговое окно «Свойства координатных осей»

С помощью диалогового окна «Свойства координатных осей» пользователь может изменять масштаб активного графика, управлять форматом и шрифтом для подписи координатных осей. Здесь также доступны некоторые настройки внешнего вида графика.

Окно вызывается через главное меню «Инструменты > Свойства осей», с помощью клавиши клавиатуры F4 или двойным нажатием левой кнопки мыши на одно из полей координатных осей в окне построения графика.

Как альтернатива изменение значений координатных осей осуществляется с помощью клавиши ALT и движения мыши с нажатой левой клавишей по полю графика. При таком действии появляется рамка для увеличения выделенной области графика.

Окно содержит три вкладки: «Нижняя», «Левая» и «Опции». С правой стороны диалогового окна (рис. 1.32) расположены специальные кнопки, назначение которых описано в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Пояснение к кнопкам диалогового окна «Свойства координатных осей»

Кнопка «По умолчанию»	Устанавливает значения координатных осей по умолча- нию: для большинства графиков это минимальные и макси- мальные значения для отображенных индикаторных кривых с промежуточным интервалом 10. Кнопка применяется к оси, которая соответствует вкладке. Если выбрана вкладка «Опции», то кнопка применяется к обоим осям. Для графи- ков, у которых ось ординат строится не в логарифмическом масштабе, минимальное значение оси по умолчанию – 0 При нажатии данной кнопки график автоматически пере- страивается	
Кнопка «Авто-	Рассчитывает минимальное значение оси исходя из за-	
минимум»	данного максимального значения и интервала	
Кнопка «Авто-	Рассчитывает максимальное значение оси исходя из за-	
максимум»	данного минимального значения и интервала	
Кнопка «Авто-	Рассчитывает значение интервала на оси исходя из задан-	
интервал»	ного минимального и максимального значения	
Кнопка «Шрифт»	Устанавливает шрифт для подписи значений координат- ной оси. Выбранные характеристики шрифта автоматически вступают в действие, запоминаются и отображаются при последующей работе с программой	

Кнопки «Авто-», описанные в табл. 1.19, служат для быстрой и удобной настройки шкалы координатных осей. Они применяются, если значения координатных осей, установленные программой по умолчанию, не устраивают пользователя. Например, задав максимальное значение оси, интервал и их количество (см. соответствующие поля на рис. 1.32) можно автоматически рассчитать минимальное значение координатной оси. Все возможные взаиморасчеты на примере (*Минимум* = 0, *Максимум* = 2, *Интервал* = 0.5, *Количество* = 10) даны ниже в виде формул:

– при нажатии кнопки «*Автоминимум*» минимальное значение оси рассчитывается как

*Минимум* =  $Mаксимум - Интервал \times Количество = 2 - 0.5 \times 10 = -3$ ;

 при нажатии кнопки «Автомаксимум» максимальное значение оси рассчитывается как

*Максимум* = Mинимум + Интервал × Количество =  $0 + 0.5 \times 10 = 5$ ;

– при нажатии кнопки «Автоинтервал» промежуточный интервал рассчитывается как

Интервал = (Mаксимум - Mинимум)/ Количество = (2-0)/10 = 0.2.

То есть при незнании одной из величин пользователь автоматически ее рассчитывает. В этот расчет не входит автоматическое определение количества интервалов. В случае если заданное значение интервала не будет соответствовать количеству интервалов, то приоритет получит значение интервала: график будет построен от минимального значения с указанным интервалом.

войства коорди	инатных осей	x
Нижняя	Левая Опции	По умолчанию
Минимим	-3	Автоминимум
Максимум:	2	Автомаксимум
Интервал:	0.5	Автоинтервал
Количество интервалов: 10 🛨		Шрифт
Формат подписи оси		OK I
<ul> <li>Фиксированный</li> </ul>		Отмена
О Экспоненциальный		Применить
🔽 Показать линии сетки		Справка

Свойства координатных осей	×
Нижняя Левая Опции	По умолчанию
П Показать линии для О-осей	Автоминимум
Толщина: 2 🛨	Автомаксимум
Цвет:	Автоинтервал
Размер графика, см	Шрифт
Высота: 14 Ширина: 20	OK
	Отмена
🔽 Показать рамку	Применить
Цвет фона:	Справка

Рис. 1.32. Вкладки диалогового окна «Свойства координатных осей».

Вкладки «Нижняя», «Левая». Вкладки предназначены непосредственно для задания свойств оси абсцисс (вкладка «Нижняя») и оси ординат (вкладка «Левая»). Вкладки имеют одинаковые поля и опции (табл. 1.20).

Таблица 1.20

Поле «Минимум»	Минимальное значение координатной оси	
Поле «Максимум»	Максимальное значение координатной оси	
Поле «Интервал»	Величина промежуточного интервала значений на координатной оси	
Поле «Количество интервалов»	Количество промежуточных интервалов на коорди- натной оси (от 1 до 99): шаг делений координатной оси. По умолчанию – 10 Поле также предназначено для расчетов с помощью кнопок « <i>Авто-</i> » (табл. 1.19)	
Рамка «Формат подписи оси»		
Поле «Десятичные знаки»	Количество десятичных знаков для подписи значе- ний координатной оси	
Переключатель «Фиксированный»	Формат вывода значений координатной оси (при- мер: 0.45)	
Переключатель «Экспоненциальный»	Формат вывода значений координатной оси (при- мер: 4.50e-01)	
Флажок «Показать линии сетки»	Отображение линий сетки на графике	

Пояснения к диалоговому окну «Свойства координатных осей»:			
вкладки <i>«Нижняя», «Левая»</i>			

Вкладка «Опции». Вкладка предназначена для задания дополнительных настроек внешнего вида графика.

Таблица 1.21

вкладка «Опции»			
Флажок «Показать линии для 0-осей»	Отображение на графике линий для нулевых коор- динатных осей		
Поле «Толщина»	Толщина линий нулевых координатных осей		
Кнопка «Цвет»	Выбор цвета линий нулевых координатных осей		

Пояснения к диалоговому окну «Свойства координатных осей»: вкладка «Опции»

Таблица 1.21 (продолжение)

Рамка «Размер графика»	Задание размеров (высоты и ширины) графика в сантиметрах
Флажок «Показать рамку»	Отображение границ графика
Кнопка «Цвет фона»	Выбор цвета заднего фона графика. Для сохране- ния цвета используйте диалоговое окно « <i>Настройки</i> » (см. 1.6.6)

П р и м е ч а н и е. Опции применяются только для текущей работы в программе.

## 1.6.2.2. Индикаторные кривые: диалоговое окно «Вид индикаторных кривых»

Диалоговое окно «*Bud индикаторных кривых*» (рис. 1.33, *a*, табл. 1.22) предназначено для задания внешнего вида индикаторных кривых, построенных по фактическим замерам изменения уровня в наблюдательных скважинах или расхода в опытных скважинах. Кривые могут отображаться в виде точек (символов), линий (соединение соседних точек с фактическими замерами) и/или окружностей. Программа запоминает свойства каждой индикаторной кривой.

Окно вызывается через главное меню «Инструменты > Вид кривых», с помощью сочетания клавиш клавиатуры Shift + F4 или двойным нажатием левой кнопки мыши на основном поле окна построения графика.

Таблица 1.22

Список « <i>Скважины</i> »	Список наблюдательных скважин, выбранных ра- нее и отображенных на активном графике. При по- строении графика расхода в списке отображаются опытные скважины	
Флажок «Символ»	Используются символы для построения индика- торных кривых	
Флажок « <i>Линия</i> »	Используется линия для построения индикатор- ных кривых	
Флажок «Окружность»	<ul> <li>Используется окружность для построения инди торных кривых</li> </ul>	

Пояснение к диалоговому окну «Вид индикаторных кривых» и «Символ»

Таблица 1.22 (продолжение)

Рамка «Символ»	Вызов диалогового окна «Символ» (рис. 1.33, б) и выбор символа, задание его размера и цвета
Рамка «Линия»	Задание толщины линии и ее цвета
Рамка «Окружность»	Задание толщины линии окружности, радиуса окружности и ее цвета
Кнопка «М»	Запомнить свойства выделенной индикаторной кривой. При создании последующих проектов эти свойства будут задаваться по умолчанию
Список «Шрифт»	Список доступных на компьютере шрифтов
Таблица символов	Таблица символов для выбора



б	Символ										×
	Номер:	119				Шрифт:	Wingdin	gs 2			•
	9	10	0	0	0	€	4	6	6	0	-
	8	0	0		$\odot$	0	$\mathbb{D}$	C	¢	+	
	+	$\bigcirc$	$\bigcirc$	Θ	È	$\bigcirc$	$\bigcirc$	4	9	0	
	6	5	$\bigcirc$	X		•	•	•	lacksquare	0	
	0	0	0	$\odot$	۲	•	•				J
							Ĺ	OK		Отмена	

Рис. 1.33. Диалоговые окна «Вид индикаторных кривых» (а) и «Символ» (б).

При нажатии правой кнопки мыши в списке скважин диалогового окна «*Bud индикаторных кривых*» появится контекстное меню (см. рис. 1.30) для ускоренного выбора скважин. Изменение свойств можно делать как для отдельной скважины, так и для группы скважин, отмеченных галочкой.

В списке «Шрифт» диалогового окна «Символ» (рис. 1.33, б) отображаются шрифты, установленные на персональный компьютер. При переносе проекта на другой компьютер настройки вида индикаторных кривых могут сбиться, если пользователь использовал опцию «Символ» (табл. 1.22) и программа не обнаружит заданный ранее шрифт. В этом случае надо выбрать любой другой символ из имеющихся шрифтов.

# 1.6.2.3. Подпись графиков: диалоговое окно «Надпись»

Диалоговое окно «*Надпись*» (рис. 1.34, табл. 1.23) позволяет изменить заголовок графика и нанести дополнительные текстовые пояснения на график.

Окно вызывается через главное меню «Инструменты > Название графика» или двойным нажатием на кнопку мыши в поле заголовка графика или поле сделанной ранее надписи.

Размещение надписи в поле графика осуществляется через меню «Инструменты > Текст» или с помощью сочетания клавиш клавиатуры Ctrl + Т. При этом в центре графического экрана помещается поле с надписью «Текст». Текстовое поле можно легко передвинуть с помощью мыши в любую точку графического окна и ввести в него необходимую информацию (табл. 1.24).

Надпись		×		
Цвет фона:	Прозрачный	Выравнивание:		
	📃 🥅 Рамка	По центру 💌		
Нажмите Ctrl-Enter для перехода на новую строку:				
	s - Ig(t)	*		
•				
OK	Отмена Шрифт	. Справка		

Рис. 1.34. Диалоговое окно «Надпись».

На графике допускается размещать неограниченное количество таких полей. При каждом последующем вызове в текстовом поле будет отображен последний введенный текст. При построении нового графика текстовая информация стирается.

Таблица 1.23

Кнопка «Цвет фона»	Выбор цвета заднего фона надписи			
Флажок «Прозрачный»	Прозрачная надпись: задний фон отсутствует			
Флажок «Рамка»	Добавляет вокруг текста черную рамку			
Список «Выравнивание»	Выравнивание расположения надписи: влево, вправо, по центру			
Кнопка «Шрифт»	Устанавливает шрифт для заголовка графика или для подписи. Выбранные характеристики шрифта запоминаются и отображаются при последующей работе с программой			

Пояснение к диалоговому окну «Надпись»

Таблица 1.24

#### Пояснительная таблица к управлению текстовым полем

Двойное нажатие левой кнопки мыши в текстовом поле	Изменение или замена текста: вызов диа- логового окна « <i>Надпись</i> » (рис. 1.34)
Нажатие клавиши Shift и левой кнопки мыши в текстовом поле	Автоматический ввод в поле текста опре- деленных ранее фильтрационных параметров
Нажатие левой кнопки мыши в текстовом поле и перемещение мыши	Перемещение текстового поля внутри гра- фического окна
Нажатие правой кнопки мыши в текстовом поле	Удаление текстового поля с графика

### 1.6.3. Просмотровые графики

Для всех расчетных схем одновременно с окном «Основной график» пользователь может открывать любое количество дополнительных окон с базовыми индикаторными графиками  $(s-\lg t, s-\lg t/r^2, s-\lg r, \lg s-\lg t, \lg s-\lg t/r^2$  и  $s-t^n)$  или графиками напора  $(H-t, H-\lg t)$  и расхода  $(Q-t, Q-\lg t)$ . Графики в этих окнах являются просмотровыми и не дают возможности проводить обработку опробования.


Рис. 1.35. Примеры просмотровых графиков: билогарифмический график временного прослеживания понижения уровня и график изменения напора во времени.

Опции	x
График	Оси
Скважины 2n 3n 4n 5n	Замеры .25119 .31623 .39811 .50119 .63096 .79433 ✓ 1 1.25893 .1.5849 ✓
Отмена	Применить Справка

Опции	x
График	Оси
Нижняя ось	Левая ось
Минимум: -3.5	Минимум: 0
Максимум: 0.5	Максимум: 5
Десятичные знаки: 2 ÷ Линии сетки: 5 ÷	Десятичные знаки: 2 + Линии сетки: 5 +
По умолчанию	По умолчанию
ОК Отмена	Применить Справка

Рис. 1.36. Вкладки диалогового окна «Опции».

Окна вызываются через главное меню «*Bud* > *Bce графики*» для загрузки всех графиков или посредством выбора соответствующего графика в том же меню (рис. 1.5). При обработке групповой откачки графики площадного и комбинированного прослеживания становятся недоступны. Блокируются также графики напора, если нет информации о начальном напоре, и графики расхода, если нет данных о переменном во времени расходе.

По умолчанию на просмотровый график загружаются наблюдательные скважины, выбранные ранее для основного графика. Графики расхода строятся по опытным скважинам из списка «Опытные скважины» диалогового окна «Выбор графика» (см. рис. 1.29). На рис. 1.35 показаны примеры просмотровых графиков.

Для изменения координатных осей и добавления / исключения наблюдательных или опытных скважин требуется вызвать диалоговое окно «*Опции*» (рис. 1.36) двойным нажатием левой кнопки мыши на поле одного из просмотровых графиков.

Окно «Опции» состоит из двух вкладок: «График» и «Оси». Их описание приводится в табл. 1.25.

Таблица 1.25

Вкладка « <i>График</i> »	Выбор данных для построения индикаторных кривых			
Список «Скважины»	Выбор наблюдательных скважин для построения индикаторных кривых. Для графиков расхода здесь отображаются опытные скважины			
Список «Замеры»	Выбор временны́х замеров для построения графи- ка площадного прослеживания. Для остальных гра- фиков список недоступен			
Вкладка «Оси»	Задание параметров для координатных осей			
Поле «Минимум»	Минимальное значение координатной оси			
Поле «Максимум»	Максимальное значение координатной оси			
Поле «Десятичные знаки»	Количество десятичных знаков для значений ко- ординатной оси			
Поле «Линии сетки»	Количество делений координатной оси			
Кнопка «По умолчанию»	Устанавливает значения координатных осей по умолчанию: по минимальным и максимальным зна- чениям индикаторных кривых			

Пояснения к диалоговому окну «Опции»

## 1.6.4. График расхода

Доступ к графику изменения расхода во времени Q-t появляется при наличии данных о фактических замерах расхода в опытных скважинах, внесенных ранее в окно «*Pedakmop…*» (см. 1.3.2). Если в проекте количество опытных скважин больше одной (групповая откачка), то выбор опытных скважин для построения графика осуществляется через меню «*Bыбор* > *Скважина*» (см. 1.6.1.2). По умолчанию на график загружаются все опытные скважины. Графику расхода в таблице слева главного окна программы соответствуют фактические замеры расхода (рис. 1.37).

График изменения расхода во времени в первую очередь предназначен для разбивки расхода на ступени. Это является обязательным действием для перехода к обработке откачки с переменным расходом. В противном случае программа проводит обработку из условия постоянного расхода.

Разбивка расхода на ступени осуществляется через диалоговое окно «Ступени переменного расхода».

Пользователь также имеет возможность наложить график расхода на график понижения. Для этого в окне «Основной график» необходимо построить график временного прослеживания



Рис. 1.37. Пример графика изменения расхода во времени с разбивкой расхода на ступени.



Рис. 1.38. Пример совмещения графика расхода и графика понижения уровня. Точки, соединенные прямой линией, относятся к расходу.

понижения  $s - \lg t$  или приведенного понижения  $s^* - \lg t$  и выбрать меню «Инструменты > Наложить график расхода». На графике отобразятся фактические данные расхода (рис. 1.38) по опытным скважинам (меню «Выбор > Скважина») в таком масштабе, что максимальному расходу будут соответствовать две трети максимального значения оси ординат. Изменить внешний вид наложенного графика можно, предварительно построив график расхода Q - t в окне «Основной график» (см. 1.6.2.2). График расхода допускается совмещать только с графиком понижения уровня. Для восстановления уровня данная возможность отсутствует.

#### 1.6.4.1. Разбивка расхода на ступени: диалоговое окно «Ступени переменного расхода»

Окно предназначено для разбивки переменного во времени расхода на ступени (рис. 1.39, табл. 1.26). Расход каждой ступени предполагается постоянным в течение ее длительности.

Окно вызывается через меню «Инструменты > Ступени расхода» или нажатием правой кнопки мыши в нижнем левом уг-

Ст	упени пере	менного расход	a	X
ſ	Ступ	ени	Опции	Очистить
	Номер	Время, сут	Расход, м^3/сут	Arra
	1	0.15625	0	ABIO
	2	0.7916666	300	Courses
	3	2.125	500	сохранить
				Загрузить
				OK
				Отмена
	Опытная скв 1с	ажина: Число	ступеней: 3	Применить
L				Справка

Ступени переменного расхода	×
Ступени Опции	Очистить
Линия Толщина: 4	Авто
Цвет:	Сохранить
Перерисовка	Загрузить
0 Дельта для ступени, м^3/сут	ОК
	Отмена
1 Номер скважины для загрузки	Применить
	Справка

Рис. 1.39. Вкладки диалогового окна «Ступени переменного расхода».

лу поля построения графика *Q*—*t*. Выбор меню приводит к появлению в окне «*Основной график*» двух перекрещивающихся прямых линий (см. рис. 1.42).

Диалоговое окно состоит из двух вкладок: «Ступени» и «Опции». С правой стороны диалогового окна (рис. 1.39) расположены специальные кнопки, назначение которых описано в табл. 1.26.

Каждая ступень описывается номером, временем ее окончания и постоянным расходом. Ступени переменного расхода задаются тремя различными способами: 1) вручную – в таблице диалогового окна; 2) автоматически – нажатием кнопки «*Авто*» в диалоговом окне; 3) графически – с помощью двух перекрещи-

вающихся прямых линий, которые появляются при вызове диалогового окна. Данные автоматического и графического определения ступеней пользователь может корректировать вручную в таблице диалогового окна.

Описание окна и правила работы в нем даны в табл. 1.27

Таблица 1.26

Пояснения к кнопкам диалогового окна «Ступе	ни переменного расхода»
---	-------------------------

Кнопка	Обновляет график. Линии, показывающие ступени из-		
« <i>Очистить</i> »	менения расхода, удаляются с графика		
Кнопка « <i>Авто</i> »	Интеллектуальная система для автоматической разбив- ки расхода на ступени. Программа анализирует известные значения расхода опытной скважины и предлагает поль- зователю вариант разбивки (см. рис. 1.41). Для уменьше- ния количества ступеней увеличьте дельту (см. поле «Дельта для ступени»). Автоматическую разбивку можно корректировать вручную или графически		
Кнопка	Сохраняет введенные данные в формате программы		
«Сохранить»	ANSDIMAT. Создает или обновляет файл dqstep.at		
Кнопка «Загрузить»	Загрузка файла (dqstep.at) из другого проекта и замена данных о разбивке расхода на ступени для выбранной скважины Если в опциях (вкладка «Опции») задан номер скважи- ны больше, чем имеется в выбранном файле, будет выда- но предупреждение		
Кнопка	Отображает табличный результат разбивки расхода на		
«Применить»	графике в виде ступеней		

Таблица 1.27

#### Пояснения к диалоговому окну «Ступени переменного расхода»

Вкладка «Ступени»	Разбивка расхода на ступени
Колонка «Номер»	Номер ступени по порядку
Колонка <i>«Время»</i>	Время окончания действия ступени расхода (в сут). Для первой ступени оно должно быть больше нуля. По- следняя ступень должна быть больше или равна макси- мальному времени опробования. Время каждой после- дующей ступени должно быть больше предыдущей Нажатие левой кнопки мыши и клавиши Ctrl (рис. 1.11, <i>a</i> ) или Shift (рис. 1.11, <i>б</i> ) при вводе значения – вызов контекстного меню для пересчета времени

Колонка	a «Pacxod»	Значение постоянного расхода на время действия сту- пени (в м <sup>3</sup> /сут) При одновременном нажатии клавиши Ctrl и кнопки мыши появится информационное окно с пересчетом рас- хода для разных размерностей (см. рис. 1.40, <i>a</i> ) При одновременном нажатии клавиши Shift и кнопки мыши появится контекстное меню для пересчета расхода в метры кубические в сутки из кубических метров или литров в сутки, часы, минуты или секунды (рис. 1.40, <i>б</i> )		
Список скважин	«Опытная на»	Выбор опытной скважины для задания ступеней рас- хода. Дан список скважин, отображенных на графике расхода в окне «Основной график» (см. список «Опыт- ные скважины» на рис. 1.29)		
Поле «Число с	ступеней»	Количество ступеней расхода для выбранной скважины (не более 999)		
Вкладка	«Onųuu»	Опции отображения, разбивки и загрузки		
Рамка «л	Пиния»	Вид линии, которая отмечает ступени расхода на гра- фике: задание толщины линии и ее цвета		
Флажок «Перери	совка»	Включение / выключение обновления графика расхо- да при отображении новой разбивки (нажатие кнопки «Применить»)		
Поле «Д ступени	'ельта для »	Указывается разброс значений расхода, который укладывается в одну ступень при автоматической раз- бивке (см. кнопка « <i>Авто»</i> в табл. 1.26). По умолчанию дельта равна нулю, т.е. любое изменение фактического расхода опытной скважины рассматривается как отдель- ная ступень и будет учитываться в расчете изменения уровня		
Поле «Номер для загру	скважины узки»	При загрузке данных разбивки расхода на ступени (нажатие кнопки «Загрузить», см. табл. 1.26) из другого проекта (файл dqstep.at) необходимо указать порядковый номер скважины с данными для загрузки		
а	Q = 500 M ^ Q = 20.8333 Q = .347222 Q = 5.78703	<sup>5</sup> 3/сут б м^3/сут 33м^3/ч м^3/ч> м^3/сут 22м^3/мин м^3/мин> м^3/сут м^3/сут м^3/сут		

Q = 5.787037E-03 м ^ 3; Q = 500000 л / сут Q = 20833.33 л / ч Q = 347.2222 л / мин Q = 5.787037 л / с

м^3/ч -	>	м ^ З / сут
м≙з/мин⊸	>	м ^ З / сут
м^3/с -	>	м ^ З / сут
л/сут -	>	м ^ З / сут
л/ч -	>	м ^ З / сут
л/мин -	>	м ^ З / сут
л/с -	>	м ^ З / сут
	м ^ 3/ч м ^ 3/мин м ^ 3/с л/сут л/ч л/чн л/с	м^3/ч> м^3/мин> м^3/с> л/сут> л/ч> л/ч> л/с>

Рис. 1.40. Вспомогательные окна для просмотра (а) и пересчета расхода (б).

Далее кратко описана последовательность действий при различных способах разбивки переменного расхода на ступени. Независимо от способа предварительно требуется построить график Q-t и открыть диалоговое окно «Ступени переменного расхода».

Для ручного ввода ступеней расхода необходимо:

1) выбрать опытную скважину в списке «Опытная скважина»;

2) указать количество ступеней в поле «*Число ступеней*», на которое предполагается разбить переменный расход;

3) для каждой ступени в таблице ввести время ее окончания и расход;

4) при необходимости визуального просмотра введенных данных нажать кнопку «Применить»;

5) повторить пункты 1-4 для каждой опытной скважины;

6) нажать кнопку «*OK*» для сохранения результата разбивки и закрытия диалогового окна.

Для автоматического ввода ступеней расхода необходимо:

1) выбрать опытную скважину в списке «Опытная скважина»;

2) в поле «Дельта для ступени» вкладки «Опции» ввести чувствительность системы к созданию новой ступени (по умолчанию принимается «О» – каждый фактический замер расхода, который отличается от предыдущего, считается отдельной ступенью);

3) нажать кнопку «Авто»;

4) при необходимости визуального просмотра полученного результата нажать кнопку «Применить»;

5) повторить пункты 1-4 для каждой опытной скважины;

6) нажать кнопку «*OK*» для сохранения результата разбивки и закрытия диалогового окна.

Внимание! При автоматическом нахождении новой ступени расхода время ее окончания определяется как середина между двумя ближайшими фактическими замерами расхода. Время последней ступени равно длительности откачки. Само же значение расхода определяется как среднеарифметическое между всеми фактическими замерами, попадающими в определяемую ступень (рис. 1.41).



Рис. 1.41. Примеры автоматической разбивки расхода на ступени: дельта равна нулю (*a*) и больше нуля (*б*).

Для *графического ввода* (рис. 1.42) ступеней расхода необходимо:

1) выбрать скважину в списке «Опытная скважина»;

2) указать количество ступеней в поле «*Число ступеней*», на которое предполагается разбить переменный расход;

3) поставить курсор в первую строчку таблицы диалогового окна;

4) на графике Q - t переместить с помощью мыши или клавиш управления курсором (табл. 1.28) две перекрещивающиеся прямые линии в нужную точку графика;

5) нажать Enter или дважды нажать клавишу мыши для ввода нужной ступени;



Рис.1.42. Окно графического ввода разбивки расхода на ступени.

6) повторить пункты 4 и 5 для каждой ступени;

7) повторить пункты 1-6 для каждой опытной скважины;

8) нажать кнопку «*OK*» для сохранения результата разбивки и закрытия диалогового окна.

Графический ввод времени и расхода осуществляется в текущий ряд таблицы диалогового окна «*Ступени переменного расхода*» с автоматическим переходом к следующему ряду. Для ввода данных в нужный ряд таблицы необходимо предварительно поставить курсор на этот ряд.

В табл. 1.28 перечислены все возможные действия пользователя при графическом вводе данных.

Таблица 1.28

Клавиши Left, Right	Переход к ближайшему фактическому замеру		
Клавиши Up, Down	Переход к следующей опытной скважине (при наличии данных по нескольким опытным скважинам на графике)		
Клавиши Left, Right, Up, Down с нажатой клавишей Shift	Свободное перемещение по полю графика влево, вправо, вверх и вниз: не по данным фактических заме- ров		
Клавиша «1»	Уменьшение шага свободного перемещения в 2 раза		
Клавиша «2»	Увеличение шага свободного перемещения в 2 раза		
Клавиша «З»	Возврат к первоначальному шагу перемещения		
Нажатие кнопки мы- ши в поле графика	Переход к ближайшему фактическому замеру в текущей опытной скважине		
Клавиша Shift + на- жатие кнопки мыши	Свободное перемещение по полю графика: не по данным фактических замеров		
Клавиша Enter, двойное нажатие клавиши мыши	Ввод выбранного времени и расхода в таблицу диалогового окна «Ступени переменного расхода»		
Клавиши Ctrl + Enter	Ввод текущего фактического замера в таблицу диалогового окна «Ступени переменного расхода»		
Клавиша Esc	Выход из режима разбивки расхода на ступени и закрытие диалогового окна « <i>Ступени переменного расхода</i> ». В этом случае не сохраненные ранее данные теряются		

Пояснения к графическому вводу разбивки

П р и м е ч а н и е. При перемещении по полю графика в диалоговом окне «Значение» (рис. 1.42) отображаются координаты точки пересечения прямых линий (см. 1.6.5).

## 1.6.5. Режим просмотра данных

Данные изменения уровня в наблюдательных скважинах (или данные о расходе в опытной скважине при построении графика Q - t) отображаются в таблице в левой части основного окна программы, где первая колонка – время замера, а остальные колонки – данные по наблюдательным или опытным скважинам.

Детальный просмотр данных на графике осуществляется через меню «Инструменты > Значение» или с помощью сочетания клавиш клавиатуры Ctrl + F5. Выбор меню приводит к появлению в окне «Основной график» двух перекрещивающихся прямых линий (рис. 1.43, *a*, табл. 1.29) и информационного диалогового окна «Значение» (рис. 1.43, *б*, *в*). Точка пересечения этих линий показывает координаты замера в скважине. При перемещении линий на графике текущее значение подсвечивается в таблице, а в окне «Значение» отображаются как фактическое значение замера (например, время и понижение), так и координаты точки на графике (например, логарифм времени и логарифм понижения для графика  $\lg s - \lg t$ ).

В режиме просмотра пользователь может временно удалять замеры с индикаторной кривой графика. Удаленные замеры исключаются из решения обратной задачи и не участвуют в минимизации при обработке способом прямой линии. Это полезно при удалении некондиционных замеров или при обработке определенного участка индикаторной кривой.

**Внимание!** В данном режиме имеется возможность просматривать не только фактические замеры, но и расчетные значения изменения уровня. Используйте для этого при перемещении по графику клавишу Shift.

При просмотре расчетных значений точка пересечения прямых линий переместится в точку графика, которая отвечает расчетному изменению уровня в наблюдательной скважине. Это значение будет получено с учетом последнего определения каким-либо способом фильтрационных параметров, а также по выбранному ранее решателю (см. 1.7.1.1). Значение отобразиться в поле «*Y*-*ось*» окна «Значение» (рис. 1.43, *б*).



Рис. 1.43. Просмотр данных на графике (*a*), примеры диалоговых окон «*Значение*» при просмотре данных изменения уровня (*б*) и расхода (*в*).

Таблица 1.29

Пояснения к клавишам управления	при просмотре данных
---------------------------------	----------------------

Клавиши Left, Right	Переход к следующему фактическому замеру или для графиков площадного прослеживания к следующей скважине	
Клавиши Up, Down	Переход к следующей скважине или для гра- фиков площадного прослеживания к следующему замеру	
Клавиши Shift + Left, Переход к следующему расчетному заме Shift + Right		
Клавиша Del	Удалить текущий замер с графика	
Клавиша Ins	Вернуть удаленный ранее замер	
Клавиша «+»	Вернуть все удаленные ранее замеры по теку- щей скважине	
Клавиши Shift + Del	<ul> <li>Del Удалить ближайший замер с графика от то пересечения прямых линий в сторону больш времени</li> </ul>	
Клавиши Shift + Ins Вернуть ближайший удаленный ранее зая		
Клавиши Ctrl + End, Ctrl + Home	Удалить замеры с графика от точки пересече- ния прямых линий до конца (или начала) опытно- го опробования	
Клавиши Shift + End, Shift + Home	Вернуть удаленные ранее замеры от точки пе- ресечения прямых линий до конца (или начала) опытного опробования	
Нажатие кнопки мыши в поле графика	Переход к ближайшему фактическому замеру в текущей скважине	
Клавиша Shift + нажатие кнопки мыши в поле графика	Переход к ближайшему расчетному замеру п текущей скважине	
Нажатие кнопки мыши в поле таблицы	Автоматический переход к соответствующему значению на графике	
Выбор скважины в окне «Значение»	Переход к выбранной скважине на графике	
Нажатие правой кнопки мыши в поле «Время» окна «Значение»	Вызов информационного окна с пересчетом	
Нажатие правой кнопки мыши в поле таблицы в первой колонке	времени для разных размерностей (рис. 1.11, б)	

Таблица 1.29 (продолжение)

Нажатие правой кнопки мыши в поле « <i>Q</i> » окна « <i>Значение</i> » (см. рис. 1.42, 1.43, <i>в</i> )	Вызов информационного окна с пересчетом расхода для разных размерностей (рис. 1.40, <i>a</i> ) Поле появляется при просмотре данных расхода на графике <i>Q</i> — <i>t</i>
Клавиша Esc	Выход из режима просмотра значений. Закры- тие диалогового окна «Значение»

#### 1.6.6. Настройки

Диалоговое окно «*Настройки*» (рис. 1.44) предназначено для задания внешнего вида графиков и их компонентов. Эти настройки являются общими для всех проектов. Программа запоминает все изменения, сделанные в данном окне.

Окно вызывается через главное меню «Файл > Настройки» и состоит из нескольких вкладок, назначение которых описано в табл. 1.30.

Таблица 1.30

Вкладка «Эталонная кривая»	Настройка внешнего вида эталонных кривых (см. 1.7.2.3): цвет и толщина самой кривой и ее координатных осей
Вкладка «Прямая»	Настройка толщины и цвета прямых линий (см. 1.7.2.1): отдельно для способа прямой линии и поиска прямолинейного участка без определения параметров
Вкладка «Значение»	Настройка толщины и цвета пересечения при де- тальном просмотре данных на графике (см. 1.6.5)
Вкладка «Линии сетки»	Настройка толщины и цвета линий координатной сетки
Флажок «Ссылка на Ansdimat»	Включение / выключение информационной стро- ки в верхнем левом углу графика индикаторных кривых: «Обработано на программе ANSDIMAT – www.ansdimat.com». Опция вступает в действие пос- ле повторного открытия проекта
Кнопка «Цвет фона»	Замена цвета заднего фона основного графика

Пояснения к диалоговому окну «Настройки»

П р и м е ч а н и е. Изменение настроек автоматически отображается в графическом поле с левой стороны каждой вкладки.



Рис. 1.44. Вкладки диалогового окна «Настройки».

# 1.7. Обработка ОФО

Обработку опытно-фильтрационных опробований можно подразделить на три способа: 1) аналитический способ – решение прямой задачи фильтрации, 2) графоаналитические способы и 3) решение обратной задачи. Каждый способ имеет свои преимущества при интерпретации ОФО, свою чувствительность к подбираемым параметрам и техническим условиям проведения опробования.

## 1.7.1. Аналитический способ обработки: подбор параметров

Подбор параметров (см. 4.3.1) является основным способом определения фильтрационных свойств для большинства расчетных гидрогеологических схем. А для ряда «сложных» схем остается единственным, с помощью которого оцениваются свойства опробуемого водоносного пласта (рис. 1.45).

Способ подбора дает возможность быстро и наглядно оценивать влияние фильтрационных параметров на изменение уровня в любой точке пласта, а также сравнивать результаты, полученные по разным расчетным схемам.



Рис. 1.45. Пример подбора параметров на графике временного прослеживания. Точками показаны фактические данные, линией – расчетная кривая.

Кроме своей основной задачи – определение фильтрационных параметров – способ подбора может использоваться для прогноза изменения уровня во времени и пространстве, а также сравнения расчетных значений, полученных на основе различных решений. Последнее предоставляет пользователю применять программный комплекс для научно-исследовательской работы: анализ точности и чувствительности решений к техническим и геологическим условиям опытного опробования.

## 1.7.1.1. Задание параметров: диалоговое окно «Подбор параметров»

В диалоговом окне «Подбор параметров» (рис. 1.46) задаются предполагаемые параметры уравнения фильтрации для решения прямой задачи и последующего визуального сравнения фактической и расчетной кривых. Для каждой расчетной схемы предлагается соответствующий набор изменяемых параметров. Схемы, в которых заложена обработка по нескольким решениям, дополняются возможностью их выбора.

Окно вызывается через главное меню «Обработка > Прямое решение», с помощью клавиши клавиатуры F7 или нажатием правой кнопки мыши в нижнем левом углу поля построения графика и состоит из трех вкладок: «Параметры», «Вид» и «Опции». С правой стороны диалогового окна расположены специальные кнопки, назначение которых описано в табл. 1.31.

Подбор параметров		×
Параметры	рана Спции	Пересчет
200	Проводимость (пласт №1), м^2/сут	из UCODE
150	водоотдача (пласт №1), ~ Параметр перетекания (пласт №1), м	Сохранить
0.0001	Водоотдача (пласт №2), Параметр перетекания (пласт №2), м	Очистить
0.00002	Водоотдача разделяющего слоя,	OK
		Отмена
Решатель:	(	Применить
Понижение в разде	ляющем слое (напор в пласте №2 переменный)	Справка

Рис. 1.46. Пример диалогового окна «Подбор параметров»: вкладка «Параметры».

Таблица 1.31

Кнопка « <i>Пересчет</i> »	Вызов диалогового окна «Пересчет параметров» (см. 1.7.1.3): пересчет фильтрационных параметров, задание конфигурации пьезометра или наблюдательной скважины для некоторых решений Менча (см. гл. 2)
Кнопка «из UCODE»	Загрузить параметры из ранее решенной обратной задачи (см. 1.7.4.2). Данные хранятся только для одно- го проекта и для последней решенной задачи
Кнопка «Сохранить»	Сохранение фактических и/или расчетных данных в файл в текстовом (табличном) формате DAT
Кнопка «Очистить»	Обновляет график. Ранее построенные расчетные кривые удаляются

Пояснения к кнопкам диалогового окна «Подбор параметров»

Вкладка «Параметры» (рис. 1.46, табл. 1.32) предназначена для задания предполагаемых фильтрационных параметров и выбора решателя, с помощью которого предполагается построить расчетную кривую. Вкладка содержит поля для ввода параметров уравнения фильтрации. Количество полей и их назначение зависят от выбранной расчетной схемы и от решателя (см. Приложение 3).

Таблица 1.32

Текстовые поля	Поля для ввода предполагаемых фильтрационных пара- метров. Их назначение и количество зависят от выбранной схемы и решателя (Приложение 3)
Флажок «Изотропный пласт»	Выключенная опция позволяет учитывать анизотропию водоносного пласта (для схем с несовершенной по степени вскрытия скважиной в профильно-анизотропном пласте). При включенной опции ненужный для подбора параметр блокируется. Для ряда схем при переключении опции под- писи некоторых полей меняются
Флажок «Включить емкость пьезометра»	Позволяет учитывать емкость пьезометра и его конфи- гурацию при расчете понижений (для выбора конфигурации см. рис. 1.54). Используется для некоторых решений Менча (см. гл. 2)
Флажок « <i>Скин</i> »	Позволяет учитывать при подборе скин-эффект опыт- ной скважины или трещины. При выключенной опции не- нужные для подбора параметры блокируются

#### Пояснения к вкладке «Параметры» диалогового окна «Подбор параметров»

Список	Его содержание зависит от выбранной схемы, а иногда и от решателя (см. список « <i>Решатель»</i> ) Показывает, где необходимо рассчитать понижение. Для слоистых систем: в пласте или в слабопроницаемом слое (верхнем или нижнем). Для трещиновато-пористой среды: в трещине или блоке. Для наклонных пластов: выше опытной скважины или ниже
Список «Решатель»	Выбор функциональной зависимости, которую необхо- димо использовать при решении прямой или обратной за- дачи. Появляется для схем и условий, где предусмотрена обработка по нескольким решениям. Для ряда решений от этого выбора зависит формула для графоаналитических расчетов (например, для пласта-полосы при использовании суперпозиции или функции Грина формула для определения проводимости по способу горизонтальной прямой линии отличается) При смене решения список определяемых параметров может меняться

В зависимости от расчетной схемы и решателя во вкладке «Параметры» могут отображаться различные опции, необходимые для решения задачи подбора (рис. 1.47).

#### Последовательность действий при определении параметров способом подбора параметров:

1) выбрать график индикаторной кривой (меню «Выбор > График»);

**Внимание!** Способ подбора параметров не используется на графиках, которые построены в координатах от приведенных значений.

2) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

Внимание! При пропуске пункта 2 на графике будут отображаться данные для всех имеющихся наблюдательных скважин.

3) выбрать меню «Обработка > Прямое решение» для вызова диалогового окна «Подбор параметров»;

Тодбор параметров		x
Параметры	Вид Опции	1
		Пересчет
1	Каэффициент фильтрации трещиноватой системы, м/сут	
0.00001	Удельная водоотдача трещиноватой системы, 1/м	US OCODE
0.3	Коэффициент фильтрации блоковой системы, м/сут	Сохранить
0.00005	Удельная водоотдача блоковой системы, 1/м	
0.2	Размер блока, м	
0.1	Радиус обсадной трубы, м 🔽 Скин	
0.25	Каэффициент фильтрации скина, м/сут	ОК
0.1	Толщина скина, м	
0.5	Каэффициент фильтрации скина трещины, м/сут 🔽 Скин	Отмена
0.02	Толщина скина трещины, м Трещина 💌	Применить
Слоистые блоки (ре	шение Менча)	Справка

Параметры	Вид Ог	ции	
	, 		Пересчет
200	Проводимость пласта, м^2/суг		
0.002	Водоотдача пласта,		из осоре
100	Параметр перетекания из верхнего пласта, м		Сохранить
150	Параметр перетекания из нижнего пласта, м		
0.01	Водоотдача верхнего слабопроницаемого слоя,	-	Очистить
0.00001	Водоотдача нижнего слабопроницаемого слоя,	.	
0.1	Радиус обсадной трубы, м	🔽 Скин	OK
1	Коэффициент фильтрации скина, м/сут		
0.1	Толщина скина, м		Отмена
зшатель:	П	ласт 💌	Применить
рехслойные систе	, иы (два смежных пласта с постоянным уровнем)	<b></b>	Справка

Рис. 1.47. Примеры диалоговых окон «Подбор параметров» для опробования в трещиновато-пористой среде и в слоистой системе.

4) выбрать решение из списка «*Решатель*» диалогового окна (при его наличии);

5) ввести предполагаемые параметры в соответствующие поля диалогового окна;

6) нажать клавишу «*OK*» для отображения расчетной кривой на графике и выхода из диалогового окна.

При выборе графиков площадного прослеживания (например,  $s - \lg r$ ) подбор осуществляется на заданный момент времени. Для такого графика после пункта 2 необходимо дополнительно выбрать временные замеры (меню «Выбор > Время»).

В противном случае график будет отображать данные на последний момент времени.

Для одномерного графика *s*—*well* подбор аналогичен графикам площадного прослеживания с той разницей, что расчетные значения определяются точечно для отображенных на графике наблюдательных скважин и временны́х замеров.

Ряд решений (например, решения Хантуша для слоистых систем (см. разд. 2.7) или решение Кули-Кэйса для двухслойной системы (см. разд. 2.6)) реализован отдельно для малых и больших моментов времени. В этом случае программа: сама определяет временной диапазон действия решений на основе введенных параметров; берет нужную зависимость для каждого момента времени; временной участок, который выпадает из диапазона действия, обозначает на графике прямой пунктирной линией.

# 1.7.1.2. Настройка внешнего вида расчетных кривых

Вкладка «*Bud*» диалогового окна «*Подбор параметров*» (рис. 1.48, табл. 1.33) предназначена для изменения свойств внешнего вида расчетных кривых, а также для определения начала и окончания прорисовки каждой расчетной кривой. Изменения можно делать как для нескольких выбранных наблюдательных скважин (в списке отмечены галочкой), так и для отдельной скважины.

Подбор параметров			×
Подбор параметров Параметры Скважины ♥ 1 ♥ 22g ♥ 15/1 ♥ S-2	Вид Ограничение -3.158362 .3273589 По ум. Линия Толщина: 2 Цвет: Расстояние, м: 15 / 40	Опции Старт Финиш олчанию	Х Пересчет из UCODE Сохранить Очистить Очистить Очистить ОК Отмена Применить Справка

Рис. 1.48. Диалоговое окно «Подбор параметров»: вкладка «Вид».

Таблица 1.33

Пояснения к вкладке « <i>Ви</i> с	» диалогового о	кна «Подбор	параметров»
-----------------------------------	-----------------	-------------	-------------

Рамка «Скважины»	Список наблюдательных скважин, выбранных ранее (см. 1.6.1.2) и отображенных на активном графике. Расчет- ные кривые строятся для наблюдательных скважин, отме- ченных галочкой
Рамка « <i>Ограничение</i> »	Поля для ввода начальной и конечной точек на оси абс- цисс графика для прорисовки расчетной кривой
Кнопка «Старт»	Переход к графическому вводу начальной точки рас- четной кривой. По умолчанию соответствует минималь- ному значению оси абсцисс
Кнопка « <i>Финиш</i> »	Переход к графическому вводу конечной точки расчет- ной кривой. По умолчанию соответствует максимальному значению оси абсцисс
Кнопка «По умолчанию»	График расчетной кривой строится от минимального до максимального значения оси Х
Рамка «Линия»	Задание толщины линии расчетной кривой и ее цвета
Поле «Расстояние»	Информация о расстоянии от выделенной в списке на- блюдательной скважины до опытной скважины (при нали- чии нескольких опытных скважин расстояния указывают- ся через слеш «/»)

При нажатии правой кнопки мыши в списке скважин появится контекстное меню (см. рис. 1.30) для быстрого выбора скважин.

При переходе к графическому окну (нажатие кнопки «*Старт*» или «*Финиш*») на графике индикаторных кривых отобразится вертикальная линия (рис. 1.49), которая указывает на точку начала или окончания расчетной кривой.

Вертикальная линия перемещается клавишами клавиатуры Left, Right или нажатием на кнопку мыши в требуемой точке поля. При использовании клавиатуры шаг перемещения изменяется следующими клавишами:

«1» – уменьшение шага перемещения в 2 раза,

«2» – увеличение шага перемещения в 2 раза,

«3» – возврат к первоначальному шагу.

Для возврата к диалоговому окну «Подбор параметров» с сохранением выбора необходимо нажать клавишу Enter или дважды нажать клавишу мыши, без сохранения изменений – клавиша Esc.



Рис. 1.49. Определение точки начала или окончания расчетной кривой.

Вкладка «Опции» (рис. 1.50, табл. 1.34) предназначена для ввода дополнительных настроек прорисовки графиков, сохранения данных и изменения ряда численных характеристик при подборе параметров по решениям Менча (см. гл. 2), основанных на алгоритмах программ WTAQ2 и WTAQ3. Из этой вкладки пользователь может перейти в окно корректировки исходных данных (см. 1.7.1.4).

юдбор параметров			x
Параметры	Вид Точки Размер: 10 🚅	Спции Корректи-	
50 График 50 Файл	Цвет:	ровка данных тры (решения Менча)	Сохранить
<ul> <li>Линии С Точки</li> </ul>	0.000001	RERRH (1e-6) RERRNR (1e-9 1e-10)	Очистить
Сохранить	0.00000001	RERRSUM (1e-7 1e-8) ×MAX (1000 4000)	Отмена
<ul> <li>Фактические данные</li> <li>Расчетные данные</li> </ul>	4 По	NS (4 12) умолчанию	Применить
	P		Справка

Рис. 1.50. Диалоговое окно «Подбор параметров»: вкладка «Опции».

Таблица 1.34

	·
Пояснения к вкладке «Опции» диалогового окна «Подбор парамен	пров»

Рамка «Частота»	Задание частоты прорисовки графика (количество линий на длину графика) и частоты записи расчетных данных в файл при нажатии кнопки « <i>Coxpanumb</i> »
Рамка «Рисовать»	Опции отображения расчетных кривых
Переключатель «Линии»	В настоящей версии программы расчетная кривая отображается только в виде сплошной линии
Флажок «Перерисовка»	Включение / выключение обновления графика при по- строении расчетных кривых (действует при нажатии кно- пок « <i>OK</i> » или « <i>Применить</i> »). При включенной опции ра- нее построенные расчетные кривые стираются с графика
Рамка «Сохранить»	Выбор данных (фактических и/или расчетных) для последующего сохранения при нажатии кнопки «Сохранить» (см. разд. 1.8)
Рамка «Точки»	Определяет вид расчетных точек на графике <i>s</i> — <i>well</i> (см. 1.7.1.1): задание диаметра и цвета точки
Кнопка «Корректировка данных»	Вызов диалогового окна «Корректировка исходных данных» (см. 1.7.1.4) для быстрой замены параметров опытного опробования. Измененные данные использу- ются для текущей обработки и запоминаются только до следующей загрузки опробования. Для сохранения изменений используйте редактор (см. разд. 1.3)
Рамка «Численные параметры»	Параметры для решений Менча. Применяются при неустойчивости решений Менча (см. описание программ WTAQ2 и WTAQ3). Введенные значения ав- томатически сохраняются. Для возврата к первоначаль- ным значениям используйте кнопку «По умолчанию» Алгоритм программы WTAQ2 используется для решений, не учитывающих емкость опытной скважи- ны: (2.3.13) и (2.3.14), WTAQ3 – для решений, учиты- вающих емкость опытной скважины: (2.1.2), (2.1.3), (2.3.14), (2.3.15), (2.4.20) и (2.4.21)
Поле « <i>RERRH</i> »	Относительная ошибка для достижения сходимости решения при определении понижения в несовершенной скважине в напорном пласте (2.3.13). Рекомендуемое значение 10 <sup>-6</sup>
Поле « <i>RERRNR</i> »	Относительная ошибка для метода Ньютона– Рафсона. Используется для определения понижения в безнапорном пласте. Для алгоритма программы WTAQ2 рекомендуемое значение $10^{-10}$ , для WTAQ3 – от $10^{-9}$ до $10^{-10}$

Таблица 1.34 (продолжение)

Поле « <i>RERRSUM</i> »	Критерий сходимости решения. Используется для определения понижения в безнапорном пласте. Для алгоритма программы WTAQ2 рекомендуемое значение – $10^{-15}$ , для WTAQ3 – от $10^{-7}$ до $10^{-8}$
Поле «XMAX»	Максимальное количество итераций для достиже- ния сходимости решения. Используется для определе- ния понижения в безнапорном пласте. Для алгоритма программы WTAQ2 рекомендуемое значение – от 1000 до 4000, для WTAQ3 – 3000
Поле «NS»	Количество слагаемых (членов ряда), которое ис- пользуется в алгоритме Стехфеста для вычисления об- ратного преобразования Лапласа. Это должно быть четное число от 4 до 12. Рекомендуемое значение 8. Если результат численно нестабилен, то NS может быть уменьшено до 6 или даже до 4. Нестабильность обычно возникает при расчете понижения на неболь- ших расстояниях от опытной скважины относительно мощности водоносного пласта
Кнопка «По умолчанию»	Устанавливаются значения параметров из програм- мы WTAQ3, а при выборе решений Менча, которые не учитывают емкость опытной скважины – WTAQ2

## 1.7.1.3. Калькулятор для пересчета параметров: диалоговое окно «Пересчет параметров»

Диалоговое окно «Пересчет параметров» является небольшим калькулятором для пересчета фильтрационных параметров. Пользователь может оценить параметр перетекания, пьезопроводность, сопротивление русла реки и оценить коэффициент формы пьезометра. Последнее предназначено не только для расчета, но и для выбора конфигурации пьезометра, емкость которого учитывается в ряде решений. Пересчет каждого параметра происходит в соответствующей вкладке диалогового окна.

Во вкладке «Параметр перетекания» (рис. 1.51) рассчитывается параметр перетекания (B) по значению проводимости водоносного пласта (T), коэффициента фильтрации и мощности разделяющего слоя (k', m'), а также в зависимости от наличия одного или двух разделяющих слоев. Расчет происходит по формулам (П1.8) и (П1.9).

Пересчет параметров	x
Сопротивление русла реки	Козффициент формы
Параметр перетекания	Пьезопроводность
200         Проводимость водоносного пласта, м           0.01         Коз фянциент фильтрации разделяющи           10         Мощность разделяющего слоя, м           Второй разделяющий слой	^2/сут его слоя, м/сут Г Учитывать 2-й разделяющий слой
	Закрыть Справка

Рис. 1.51. Диалоговое окно для расчета параметра перетекания.

Во вкладке «Пьезопроводность» (рис. 1.52) определяется пьезопроводность (*a*) водоносного пласта по формуле  $a = T/S = k/S_s$ .

В данном окне также осуществляется автоматический взаимный перерасчет параметров (табл. 1.35): проводимости (T), коэффициента фильтрации (k), водоотдачи (S) и удельной водоотдачи ( $S_s$ ).

Таблица 1.35

Вводимое значение	Расчетное значение	Формула
Т	k	k = T / m
S	$S_s$	$S_s = S / m$
k	Т	T = km
S <sub>s</sub>	S	$S = S_s m$
111	Т	T = km
m	$S_s$	$S_s = S / m$
a	S	S = T / a
u	S <sub>s</sub>	$S_s = k / a$

Взаимный перерасчет фильтрационных параметров

Пересчет параметров	×
Сопротивление русла реки	Козффициент формы
Параметр перетекания	Пьезопроводность
150         Проводимость, м^2/сут           .00001         Водоотдача,	
3.75         Коэффициент фильтрации, м/сут           2.5E-07         Удельная водоотдача, 1/м           40         Мощность, м	
1.5E+07 Пьезопроводность, м^2/сут	
	Закрыть Справка

Рис. 1.52. Диалоговое окно для расчета пьезопроводности.

Пе	есчет параметров	×
ſ	Параметр перетекания Пьезопроводность Сопротивление русла реки Коз ффициент формы	
	150         Проводимость водоносного пласта, м^2/суг           20         Мощность водоносного пласта, м           0.1         Коз фФициент фильтрации русла реки, м/суг           50         Ширина реки, м           1.5         Мощность русла реки, м/суг	
	60.54969 Сопротивление русла реки (Шестаков), м 112.5 Сопротивление русла реки (Хантуш), м	
L	Закрыты Справка	

Рис. 1.53. Диалоговое окно для расчета сопротивления русла реки.

Во вкладке «*Conpomuвление русла реки*» (рис. 1.53) определяется одноименный параметр по решению Шестакова (2.9.4) и Хантуша (2.9.10). Сопротивление русла реки в этих решениях имеет разный физический смысл, и поэтому их значения отличаются.

Во вкладке «Коэффициент формы» (рис. 1.54) выбирается конфигурация пьезометра. Это имеет отношение к решениям Менча (гл. 2), учитывающим емкость наблюдательной скважины или пьезометра в виде значения коэффициента формы (табл. 1.36).

Формулы расчета коэффициента формы



Примечание. F – коэффициент формы, м;  $l_p$  – длина фильтра скважины, м;  $r_p$  – радиус скважины, м; m – мощность напорного пласта или обводненная мощность безнапорного пласта, м;  $\chi$  – коэффициент анизотропии.



Рис. 1.54. Диалоговое окно для расчета коэффициента формы.

Верхний ряд рисунков дан для напорного водоносного пласта, нижний – для безнапорного пласта.

Выбор осуществляется путем нажатия клавиши мыши на требуемый рисунок. Индикатором выбора является заголовок рамки рисунка, который подсвечивается красным цветом. Кроме этого, в данном окне пользователь сам может оценить численное значение коэффициента формы при заданных параметрах: радиус скважины (r), длина фильтра (Lf), мощность пласта (m), анизотропия (kz/kx) и конфигурация пьезометра. Если флажок «Модифицированный» (рис. 1.54) отмечен, то программа рассчитывает коэффициент, который подставляется в решения Менча (Moench, 1997): коэффициент формы, деленный на  $2\pi$ .

Формулы для расчета коэффициента формы изучены в работах Ф. Форхгеймера (1930), М. Хворслева (Hvorslev, 1951), В. И. Аравина, С. Н. Нумерова (1953) и др. Обобщенные результаты этих исследований используются в программном комплексе ANSDIMAT (табл. 1.36) (Sunjoto, 1994).

#### 1.7.1.4. Корректировка исходных данных

Диалоговое окно «Корректировка исходных данных» предназначено для быстрой замены параметров опытного опробования (рис. 1.55, табл. 1.37). Измененные данные используются только для текущей обработки, т.е. при следующей загрузке про-



Рис. 1.55. Вкладки диалогового окна «Корректировка исходных данных».

екта программа вернет исходные значения, набранные ранее в редакторе (см. разд. 1.3). В окне не предусмотрена отмена сделанных изменений. Для возвращения к исходным параметрам загрузите проект с опробованием заново.

Окно вызывается через главное меню «Обработка > Прямое решение», затем вкладка «Опции» и кнопка «Корректировка данных» (рис. 1.50).

Для замены исходных данных, относящихся к скважине (например, расстояние или расход), выберите скважину в списке «Опытная скважина» и/или «Наблюдательная скважина» и введите значение в требуемое поле.

Таблица 1.37

Вкладка «Опробование»	Изменение характеристик опробования и водо- носного пласта
Вкладка «Pacxod»	Изменение постоянного расхода для опытных скважин
Вкладка «Расстояние»	Изменение горизонтальных расстояний от каж- дой опытной скважины до каждой наблюдатель- ной скважины
Вкладка «Смещение»	Изменение вертикального расстояния от центра фильтра каждой опытной скважины до центра фильтра каждой наблюдательной скважины
Вкладка «Скважина»	Изменение горизонтальных и вертикальных расстояний до границ фильтрационного потока в плане и в разрезе, длины фильтра опытных и на- блюдательных скважин, радиуса скважин
Вкладка «Окончание»	Изменение уровня на момент остановки откач- ки для каждой наблюдательной скважины

Пояснения к диалоговому окну «Корректировка исходных данных»

Примечание. Каждая вкладка соответствует вкладкам и таблицам редактора для ввода данных опытного опробования (см. 1.3.1 и 1.3.2). Там же смотри более подробную информацию о назначении изменяемых параметров. При вводе длительности откачки и постоянного расхода используйте нажатие левой кнопки мыши и клавиши Shift или Ctrl в этих полях для пересчета вводимых значений (рис. 1.11 и 1.40).

Вре́менная корректировка фактических замеров понижения, восстановления или переменного расхода осуществляется в таблице в левой части экрана программного комплекса (рис. 1.25). Для этого дважды кликнете клавишей мыши в требуемом поле таблицы и введите новое значение. Изменение автоматически отобразиться в графическом окне «*Основной график*». При этом все ранее построенные расчетные кривые будут удалены.

# 1.7.2. Графоаналитическая обработка

Графоаналитическая обработка в программном комплексе ANSDIMAT предусмотрена для большинства расчетных схем. Применяются способы прямой линии, горизонтальной прямой линии, а также способ эталонных кривых.



Рис. 1.56. Обработка опробования способом прямой линии (*a*) и варианты диалоговых окон «Значение»: для графика временного (*б*) и площадного (*в*) прослеживания.

Для входа в режим графоаналитической обработки используйте меню «Обработка > Графоаналитический способ» или клавишу клавиатуры F6. Для выхода из режима нажмите клавишу Esc.

В зависимости от графика индикаторной кривой (см. 1.6.1.1), условий проведения опробования (разд. 1.5) и схемы опробования (разд. 1.4) программа автоматически определит доступный графический способ. Например, для откачки, проведенной в однородном напорном пласте (см. 2.1.1), для графика  $s - \lg t$  отобразиться прямая линия, а для графика  $\lg s - \lg t$  программа построит эталонную кривую. Для тех же графиков, но в условиях водоносного комплекса с перетеканием (см. 2.5.1.1), это будут соответственно горизонтальная прямая линия и эталонная кривая для заданного параметра перетекания.

Внимание! Для схемы экспресс-опробования при вызове данного меню появится дополнительное диалоговое окно *«Решение для экспресс-опробования»* (рис. 1.57).

Все доступные графоаналитические способы и определяемые по ним параметры отдельно для каждой расчетной схемы и условий проведения опробования подробно описаны в разд. 2 и разд. 3.

#### 1.7.2.1. Способ прямой линии

Прямолинейный участок на графике индикаторной кривой является одним из наиболее важных диагностических признаков при интерпретации ОФО. Обработка способом прямой линии (см. 4.1.1) осуществляется на графиках временного (рис. 1.56, *a*), площадного и комбинированного прослеживания (см. разд. 1.6). Кроме этого, для ряда схем способ используется на графиках с приведенными значениями времени и приведенными расстояниями до опытных скважин (например, для ограниченных пластов или при групповой откачке). Способ используется там, где это позволяет уравнение фильтрации выбранной расчетной схемы, и, как правило, применяется к участку индикаторной кривой, приуроченной к квазистационарному режиму.

Одновременно с прямой на экране появляется дополнительное окно «Значение», на котором отображаются выбранные ранее скважины и определенные способом прямой линии параметры (рис. 1.56, б). Для графиков площадного прослеживания в окне «Значение» отображаются выбранные для построения графика замеры (рис. 1.56, в).

Для стандартных графиков (разд. 1.6) первоначальное наложение прямой линии на индикаторную кривую осуществляется автоматически минимизацией отклонения фактических замеров от прямой линии. Это же происходит и при переходе к обработке другой скважины в списке «*Скважины*» окна «*Значение*» (рис. 1.56,  $\delta$ ) или другого замера для графика площадного прослеживания (рис. 1.56,  $\epsilon$ ). Минимизация осуществляется с помощью метода наименьших квадратов (см. 4.3.2). Для автоматического наложения прямой линии к определенному участку индикаторной кривой необходимо выйти из режима обработки и удалить «лишние» замеры с графика (см. 1.6.5).

#### Последовательность действий при определении параметров способом прямой линии на графиках временного или комбинированного прослеживания:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

**Внимание!** При пропуске пункта 1 на графике будут отображаться данные для всех имеющихся в проекте наблюдательных скважин.

2) выбрать график временно́го или комбинированного прослеживания (например,  $s - \lg t$  или  $s - \lg t/r^2$ ), на котором предусматривается обработка данным способом (меню «Выбор > График»);

3) выбрать меню «Обработка > Графоаналитический способ»: на экране появится окно «Значение», а на графике – прямая линия;

4) нажать левую кнопку мыши в точку графического поля, куда необходимо перенести начало прямой линии;

5) нажать правую кнопку мыши в точку графического поля, куда необходимо перенести конец прямой линии;

6) посмотреть результат в диалоговом окне «Значение» (рис. 1.56,  $\delta$ );

7) при необходимости перейти к обработке данных по другой наблюдательной скважине (для графика временно́го прослеживания): в окне «*Значение*» выбрать скважину из списка «*Скважины*», повторить пункты 4–6;

8) нажать клавишу Esc для выхода из режима обработки.

Последовательность действий при определении параметров способом прямой линии на графиках площадного прослеживания:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

2) выбрать времена замеров, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Время»);

**Внимание!** При пропуске пунктов 1 и 2 на графике будут отображаться данные по последнему замеру для всех имеющихся наблюдательных скважин.

3) выбрать график площадного прослеживания (например,  $s - \lg r$ ), на котором предусматривается обработка данным способом (меню «Выбор > График»);

4) выбрать меню «Обработка > Графоаналитический способ»: на экране появится окно «Значение», а на графике – прямая линия;

5) нажать левую кнопку мыши на графическое поле, куда необходимо перенести начало прямой линии;

6) нажать правую кнопку мыши на графическое поле, куда необходимо перенести конец прямой линии;

7) посмотреть результат в диалоговом окне «Значение» (рис. 1.56, в);

8) при необходимости перейти к обработке данных по другому замеру (если он есть на графике): в окне «Значение» выбрать замер из списка «Время», повторить пункты 4–7;

9) нажать клавишу Esc для выхода из режима обработки.

В табл. 1.38 перечислены все доступные действия при определении параметров способом прямой линии.

Клавиши Left, Right	Перемещение прямой влево, вправо	
Клавиши Up, Down	Перемещение прямой вверх, вниз	
Клавиши Home, End	Перемещение левого конца прямой вверх, вниз	
Клавиши PgUp, PgDn	Перемещение правого конца прямой вверх, вниз	
Клавиша «1»	Уменьшение шага перемещения в 2 раза	
Клавиша «2»	Увеличение шага перемещения в 2 раза	
Клавиша «З»	Возврат к первоначальному шагу перемещения	
Клавиши «+», «»	Увеличение, уменьшение длины прямой линии	
Нажатие левой кнопки мыши в поле графика	Перемещение левого конца прямой в точку распо- ложения курсора мыши	
Нажатие правой кнопки мыши в поле графика	Перемещение правого конца прямой в точку рас- положения курсора мыши	
Клавиша Enter	Дублирование прямой линии. Позволяет на одном графике отобразить несколько прямых линий	
Выбор скважины или замера в окне « <i>Значение»</i>	Переход к обработке выбранной скважины (рис. 1.56, б) или замера (рис. 1.56, в). Последнее от- носится для графиков площадного прослеживания	
Клавиша Esc	Выход из обработки способом прямой линии и за- крытие диалогового окна «Значение»	

#### Пояснения к клавишам управления при обработке способом прямой линии

П р и м е ч а н и е. При использовании клавиш клавиатуры для перемещения прямой линии удобнее пользоваться цифровой панелью клавиатуры при выключенной клавише NumLock.

Способ прямой линии для экспресс-опробований. Для экспресс-опробования определение параметров способом прямой линии зависит от используемого решения (разд. 3.2). Выбор этого решения осуществляется через диалоговое окно «Решение для экспресс-опробования» (рис. 1.57).

Окно открывается при выборе меню «Обработка > Графоаналитический способ» только для схемы экспресс-опробования и для графика  $lg(s_0 / s) - t$ .

В табл. 1.39 представлены решения, применяемые при выборе опций диалогового окна. Их подробное описание см. в соответствующих подразделах разд. 3.2.
Решение для экспресс-опробования				
<ul> <li>Воиwer-Rice: безнапорный пласт</li> <li>Hvorslev: напорный пласт</li> <li>Hvorslev: напорный пласт, пьезометр</li> <li>Hvorslev: безнапорный пласт</li> </ul>				
O Hvorslev: безнапорный пласт, пьезометр				
1         Ксэффициент анизотропии, ~           0.1         Радиус обсадной трубы, м				
ОК Отмена Справка				

Рис. 1.57. Диалоговое окно «Решение для экспресс-опробования».

#### Таблица 1.39

Переключатель «Bouwer- Rice: безнапорный пласт»	Решение Бауер–Райса для несовершенной скважины в безнапорном пласте (см. рис. 3.3)				
Переключатель «Hvorslev: напорный пласт»	Решение Хворслева для несовершенной сква- жины в напорном пласте, скважина примыкает к кровле пласта (см. рис. 3.5, <i>a</i> )				
Переключатель «Hvorslev: напорный пласт, пьезометр»	Решение Хворслева для скважины в непрони- цаемой толще, которая вскрывает напорный пласт своим дном (см. рис. 3.5, б)				
Переключатель «Hvorslev: безнапорный пласт»	Решение Хворслева для несовершенной сква- жины в безнапорном пласте (см. рис. 3.5, <i>в</i> )				
Переключатель «Hvorslev: безнапорный пласт, пьезометр»	Решение Хворслева для несовершенной сква- жины в безнапорном пласте: открыта только ниж- няя часть фильтра (см. рис. 3.5, г)				
Поле «Коэффициент анизотропии»	Задание коэффициента профильной анизотро- пии (см. Приложение 1). Используется в решени- ях Хворслева				
Поле «Радиус обсадной трубы»	Задание радиуса обсадной трубы опытной скважины				

#### Пояснения к диалоговому окну «Решение для экспресс-опробования»

Примечание. Независимо от решения, по которому обрабатывается экспрессопробование, прямая линия для «идеальных» условий должна выходить из начала координат. Особенности интерпретации данным способом см. в работах Бауэра и Райса (Bouwer, Rice, 1976; Bouwer, 1989). **Поиск прямолинейного участка.** Далеко не для всех схем и условий проведения опробования существует определение параметров способом прямой линии. Тем не менее в программе ANSDIMAT предусмотрена возможность нахождения прямолинейного участка на любом графике индикаторной кривой.

Вызов прямой линии осуществляется через меню «Инструменты > Прямая» или с помощью сочетания клавиш клавиатуры Ctrl + L.

Одновременно с прямой на экране появляется дополнительное окно «Параметры прямой» (рис. 1.58) с геометрическими параметрами прямой линии, где С – угловой коэффициент, Ау – величина, которую отсекает прямая на оси ординат (при X = 0), Ах – величина, которую отсекает прямая на оси абсцисс (при Y = 0).



Рис. 1.58. Окно поиска прямолинейного участка.

При использовании прямой на графике  $s - \lg t$ ,  $s - \lg \frac{t}{r^2}$ или  $s - \lg r$  пользователь с помощью данной опции может также оценить проводимость пласта (T), определенную по углу наклона прямой для схемы неограниченного в плане напорного пласта (формулы см. в табл. 2.1). В расчете проводимости участвует постоянный расход опытной скважины, заданный в редакторе. В случае групповой откачки расходы скважин суммируются (см. табл. 3.3).

Изменение положения прямой линии возможно только с помощью мыши (табл. 1.40).

Таблица 1.40

## Пояснения к клавишам управления при поиске прямолинейного участка

Нажатие левой кнопки мыши в поле графика	Перемещение левого конца прямой линии в точ- ку расположения курсора мыши
Нажатие правой кнопки мыши в поле графика	Перемещение правого конца прямой линии в точ- ку расположения курсора мыши
Клавиша Enter	Дублирование прямой линии. Позволяет на од- ном графике отобразить несколько прямых
Клавиша Esc	Убрать прямую линию с экрана и закрыть окно «Параметры прямой»

# 1.7.2.2. Способ горизонтальной прямой линии

Способ может использоваться как разновидность классического способа прямой линии для определения фильтрационных параметров по стационарным участкам индикаторной кривой (например, для схем с границей обеспеченного питания). В этом случае прямая линия располагается параллельно оси абсцисс (рис. 1.59, *a*) и перемещается вверх и вниз, а параметры определяются по величине, которую отсекает прямая линия на оси ординат.

Как правило, по способу горизонтальной прямой линии (см. 4.1.2) определяется только один параметр: проводимость или коэффициент фильтрации водоносного пласта. Для схем с перетеканием способ горизонтальной прямой линии используется при заданном параметре перетекания B, который необходимо ввести в соответствующее поле окна «Значение» (рис. 1.59,  $\delta$ ). При замене параметра перетекания изменится и определяемый параметр.

Для большинства схем аналогичную обработку можно проводить и для квазистационарного режима при построении графика по изменению уровня в двух наблюдательных скважинах (см. разд. 1.6).



Рис. 1.59. Пример определения проводимости способом горизонтальной прямой линии (*a*) по стационарному участку индикаторной кривой для схемы полуограниченного в плане водоносного пласта с границей обеспеченного питания. Пример диалогового окна *«Значение»* с полем для ввода параметра перетекания (*б*).

Пояснение к управлению горизонтальной прямой линии см. в табл. 1.38 с учетом того, что прямая перемещается только вверх и вниз графика параллельно оси абсцисс.

## 1.7.2.3. Способ эталонной кривой

Обработка способом эталонной кривой (см. 4.1.3) осуществляется на графиках временного или комбинированного прослеживания. Для ограниченного числа схем эталонная кривая накладывается и на график площадного прослеживания.

Одновременно с эталонной кривой на экране появляется дополнительное окно «Значение» (рис. 1.60, а), на котором отображаются выбранные ранее скважины (или замеры для графиков площадного прослеживания) и определенные способом эталонной кривой параметры. Для схем с перетеканием эталонная кривая строится для заданного параметра перетекания, который вводится в соответствующем поле окна «Значение» (рис. 1.60,  $\delta$ ). При замене параметра перетекания эталонная кривая будет заново перестроена.



Рис. 1.60. Обработка опробования способом эталонной кривой (*a*), диалоговое окно «*Значение*» для схемы с перетеканием (*б*).

Как правило, способ эталонной кривой применяется ко всему участку индикаторной кривой при условии, что все замеры укладываются в выбранную схему.

## Последовательность действий при определении параметров способом эталонной кривой на графиках временно́го или комбинированного прослеживания:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

**Внимание!** При пропуске пункта 1 на графике будут отображаться данные для всех имеющихся в проекте наблюдательных скважин.

2) выбрать билогарифмический график временного или комбинированного прослеживания (например,  $\lg s - \lg t$  или  $\lg s - \lg t / r^2$ ), на котором предусматривается обработка данным способом (меню «Выбор > График»);

3) выбрать меню «Обработка > Графоаналитический способ»: на экране появится окно «Значение», а на графике – эталонная кривая, построенная для заданной схемы опробования; 4) клавишами управления курсором (табл. 1.41) переместить эталонный график до его визуального совмещения с фактическими данными;

5) посмотреть результат в диалоговом окне «Значение»;

6) при необходимости для схемы с перетеканием изменить величину параметра перетекания в диалоговом окне «Значение» (рис. 1.60,  $\delta$ ) и повторить пункты 4–5;

7) при необходимости перейти к обработке данных по другой наблюдательной скважине (для графика временно́го прослеживания): в диалоговом окне *«Значение»* выбрать скважину из списка *«Скважины»*, повторить пункты 4–6;

8) нажать клавишу Еsc для выхода из режима обработки.

# Последовательность действий при определении параметров способом эталонной кривой на графиках площадного прослеживания:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

2) выбрать времена замеров, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Время»);

**Внимание!** При пропуске пунктов 1 и 2 на графике будут отображаться данные по последнему замеру для всех имеющихся в проекте наблюдательных скважин.

3) выбрать билогарифмический график площадного прослеживания ( $\lg s - \lg r$ ), на котором предусматривается обработка данным способом (меню «*Выбор* > *График*»);

4) выбрать меню «Обработка > Графоаналитический способ»: на экране появится окно «Значение», а на графике – эталонная кривая, построенная для заданной схемы опробования;

5) клавишами управления курсором (табл. 1.41) переместить эталонный график до его визуального совмещения с фактичес-кими данными;

6) посмотреть результат в диалоговом окне «Значение»;

7) при необходимости для схемы с перетеканием изменить величину параметра перетекания в диалоговом окне «Значение» (рис. 1.60,  $\delta$ ) и повторить пункты 4–6;

8) при необходимости перейти к обработке данных по другому замеру (если он есть на графике): в диалоговом окне «Значение» выбрать время из списка «Время», повторить пункты 5–7;

9) нажать клавишу Esc для выхода из режима обработки.

В табл. 1.41 перечислены все возможные действия при определении параметров способом эталонной кривой.

Таблица 1.41

Клавиши Left, Right	Перемещение эталонной кривой влево, вправо			
Клавиши Up, Down	Перемещение эталонной кривой вверх, вниз			
Клавиша «1»	Уменьшение шага перемещения в 2 раза			
Клавиша «2»	Увеличение шага перемещения в 2 раза			
Клавиша «З»	Возврат к первоначальному шагу перемещения			
Нажатие кнопки мыши в поле графика	Перемещение нулевой координаты эталонного графика в точку расположения курсора мыши			
Клавиша Enter	Дублирование эталонной кривой. Позволяет на од- ном графике отобразить несколько эталонных кривых			
Выбор скважины в окне «Значение»	Переход к обработке выбранной скважины. На графике площадного прослеживания здесь отобража- ются выбранные для обработки временные замеры			
Клавиша Esc	Выход из обработки способом эталонной кривой и закрытие диалогового окна «Значения»			

Пояснения к клавишам управления при обработке способом эталонной кривой

 $\Pi$ р и м<br/> е ч а н и е. Эталонная кривая перемещается только параллельно ко<br/>ординатным осям фактического графика.

# 1.7.3. Способ биссектрисы

Графоаналитическое определение величины пьезопроводности по способу биссектрисы (разд. 4.2, табл. 1.42) осуществляется с помощью одноименного диалогового окна «Способ биссектрисы» (рис. 1.61).

Окно вызывается через главное меню «Обработка > Способ биссектрисы» или нажатием правой кнопки мыши в нижнем левом углу поля построения графика биссектрисы.

Способ биссектрисы	×	Способ биссектрисы	×
Параметр Опции Пьезопроводность [106196 м^2/сут	ОК Отмена Применить Справка	Параметр Опции Линия Толщина: 2 Цвет: График: lg( s0 / s ) - lg( f0 / f )	ОК Отмена Применить Справка

Рис. 1.61. Вкладки диалогового окна «Способ биссектрисы».

Окно состоит из двух вкладок. Во вкладке «Параметры» вводится предполагаемое значение пьезопроводности, которое необходимо для построения графика, а во вкладке «Опции» – вспомогательные опции отображения графика.

Таблица 1.42

Рамка «Пьезопроводность»	Содержит поле для задания предполагаемой пьезо- проводности опробуемого пласта		
Рамка «Линия»	Задание толщины диагональной линии, относитель- но которой осуществляется подбор, и ее цвета		
Флажок « <i>График</i> »	Для расчета по данному методу использовать гра- фик отношения максимального понижения к восста- новлению уровня. Применяется при обработке периода восстановления уровня		

Пояснения к диалоговому окну «Способ биссектрисы»

П р и м е ч а н и е. Вид индикаторной кривой на графике соответствует первой наблюдательной скважине из выбранных ранее для применения способа биссектрисы.

График строится по двум наблюдательным скважинам в координатах  $s_1/s_2 - f_1/f_2$ , где s – фактическое изменение уровня, f – функциональная зависимость, участвующая в определении расчетного изменения уровня по выбранной схеме, индексы 1 и 2 относятся к первой и второй наблюдательным скважинам. В ряде схем при обработке восстановления способом биссектрисы предусматривается использование только одной наблюдательной скважины. В этом случае график строится в координатах  $lg(s_0/s)-lg(f_0/f)$ , где s, f – фактическое и расчетное восстановление уровня,  $s_0, f_0$  – фактическое и расчетное понижение на момент остановки откачки.



Рис. 1.62. Окно построения графика для определения параметров по способу биссектрисы.

Результат отображается на графике отношения изменения уровня в двух наблюдательных скважинах, где по оси ординат откладывается отношение фактических данных на каждый момент времени, а по оси абсцисс – расчетных. При соответствии опробования выбранной схеме способ применяется ко всему участку индикаторной кривой.

Если заданная пьезопроводность отвечает опробуемому пласту, то фактические данные на графике должны ложиться на диагональную линию (рис. 1.62), а при ошибочном значении – отклоняться от нее. График не зависит от проводимости пласта и расхода. Здесь надо помнить, что для некоторых схем на результат могут оказывать влияние различные параметры. Например, для схемы с перетеканием (см. 2.5.1) расчетные данные по двум скважинам будут зависеть не только от пьезопроводности, но и от параметра перетекания. В этом случае необходимое значение вводится в окне «Подбор параметров» (рис. 1.46).

Для инверсии значений и изменения оси ординат ( $s_1/s_2$  заменить на  $s_2/s_1$  или наоборот) используйте меню «Инструменты > Инверсия». Это обычно требуется, когда во второй выбранной скважине изменение уровня больше, чем в первой. Последовательность действий при определении параметров способом биссектрисы:

1) выбрать две наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

2) выбрать меню «Обработка > Способ биссектрисы»: появится одноименное диалоговое окно «Способ биссектрисы» (рис. 1.61);

3) в поле «Пьезопроводность» ввести предполагаемое значение;

4) нажать кнопку «*OK*»;

5) появится график, построенный в координатах способа биссектрисы при заданном значении пьезопроводности (рис. 1.62), при необходимости используйте меню «Инструменты > Инверсия»;

6) при отклонении точек от прямой линии повторить пункты 2–5;

7) для выхода из режима обработки способом биссектрисы необходимо перейти к отображению другого графика (меню *«Выбор > График»*).

## 1.7.4. Решение обратной задачи

Для решения обратных задач в программном комплексе ANSDIMAT предусмотрено две возможности: 1) минимизация отклонения фактических данных от аналитической зависимости с применением метода наименьших квадратов (см. 4.3.2) и 2) с помощью программы UCODE (Poeter, Hill, 1998).

В решении обратной задачи участвуют замеры изменения уровня в наблюдательных скважинах, которые были выбраны ранее для построения индикаторных кривых в графическом окне «Основной график». Исключенные с экрана скважины (см. 1.6.1.2) и замеры (см. 1.6.5) не участвуют в калибровке. После решения обратной задачи рекомендуется перейти к решению прямой задачи с подобранными значениями (меню «Обработка > Прямое решение»).

Оценка параметров по фактическим данным в одной или нескольких наблюдательных скважинах осуществляется через меню «*Обработка* > *Обратное решение*», которое состоит из двух соответствующих каждому способу подменю.

# 1.7.4.1. Метод наименьших квадратов

Решение обратной задачи для определения фильтрационных параметров с помощью метода наименьших квадратов осуществляется через диалоговое окно «*Автоматический подбор*». Метод наименьших квадратов, с одной стороны, используется в программном комплексе для ограниченного числа расчетных схем и решений, но, с другой стороны, он доступен для базовых схем, более прост и удобен в применении.

Окно вызывается через главное меню «Обработка > Обратное решение > Метод наименьших квадратов» или с помощью клавиши клавиатуры F8.

Окно состоит из трех вкладок (рис. 1.63): «Параметры», «Опции» и «История».

Во вкладке «Параметры» пользователь задает технические параметры подбора. От этих значений может зависеть как сам результат решения обратной задачи, так и скорость расчета.

Во вкладке «Опции» указывается коэффициент уменьшения шага подбора параметров при достижении сходимости, т.е. во сколько раз надо уменьшить шаг подбора после достижения сходимости для увеличения точности подбора.

Вкладка «История» фиксирует подобранные значения в виде текстовой информации.

В табл. 1.43 поясняется назначение полей данного окна.

Таблица 1.43

Поле «Начальное значение»	Начальное значение пьезопроводности для подбора. Эта величина должна быть меньше искомого значения пьезопроводности
Поле	Начальный шаг подбора. Шаг подбора является одно-
«Шаг подбора»	временно и точностью подбора
Поле «Параметр перетекания»	Параметр перетекания, при котором осуществляется подбор. Поле появляется только для схем с перетеканием
Поле	Определяет коэффициент уменьшения шага подбора
«Уменьшение	параметров при достижении сходимости. Например, 4 –
шага подбора»	уменьшает шаг подбора в четыре раза

Пояснения к диалоговому окну «Автоматический подбор»

П р и м е ч а н и е. Значения, введенные в поля диалогового окна, запоминаются отдельно для каждого проекта.

Автоматический подбор	Автоматический подбор		
Параметры Опции История	Параметры Опции История		
Пьезопроводность 500 Начальное значение, м^2/сут 100000 Шаг подбора, м^2/сут	10 Уменьшение шага подбора		
100 Параметр перетекания, м			
Пуск Закрыты Справка	Пуск Закрыты Справка		

Рис. 1.63. Вкладки диалогового окна «Автоматический подбор».

С помощью кнопки «Пуск» (рис. 1.63) пользователь переходит непосредственно к решению обратной задачи. Результат подбора записывается в диалоговом окне «Окно автоподбора параметров» (рис. 1.64), в верхней части которого находятся две кнопки для управления расчетом (табл. 1.44).

Окно автоподбора параметров		
Продолжить Выход		
а = 105500 м^2/сут а = 106500 м^2/сут а = 106202 м^2/сут	f =-1.36112992678479E-03 f = 5.77718104112851E-04 T = 200.4247 w <sup>2</sup> 2/cm	da = 1000 da = 1000
a = 105500 m <sup>2</sup> /cyr a = 105500 m <sup>2</sup> /cyr a = 105700 m <sup>2</sup> /cyr a = 105700 m <sup>2</sup> /cyr a = 105900 m <sup>2</sup> /cyr a = 105900 m <sup>2</sup> /cyr	f =-1.36112992678479E-03 f =-1.1674591524122E-03 f =-3.62281625133407E-04 f =-7.74330977193768E-04 f =-5.80234605660547E-04	da = 100 da = 100 da = 100 da = 100 da = 100
a = 106000 m^2/cyr a = 106100 m^2/cyr a = 106200 m^2/cyr a = 106196.2 m^2/cyr	f =-3.82972293694266E-04 f =-1.91861091209953E-04 f = 7.50536694137712E-06 T = 200.3775 m <sup>2</sup> /cyt	da = 100 da = 100 da = 100

Рис. 1.64. Фрагмент диалогового окна «Окно автоподбора параметров». Пример подбора параметров.

Таблица 1.44

Пояснения к диалоговому окну «Окно автоподбора параметров»

Кнопка «Продолжить»	Возобновляет расчет при достижении сходимости с новым шагом подбора (см. поле «Уменьшение шага подбора» в табл. 1.43)		
Кнопка « <i>Выход</i> »	Закрытие окна и возврат к диалоговому окну «Ав- томатический подбор» (рис. 1.63)		
Клавиша Esc	Прерывание расчета и закрытие окна		

В основной части окна (рис. 1.64) отображается процесс подбора, где: а – значение пьезопроводности, при которой ищется сходимость,  $m^2/сут$ ; f – значение искомой функции (ищется точка перехода функции через ноль); da – текущий шаг подбора пьезопроводности,  $m^2/сут$ .

Окончание подбора характеризуется появлением в окне найденных значений пьезопроводности и проводимости (или коэффициента фильтрации – в зависимости от расчетной схемы) при заданном шаге подбора. В дальнейшем можно продолжить подбор с новым уменьшенным шагом (кнопка «Продолжить») или закончить подбор (кнопка «Выход»).

## Последовательность действий при определении параметров с помощью метода наименьших квадратов:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

2) при необходимости удалить замеры с графика, которые не должны участвовать в определении параметров при решении обратной задачи (меню «Инструменты > Значение», см. удаление фактических замеров в 1.6.5);

3) вызвать диалоговое окно «Автоматический подбор» (меню «Обработка > Обратное решение > Метод наименьших квадратов»);

4) в поле «*Начальное значение*» указать начальное значение пьезопроводности для начала подбора, которое должно быть заведомо меньше искомого;

5) в поле «Шаг подбора» указать начальный шаг подбора пьезопроводности;

**Внимание!** Не используйте слишком маленький шаг подбора. Для ускорения расчета задавайте его соизмеримым с предполагаемой пьезопроводностью. Уменьшать его рациональней в процессе подбора.

6) нажать кнопку «Пуск» для перехода к подбору параметров;7) откроется диалоговое окно «Окно автоподбора пара-

7) откроется диалоговое окно «Окно автоподбора параметров» с отображением результата расчета (рис. 1.64);

8) дождаться окончания расчета – значения подобранных параметров зафиксируются в последней строке окна;

9) при необходимости нажать кнопку «Продолжить» для уменьшения шага подбора, и следовательно увеличения точности расчета;

10) повторить пункты 8–9 до достижения желаемой точности, которая соответствует шагу подбора;

11) нажать кнопку «Выход» для закрытия диалогового окна «Окно автоподбора параметров».

12) при необходимости повторить пункты 4-10 с другими параметрами подбора;

13) нажать кнопку «Закрыть» для выхода из режима автоматического подбора параметров;

14) для визуальной оценки результата расчета перейдите в меню «Обработка > Прямое решение» и нажмите «ОК».

Если решение не может сойтись, то для выхода требуется нажать клавишу Esc. Возможные шаги для достижения сходимости:

1) изменить начальные параметры подбора (начальное значение пьезопроводности и шаг подбора);

2) уменьшить количество наблюдательных скважин, изменение уровня в которых участвует в решении обратной задачи;

 удалить из подбора некондиционные фактические замеры (см. 1.6.5) или замеры, которые явно не укладываются в выбранную расчетную схему;

4) изменить расчетную схему.

Эти же шаги рекомендуется предпринять, если программа сходится, но при решении прямой задачи с подобранными параметрами (см. 1.7.1.1) расчетные значения изменения уровня значительно отличаются от фактических данных.

# 1.7.4.2. Программа UCODE

Работа с UCODE осуществляется через диалоговое окно «Обратное решение (UCODE)» (рис. 1.65). Для этого был создан специальный модуль, предназначенный для подготовки данных в формате UCODE и запуска программы на выполнение непосредственно из программного комплекса ANSDIMAT.

UCODE, универсальный код (Poeter, Hill, 1998), был адаптирован для решения всех аналитических нестационарных уравнений фильтрации, заложенных в комплекс. Для работы с ним пользователь может выбирать решение, схему, наблюдательные скважины и времена замеров, задавать искомые фильтрационные параметры и исключать из подбора заранее известные.

Окно вызывается через главное меню «Обработка > Обратное решение > UCODE» или с помощью сочетания клавиш клавиатуры Ctrl + F8.

Окно состоит из четырех вкладок: «Параметры», «Наблюдения», «Управление» и «Вывод».

Обратное решение (	UCODE)		x
Параметры	Наблюдения	Управление	Вывод
Список параметров:			
Проводимость, №	1^2/cyr		
№ Пьезопроводнос	ть, м. 2/сут		
Начало подбора:	Минимум:	Максимум:	Возмущение:
11.30	10	1300	10.01
200			
	постоянное значен	ие	
Решатель:			
Функция влияния	скважины (Тейс)		<u> </u>
	L	Пуск Закры	БПРАВКА

Обратное решение (UCODE) X					
Параметры Н	Тараметры Наблюдения Управление			Вы	50д
Наблюдательные скважин	њ:				
$\Box \ln(r = 1m)$	Bpe	емя, сут	S, M	9читывать	
2n(r = 2.51 m)		0.001	1.51	×	
$\Box$ 3n (r = 25.14 m)		0.00126	1.61	×	
✓ 4n (r = 79.5 m)		0.00158	1.70	×	
✓ 5n (r = 251.4 m)		0.002	1.78	×	
		0.00251	1.87	×	
		0.00316	1.95	×	
		0.00398	2.03	×	
		0.00501	2.12	×	
		0.00631	2.20	×	
		0.00794	2.29	×	
		0.01	2.37	×	
		0.01259	2.46	×	
		0.01585	2.55	×	
		0.01995	2.63	×	
		0.02512	2.72	×	
		0.03162	2 81	×	
			_		
	C	Пуск	Закр	ыть Сп	равка

Рис. 1.65. Вкладки диалогового окна «Обратное решение (UCODE)».

Внизу диалогового окна расположена кнопка «Пуск», предназначенная для создания входных файлов для программы UCODE и запуска программы UCODE на выполнение. При нажатии данной кнопки сохраняются все изменения, сделанные пользователем в диалоговом окне.

Вкладка «Параметры» предназначена для выбора фильтрационных параметров, подлежащих определению, и задания параметров подбора (табл. 1.45). От этих значений может зависеть результат решения обратной задачи и достижение сходимости.

Таблица 1.45

Список «Список параметров»	Выбор параметров для калибровки (отметить галочкой). Если параметр отмечен галочкой, то необходимо задать зна- чения в четыре нижних поля: «Начало подбора», «Минимум», «Максимум», «Возмущение». В противном случае вводится значение в поле «Постоянное значение»
Поле «Начало подбора»	Начальное значение подбираемого параметра: ориентиро- вочное предполагаемое значение фильтрационного параметра
Поле «Минимум»	Минимально возможное значение подбираемого параметра
Поле «Максимум»	Максимально возможное значение подбираемого параметра
Поле «Возмущение»	Используется при расчете чувствительности. Рекомендует- ся задавать 0.01: означает 1 % значения параметра (см. параметр PERTRUBATION в руководстве UCODE (Poeter, Hill, 1998))
Поле «Постоянное значение»	Значение параметра, которое подставляется в уравнение фильтрации, если параметр исключен из решения обратной задачи (в списке параметров не отмечен)
Список «Решатель»	Выбор решения для подбора параметров. Появляется для расчетных схем, где предусмотрена обработка по нескольким решениям. Для разных решений может быть разный список искомых параметров При открытии окна в списке будет первое решение или решение, которое последним использовалось при определе- нии параметров с помощью прямой задачи (см. 1.7.1.1)

#### Пояснения к диалоговому окну «Обратное решение (UCODE)»: вкладка «Параметры»

П р и м е ч а н и е. Поля «Минимум» и «Максимум» должны ограничивать диапазон поиска фильтрационных параметров программой UCODE. В поле «Начало подбора» значение должно быть больше минимального и меньше максимального.

Во вкладке «Параметры» повторяются все опции, которые отображаются в диалоговом окне «Подбор параметров» (рис. 1.46 и 1.47) при решении прямой задачи. Например, флажок «Скин» или «Изотропный пласт». Для профильно-анизотропных пластов при включенном флажке «Изотропный пласт» значение коэффициента фильтрации по вертикали в списке параметров блокируется.

Вкладка «*Наблюдения*» отображает данные замеров изменения уровня в наблюдательных скважинах (табл. 1.46), участвующих в решении обратной задачи.

Таблица 1.46

Список «Наблюдательные скважины»	Отображает список наблюдательных скважин. Калиб- ровка осуществляется по изменению уровня в скважи- нах, отмеченных галочкой
Таблица	Отображает замеры по текущей скважине
Колонка «Время»	Время замера. При нажатии правой кнопки мыши в колонке появится контекстное меню с пересчетом времени для текущего замера (рис. 1.11, <i>a</i> )
Колонка «s»	Значение понижения/повышения уровня
Колонка «Учитывать»	Показывает замеры (помечены крестиком), которые будут участвовать в определении параметров. Исключе- ние замеров из решения обратной задачи осуществляется в графическом окне «Основной график» (см. 1.6.5)

### Пояснения к диалоговому окну «Обратное решение (UCODE)» вкладка «Наблюдения»

Вкладки «Управление» и «Вывод» предназначены для ввода технических параметров запуска программы UCODE и расчета искомых значений. Их назначение см. в руководстве пользователя UCODE (Poeter, Hill, 1998).

После запуска программы на выполнение появится черный экран с информацией о ходе подбора (рис. 1.66). Определяемым параметрам, перечисленным в списке «Список параметров» (рис. 1.65), последовательно присваиваются условные имена P1, P2 и т.д. Например, P1 – проводимость, P2 – пьезопровдность. По завершении работы UCODE вне зависимости от успеха подбора внизу экрана появится надпись: «Для продолжения нажмите любую клавишу...». Нажатие любой клавиши клавиатуры закроет окно программы UCODE.

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
                                                                                                  - 🗆 ×
 UPDATED ESTIMATES OF REGRESSION PARAMETERS
                Ρ2
 200.38
                 1.06196E+05
                                                    LEAST SQUARES
                                                   OBJ OBJ FNC
FUNC W/PRIOR MAX-CHG PARAM
71E-01 .71E-01 0.54E-02 P2
                                                                                            MARORDT
                                                                                                 0.00
CHECKING FOR ITERATION WITH THE LOWEST SUM OF SQUARED RESIDUALS
Forward difference perturbation for parameter (1) of (2)
Forward difference perturbation for parameter (2) of (2)
Backward difference perturbation for parameter (1) of (2)
Backward difference perturbation for parameter (2) of (2)
ITERATION NO. =
 MAX. FRACTIONAL PAR. CHANGE------ = 0.22070E-06
MAX. FRAC. CHANGE OCCURRED FOR PAR.# 2, P2
 UPDATED ESTIMATES OF REGRESSION PARAMETERS :
                P2
1.06196E+05
 200 38
UCODE EXECUTION IS COMPLETE FOR PHASE NO. 3
PARAMETER ESTIMATION CONVERGED BY SATISFYING PARAMETER TOLERANCE CRITERIA
ия продолжения нажмите любцю клавишц
```

Рис. 1.66. Окно расчета программы UCODE.

Во время расчета программы UCODE возможна любая другая работа в программном комплексе ANSDIMAT.

## Последовательность действий при определении фильтрационных параметров с помощью программы UCODE:

1) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется обработка (меню «Выбор > Скважина»);

2) при необходимости удалить замеры с графика, которые не должны участвовать в определении параметров при решении обратной задачи (меню «Инструменты > Значение», см. удаление фактических замеров в 1.6.5);

3) вызвать диалоговое окно «Обратное решение (UCODE)» (меню «Обработка > Обратное решение > UCODE»);

4) при наличии списка «*Решатель*» выберите решение, с помощью которого требуется найти искомые параметры; это решение будет использовать UCODE;

5) поставить курсор в списке «Список параметров» на параметр;

6) отметить параметр галочкой, если требуется его определить при решении обратной задачи;

7) если параметр не отмечен галочкой – исключен из подбора, перейдите к пункту 12;

8) в поле «*Начало подбора*» введите начальное значение параметра для подбора: предполагаемое значение параметра;

9) в поля «*Минимум*» и «*Максимум*» введите минимальное и максимальное значения параметра для задания программе UCODE диапазона подбора;

10) в поле «*Возмущение*» укажите точность расчета (по умолчанию – 0.01);

11) если параметр отмечен галочкой, перейдите к пункту 13;

12) в поле «Постоянное значение» укажите значение параметра, при котором будут подбираться остальные значения, этот параметр будет исключен из подбора при решении обратной задачи и подставляться в уравнение фильтрации как постоянная величина;

13) повторите пункты 5-12 для каждого параметра;

14) нажмите кнопку «Пуск» для подготовки файлов в формате программы UCODE и запуска UCODE на выполнение;

15) для визуальной оценки результата расчета перейдите в меню «Обработка > Прямое решение» (рис. 1.46), нажмите кнопку «из UCODE» для загрузки полученных параметров и нажмите «OK».

Если программа UCODE не может сойтись или выдает сообщение об ошибке, то возможные шаги для устранения этого следующие:

1) изменить начальные параметры подбора;

2) изменить технические параметры для запуска программы UCODE (вкладка «Управление»);

3) уменьшить количество наблюдательных скважин, изменение уровня в которых участвует в решении обратной задачи;

4) удалить из подбора некондиционные фактические замеры (см. 1.6.5) или замеры, которые явно не укладываются в выбранную расчетную схему;

5) уменьшить количество подбираемых параметров (см. список «Список параметров» во вкладке «Параметры»);

6) для расчетных схем, в которых предусмотрено несколько решений, изменить решатель (см. список «*Решатель*» во вклад-ке «*Параметры*»);

7) изменить расчетную схему.

Программа ANSDIMAT дает возможность сохранять в виде файла как фактические замеры, так и расчетные данные изменения уровня. Кроме того, пользователь может сохранить любой построенный график в виде графического файла или поместить его в буфер обмена операционной системы.

Ниже перечислены возможные способы сохранения имеющейся в проекте информации:

 используйте меню «Файл > Сохранить dat-файл» для сохранения фактических данных изменения уровня (или расхода)
 в выбранных скважинах в текстовом (табличном) формате DAT,
 в файл переносятся данные, расположенные в таблице в левой части экрана;

– используйте меню «Файл > Сохранить bmp-файл» для сохранения окна «Основной график» в графическом формате ВМР;

– используйте диалоговое окно «Подбор параметров» для сохранения фактических и/или расчетных данных изменения уровня в выбранных скважинах в текстовом (табличном) формате DAT (алгоритм сохранения данных см. ниже), данные сохраняются в координатах отображенного графика;

 используйте меню «Инструменты > Копия и буфер обмена» или клавишу клавиатуры F9 для создания окна с копией графика и одновременным размещением изображения в буфер обмена операционной системы.

## Последовательность действий при сохранении фактических и/или расчетных данных:

1) выбрать график индикаторной кривой (меню «Выбор > График»);

2) выбрать наблюдательные скважины, по которым требуется произвести обработку (меню «Выбор > Скважина»);

3) выбрать меню «Обработка > Прямое решение» для вызова диалогового окна «Подбор параметров»;

4) выбрать решатель внизу диалогового окна (при его наличии);

5) ввести предполагаемые параметры в соответствующие поля диалогового окна;

6) выбрать вкладку «Опции»;

7) поставить галочки в рамке «*Сохранить*» для сохранения требуемых данных: фактических и/или расчетных;

8) в поле «Файл» укажите частоту записи расчетных данных – данные будут выводиться от минимального значения оси абсцисс до максимального с заданной частотой;

9) нажать кнопку «*Coxpaнumь*» – появится диалоговое окно сохpaнeния файла «*Coxpaнumь dat-фaйл*»;

10) введите имя файла в соответствующем поле;

11) нажмите кнопку «*Сохранить*» – программа создаст файл с расширением DAT с фактическими и/или расчетными данными изменения уровня в выбранных наблюдательных скважинах в координатах выведенного на экран графика.

Пункты 4 и 5 можно пропустить, если требуется сохранить только фактические данные в координатах отображенного графика.

Файл состоит из колонок с данными по координатным осям для фактических и расчетных данных в скважинах. В первой строке файла даны пояснения к колонкам (координата и имя скважины):

X\_#скв – значения оси абсцисс для фактических данных (например, X\_1p);

Y\_#скв – значения оси ординат для фактических данных (например, Y\_1p);

Xcalc\_#скв – значения оси абсцисс для расчетных данных (например, Xcalc\_1p);

Ycalc\_#скв – значения оси ординат для расчетных данных (например, Ycalc\_1p);

#скв – номер (имя) скважины, указанное пользователем при создании проекта.

Сохранение информации позволяет пользователю формировать отчет по интерпретации опытного опробования, а при необходимости переносить результаты во внешние программы и строить графики по фактическим и расчетным данным в удобном для него редакторе (например, Excel или Grapher).

Кроме перечисленных выше способов в программе предусмотрен вывод на экран и затем – сохранение последних, определенных каким-либо аналитическим или графоаналитическим способом, фильтрационных параметров. Для этого необходимо:

1) нажать меню «Инструменты > Текст» (см. 1.6.2.3): в центре экрана появится текстовое поле с надписью «Текст» или,

если меню уже вызывалось в текущей работе, с последней введенной информацией;

2) нажать клавишу Shift и левую кнопку мыши в текстовом поле: поле автоматически заполнится текстом с последними определенными фильтрационными параметрами;

3) для сохранения этой информации дважды нажать левую кнопку мыши в текстовом поле: появится диалоговое окно *«Надпись»* (рис. 1.34);

4) скопировать текст в открывшемся окне и перенесите его из буфера обмена в любой редактор.

**Внимание!** Для корректного переноса текстовой информации, которая содержит русские символы, перед копированием переключите клавиатуру на русскую раскладку (язык ввода – русский).

# 1.9. Численный блок

В программный комплекс ANSDIMAT в настоящее время интегрированы два численных кода для моделирования двухмерных осесимметричных задача фильтрации: 1) программа MODFE (Tokar, 1993) и 2) программа RADFLOW (Johnson, Cosgrove, 2001). Для работы с ними пользователю потребуются знания основ численного моделирования и желательно наличие опыта по созданию фильтрационных моделей.

Работа с численными программами состоит из следующих этапов:

1) создание сетки модели: задание количества блоков (радиусов) по оси *r* и количества блоков (слоев) по оси *z*;

2) геометрическая разбивка модели: задание длины модели, модельных радиусов и мощности модельных слоев;

3) задание фильтрационных характеристик на сетке модели;

4) задание опытной скважины;

5) задание начальных и граничных условий;

6) задание временной разбивки модели: время моделирования и временной шаг;

7) задание технических параметров модели;

8) запуск программы на выполнение;

9) просмотр полученных результатов: распределение напора или понижения уровня в моделируемой области.

Подготовка модели опытного опробования осуществляется в графическом препроцессоре. Препроцессор создан специально для представленных численных программ и имеет интуитивно понятный интерфейс. Он состоит из сетки модели, скважины (левая часть окна) и кнопок управления (нижняя часть окна). Различия при подготовке моделей программ MODFE и RADFLOW незначительны.

Ниже кратко изложен порядок действий пользователя при создании модели, выполнении расчета и просмотре выходного файла. Подробная информация о работе с численным блоком программного комплекса ANSDIMAT и назначением всех его опций описана в справочной системе программного комплекса.

Создание новой модели. Создание численной модели программ MODFE и RADFLOW осуществляется с помощью диалогового окна «Создать новую модель». Окно вызывается через главное меню программного комплекса «Модель > MODFE > Создать» для программы MODFE или «Модель > RADFLOW > Создать» – для программы RADFLOW (рис. 1.9).

Внимание! Каждая численная модель сохраняется в нескольких файлах и должна находиться в отдельном каталоге.

## Первые шаги к созданию численной модели:

1) откройте меню «Модель > ... > Создать» одной из моделирующих программ – появится диалоговое окно «Создать новую модель»;

2) в появившемся окне задайте количество блоков в радиальном направлении и количество слоев;

3) нажмите кнопку «Создать» – появится диалоговое окно сохранения файла «Создать модель»;

4) выберите каталог для сохранения новой модели (например, C:\ANSDIMAT\MODEL), если его нет, то создайте;

5) введите имя файла в соответствующем поле (например, MODEL).

6) нажмите кнопку «*Coxpaнumь*» – программа подготовит необходимые данные и присвоит файлу расширение MM для программы MODFE или RFM для программы RADFLOW;

7) откройте меню «*Модель* > ... > *Открыть*» одной из модели – появится диалоговое окно «*Открыть модель*»;

8) выберите модель (файл с расширением MM или RFM);

9) нажмите кнопку «Открыть» – откроется графический препроцессор одной из программ.

**Геометрическая разбивка модели**. Длину и мощность модели удобнее всего задавать через диалоговое окно «*Создание сетки модели*», которое вызывается кнопкой «*Изменить сетку*» (см. кнопки управления внизу препроцессора). В окне необходимо задать радиус опытной скважины (поле «*Первый радиус*») и длину модели, а затем одной из кнопок выбрать вариант радиальной сеточной разбивки (например, «*Логарифмическая сетка*»). В этом же окне задается равномерная разбивка по вертикали: мощность модельных слоев. В дальнейшем предоставляется возможность корректировки введенных данных непосредственно на сетке модели, введением требуемых значений в текстовые поля «*Блок*» и «*Мощность*».

Задание фильтрационных характеристик. Существуют отличия в задании фильтрационных свойств моделируемой области, которые определяются структурой численных программ.

Для программы MODFE задание фильтрационных параметров заключается в выделении зон неоднородности на сетке модели. Количество этих зон и их свойства определяются в диалоговом окне «Фильтрационные свойства зон неоднородности»: меню «Модель > MODFE > Зоны неоднородности».

Для RADFLOW каждый параметр задается отдельно на сетке модели и только послойно, т.е. плановую (здесь радиальную) неоднородность задать невозможно.

**Правила ввода параметров на сетке модели**. Выбор параметра для отображения или задания его на сетке модели осуществляется с помощью списка «Параметр для изменения». Процедура ввода параметров реализуется следующим образом: требуемое для ввода значение записывается в поле «Память», а затем с помощью нажатой клавиши Shift и мышки или клавиш управления курсором это значение вводится в требуемые блоки или узлы модели.

Для программы MODFE при задании зон неоднородности вместо поля «Память» появится список «Память» с именами всех заданных ранее зон неоднородности.

Задание опытной скважины. С левой стороны графического окна расположена модель опытной скважины. Скважина всегда находится в первом радиальном блоке. Пользователь определяет ее положение в разрезе: с помощью кнопки «Скважина» включает ее в требуемые слои модели. Для программы RADFLOW задание скважины этим и ограничивается, так как ее радиус равен радиусу первого блока, а расход задается один на всю скважину. Для MODFE радиус скважины и ее расход в каждом слое может быть различным.

Начальные и граничные условия. В качестве начальных условий принимается начальное распределение напора в модели. Для программы MODFE напор вводится в узлы модели и может быть различным в каждом узле. В RADFLOW различий в начальном распределении напора нет. Он задается один на всю модель и отсчитывается от подошвы модели.

Для MODFE дополнительно может задаваться граничное условие I рода в любые узлы модельной области.

Временные параметры, расчетные параметры и запуск программы на выполнение. Все эти действия осуществляются с помощью диалогового окна «Запуск...»: меню «Модель > ... > Запуск...» одной из программы.

При задании временных параметров необходимо указать длительность моделирования, начальный временной шаг и определить порядок его изменения в ходе численного расчета. К расчетным параметрам в данном случае относятся точность и метод расчета. От этих параметров во многом может зависеть сходимость численной модели и в конечном итоге достоверность выходной информации.

Нажатие кнопки «Пуск» в диалоговом окне приведет к автоматическому созданию входного файла численной программы и к началу расчета. Во время численного расчета возможна любая другая работа в программном комплексе ANSDIMAT.

Просмотр полученных результатов. После окончания численного расчета пользователь может переходить к просмотру результатов моделирования (меню «*Modenb* > ... > *Постпроцессор*» одной из программы) в табличном или графическом виде. Для просмотра результатов (распределение напора или понижения уровня во времени и пространстве) необходимо загрузить выходной файл численной программы: modfe.out для MODFE или output.rdf для RADFLOW.

# Последовательность действий при просмотре выходной информации:

1) откройте меню «*Modenb* > ... > Постпроцессор» одной из моделирующих программ – появится диалоговое окно «Постпроцессор для...»;

2) введите имя выходного файла в поле «Имя выходного файла»;

3) нажмите кнопку «Загрузить»;

4) в таблице появятся данные по напору на последний момент времени в каждом блоке (для RADFLOW) или узле (для MODFE);

5) при необходимости перейти к другому моменту времени выберите его в списке «Время»;

6) при необходимости просмотреть понижения уровня переключите опцию «Параметры»;

7) для перехода к просмотру результатов на сетке модели нажмите кнопку «*Сетка*»; здесь пользователю предлагается: просматривать результаты на любой момент времени в любой точке сеточной области, строить графики временно́го и площадного прослеживания изменения напора или понижения, просматривать изменение результатов в режиме анимации, сохранять полученную информацию.

# Глава 2

# АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ: ОТКАЧКА С ПОСТОЯННЫМ РАСХОДОМ ИЗ ОДНОЙ ОПЫТНОЙ СКВАЖИНЫ

Раздел посвящен математическому аппарату, заложенному в программный комплекс ANSDIMAT. Для каждой расчетной схемы дано подробное описание опытного опробования и приводятся базовые аналитические уравнения фильтрации (нестационарные, квазистационарные и стационарные), участвующие в определении параметров водоносных пластов тем или иным способом. Нестационарные аналитические зависимости изложены в том порядке (за редким исключением), в котором они выбираются в программном комплексе при подборе параметров (см. 1.7.1 и Приложение 3). На основе квазистационарных и стационарных решений выводятся формулы для определения параметров способом прямой линии. Все возможные графоаналитические способы обработки сведены в таблицы с указанием названия способа, графика индикаторной кривой и формул для расчета искомых параметров по положению эталонной кривой или прямой линии.

Для ряда схем (разд. 2.1–2.5) в решениях учитывается влияние прямолинейных границ фильтрационного потока в плане или разрезе. Большинство таких решений построены на принципе суперпозиции. Для наиболее простых схем использование суперпозиции при определении понижения в водоносных пластах впервые встречается в работах Г. Карслоу и Д. Егера, Ф. Форхгеймера, В. Н. Щелкачева и Б. Б. Лапука (Карслоу, Егер, 1964; Форхгеймер, 1930; Щелкачев, Лапук, 1949). Раздел разбит на главы в зависимости от расчетной гидрогеологической схемы, которая соответствует программному комплексу. Все решения в разделе относятся к одиночной или кустовой откачке с одной опытной скважиной и с постоянным расходом в ней в течение всего опробования.

## 2.1. Изолированный напорный водоносный пласт

Кровля и подошва однослойного водоносного пласта перекрыты абсолютными (полностью непроницаемыми) водоупорами. Уровень подземных вод не опускается ниже кровли пласта. Водоносный пласт имеет постоянную мощность. Опытная и наблюдательная скважины совершенны по степени вскрытия.

В разделе приводятся нестационарные, квазистационарные и стационарные аналитические решения для неограниченного, полуограниченного и ограниченного в плане водоносного пласта. По всем нестационарным решениям определяются проводимость (T) и пьезопроводность (a) водоносного пласта. Для решений Менча (2.1.2) и (2.1.3) дополнительно могут определяться коэффициент фильтрации и толщина скина опытной скважины ( $k_{skin}, m_{skin}$ ).

# 2.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса)

Схема проведения опыта (рис. 2.1 и 2.2):



Рис. 2.1. Типовая схема неограниченного напорного пласта (разрез).

– водоносный пласт – напорный, изотропный или плановоанизотропный, неограниченный в плане;

 понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;

- может учитываться емкость опытной скважины и скинэффект.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Тейса (Карслоу, Егер, 1964; Theis, 1935)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right),\tag{2.1.1}$$

где W(u) – функция влияния скважины (см. Приложение 4).

2. Решение Менча (Moench, 1997) для понижения в напорном пласте в совершенной наблюдательной скважине

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_{w}, r_{c}, r_{p}, T, a, k_{skin}, m_{skin}), \qquad (2.1.2)$$

где  $r_w, r_c, r_p$  – радиус опытной скважины, ее обсадной трубы и наблюдательной скважины, м;  $k_{skin}, m_{skin}$  – коэффициент фильтрации (в м/сут) и толщина скина (в м).

Функциональная зависимость (2.1.2) учитывает емкость и скин-эффект опытной скважины, а также емкость наблюдательной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997.

3. Решение Менча (Moench, 1997) для понижения в опытной скважине в напорном пласте:

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} f\left(t, r_w, r_c, T, a, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}\right).$$
(2.1.3)

Функциональная зависимость (2.1.3) учитывает емкость опытной скважины и скин-эффект опытной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997.

4. Решение Пападопулоса–Купера (Papadopulos, Cooper, 1967) для понижения в совершенной наблюдательной скважине:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F_L \left( \frac{r_w^2}{4at}, \frac{r}{r_w}, \frac{Tr_w^2}{ar_c^2} \right), \qquad (2.1.4)$$

$$F_{L}(u,\beta_{1},\beta_{2}) = 8 \frac{\beta_{2}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2}}{4u}\right)}{\tau^{2}} \times \left[ \int_{0}^{J} (\beta_{1}\tau) [\tau Y_{0}(\tau) - 2\beta_{2}Y_{1}(\tau)] - \right] \\ \times \frac{\left[ \int_{-Y_{0}}^{J} (\beta_{1}\tau) [\tau J_{0}(\tau) - 2\beta_{2}J_{1}(\tau)] \right]}{[\tau J_{0}(\tau) - 2\beta_{2}J_{1}(\tau)]^{2} + [\tau Y_{0}(\tau) - 2\beta_{2}Y_{1}(\tau)]^{2}} \right\} d\tau.$$

$$(2.1.5)$$

Решение (2.1.4) учитывает емкость опытной скважины.

5. Решение Пападопулоса–Купера (Papadopulos, Cooper, 1967) для понижения в опытной скважине:

$$s_w = \frac{Q}{4\pi T} F\left(\frac{r_w^2}{4at}, \frac{Tr_w^2}{ar_c^2}\right), \qquad (2.1.6)$$

$$F(u,\beta) = \frac{32\beta^2}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{1 - \exp\left[-\frac{\tau^2}{(4u)}\right]}{[\tau J_0(\tau) - 2\beta J_1(\tau)]^2 + [\tau Y_0(\tau) - 2\beta Y_1(\tau)]^2} \frac{d\tau}{\tau^3}.$$
 (2.1.7)

Решение (2.1.6) учитывает емкость опытной скважины.

6. Решение Хантуша для планово-анизотропного пласта (Hantush, 1966a; Hantush, Thomas, 1966):

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_xT_y}} W \left[ \frac{r^2 \left(T_y \cos^2 \theta + T_x \sin^2 \theta\right) S}{4T_x T_y t} \right], \qquad (2.1.8)$$

где  $T_x$ ,  $T_y$  – проводимость пласта в направлении оси абсцисс и ординат, м<sup>2</sup>/сут;  $\theta$  – угол между осью *x* и лучом, направленным от опытной до наблюдательной скважины (рис. 2.2,  $\delta$ ), град.



Рис. 2.2. Типовая схема напорного планово-анизотропного пласта. *a* – разрез; *б* – план.

В решении (2.1.8) предполагается, что ось абсцисс совпадает с направлением анизотропии (рис. 2.2, б).

В отличие от всех представленных в разделе нестационарных решений на основе уравнения (2.1.8) определяются параметры при заданном угле  $\theta$ : проводимость по осям *x* и *y* ( $T_x$ ,  $T_y$ ) и водоотдача пласта (*S*).

### Уравнение для квазистационарного периода

Решение Купера–Джейкоба (Карслоу, Егер, 1964; Jacob, 1946а; Cooper, Jacob, 1946):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r^2} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2} \,. \tag{2.1.9}$$

## Графоаналитическая обработка

Для графоаналитической обработки используется способ эталонной кривой для всего периода опробования, прямой линии для квазистационарного периода и горизонтальной прямой линии для понижений уровня в двух наблюдательных скважинах на квазистационарный период. Зависимости, приведенные в табл. 2.1, получены на основе уравнений (2.1.1) и (2.1.9).

Таблица 2.1

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$s - \lg r$	» »	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25 \cdot t)$
$s - \lg \frac{t}{r^2}$	» »	$T = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 2.1 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$\lg s - \lg r$	Эталонная кривая: $\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^{-2E}}{4t}$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2}{r_1}$

Примечание. При опробовании в планово-анизотропном пласте графоаналитические способы определяют эффективную проводимость и пьезопроводность. В этом случае  $T = \sqrt{T_x T_y}$ ,  $a = T_x / S$  (для  $\theta = 0^\circ$ ),  $a = T_y / S$  (для  $\theta = 90^\circ$ ). A – величина, которую отсекает прямая линия на оси ординат (разд. 4.1.2); C – угловой коэффициент прямой линии (см. 4.1.2); D – сдвиг графиков фактической и эталонной кривых по вертикали (см. 4.1.3); E – сдвиг графиков фактической и эталонной кривых по горизонтали (см. 4.1.3);  $s_1, s_2, r_1, r_2$  – понижение (s) и расстояние до опытной скважины (r) для первой и второй наблюдательных скважин.

## 2.1.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт

Схема проведения опыта (рис. 2.3):

 водоносный пласт – напорный, изотропный, полуограниченный в плане;

- граница – прямолинейная, бесконечная;

 понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;

 – фиктивная скважина – одна (знак фиктивного расхода и расстояние до фиктивной скважины см. на рис. П2.2).



Рис. 2.3. Типовая схема напорного полуограниченного водоносного пласта с фиктивной скважиной.

Рассматриваются два варианта граничных условий (рис. П2.1): 1) граница обеспеченного питания (условие I рода) и 2) непроницаемая граница (условие II рода).

## 2.1.2.1. Полуограниченный в плане пласт: граница І рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2}{4at} \right) - W \left( \frac{\rho^2}{4at} \right) \right], \qquad (2.1.10)$$

где *р* – горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной (П2.1), м.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{\rho}{r},$$
 (2.1.11)

где *s<sub>m</sub>* – понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м.

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.2, получены на основе уравнений (2.1.10) и (2.1.11).

Таблица 2.2

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho}{r}$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 2.2 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$s_m - \lg \frac{\rho}{r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}$

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара; W'(u) = W(u) - W(ur'),  $r' = (\rho/r)^2$ .

## 2.1.2.2. Полуограниченный в плане пласт: граница II рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2}{4at} \right) + W \left( \frac{\rho^2}{4at} \right) \right].$$
 (2.1.12)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at}{r\rho} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r\rho} \,. \tag{2.1.13}$$

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.3, получены на основе уравнений (2.1.12) и (2.1.13).

Таблица 2.3

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r\rho}{2.25}$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^{D}}, \ a = \frac{r^2 10^{E}}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 2.3 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	Эталонная кривая: lgW'(u)—lg <u>1</u>	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$s - \lg r \rho$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25 \cdot t)$
$s - \lg \frac{t}{r\rho}$	» »	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg 2.25$
$(s_1-s_2)$ —lg $t$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_2 r_2}{\rho_1 r_1}$

Примечание. W'(u) = W(u) + W(ur'),  $r' = (\rho/r)^2$ .

# 2.1.3. Ограниченный в плане водоносный пласт (пласт-полоса)

Схема проведения опыта (рис. 2.4):

– водоносный пласт – напорный, изотропный, ограниченный в плане;

 границы – две параллельные бесконечные прямолинейные границы;

 понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;



Рис. 2.4. Типовая схема напорного ограниченного водоносного пласта.

 – фиктивные скважины – ряд бесконечных скважин (знаки фиктивных расходов и расстояния до фиктивных скважин см. на рис. П2.4).

Рассматриваются три варианта граничных условий (рис. П2.3): 1) две границы обеспеченного питания (условия I рода), 2) две непроницаемые границы (условия II рода) и 3) смешанные граничные условия (условия I и II рода).

# 2.1.3.1. Пласт-полоса: границы І рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right] \right\}, \quad (2.1.14)$$

где  $\rho_i^j$  – горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от левой (*i* = 1) или правой (*i* = 2) плановой границы: определяются уравнениями (П2.3) и (П2.4), м; *n* – количество отражений от одной границы.

2. Решение на основе функции Грина (Бочевер, 1959):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \ln \frac{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_p + L_w)}{L}}{\cosh \frac{\pi y}{L} - \cos \frac{\pi (L_p - L_w)}{L}} + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \left( \cos \frac{n\pi (L_p + L_w)}{L} - \cos \frac{n\pi (L_p - L_w)}{L} \right) \times \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \exp \left( -\frac{n\pi y}{L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n\pi \sqrt{at}}{L} - \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) + \\ + \exp \left( \frac{n\pi y}{L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n\pi \sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \end{pmatrix} \right] \end{cases}, \quad (2.1.15)$$
где L – ширина пласта-полосы, м;  $L_p$  – расстояние от наблюдательной скважины до границы, м;  $L_w$  – расстояние от опытной скважины до границы, м; n – номер суммы; y – проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной скважины на линию границы (П2.2), м.

3. Второе решение на основе функции Грина, вытекающее из решения (2.5.12) для пласта с перетеканием (Hantush, Jacob, 1955а):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \begin{cases} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi L_p}{L} \sin \frac{n\pi L_w}{L} \times \\ \times \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \frac{n\pi\sqrt{at}}{L}\right) - \\ -\exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \frac{n\pi\sqrt{at}}{L}\right) \end{bmatrix} \end{cases}.$$
 (2.1.16)

Уравнения для стационарного периода

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366Q}{T} \lg r', \qquad (2.1.17)$$

$$r' = \frac{1}{r\rho_1^n} \frac{\prod_{j=1,3,5,\dots}^n \rho_1^j \rho_2^j}{\prod_{j=2,4,6,\dots}^n \rho_1^j \rho_2^j} = \frac{\rho_1^1 \rho_2^1}{r\rho_1^n} \prod_{j=2,4,6,\dots}^{n-1} \frac{\rho_1^{j+1} \rho_2^{j+1}}{\rho_1^j \rho_2^j}.$$
 (2.1.18)

2. Решение на основе функции Грина (Muskat, 1937):

$$s_m = \frac{Q}{4\pi T} \ln r' = \frac{0.183Q}{T} \lg r', \qquad (2.1.19)$$

$$r' = \frac{\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\frac{\pi (L_p + L_w)}{L}}{\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\frac{\pi (L_p - L_w)}{L}}.$$
(2.1.20)

144

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.4, получены на основе уравнений (2.1.14), (2.1.17) и (2.1.19).

Таблица 2.4

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln r'  (3)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$s_m$ — lg $r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C} (2), \ T = \frac{0.183Q}{C} (3)$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара; (2) – из решения (2.1.17); (3) – из решения (2.1.19);  $W'(u) = W(u) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{\prime j}), r_{i}^{\prime j} = (\rho_{i}^{j} / r)^{2}.$ 

## 2.1.3.2. Пласт-полоса: границы II рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_i^{j})^2}{4at}\right] \right\}.$$
 (2.1.21)

2. Решение на основе функции Грина (Бочевер, 1959):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \frac{4\pi \sqrt{at}}{L} i \operatorname{erfc}\left(\frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \\ + \ln \frac{\exp\left(2\frac{\pi y}{L}\right)}{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{1}\right]\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]} - \\ + \ln \frac{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{1}\right]\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]}{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]} - \\ + \ln \frac{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{1}\right]\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]}{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]} - \\ + \ln \frac{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{1}\right]\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]}{4\left[\cosh\frac{\pi y}{L} - \cos\pi\beta_{2}\right]} - \\ + \exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} - \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) + \\ + \exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \\ + \operatorname{exp}\left(\frac{n\pi y}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \\ + \operatorname{exp}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \\ + \operatorname{exp}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L}\right)\operatorname{erfc}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \\ + \operatorname{exp}\left(\frac{n\pi\sqrt{at}}{L} + \frac{y}{2\sqrt{at}}\right) - \\ + \operatorname{exp}\left(\frac{n\pi\sqrt{at$$

3. Второе решение на основе функции Грина получено из решения (2.5.14) для пласта с перетеканием (Hantush, Jacob, 1955a):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \frac{\sqrt{\pi}}{L} \left[ \exp\left(-\frac{y^2}{4at}\right) \sqrt{4at} - \sqrt{\pi} y \operatorname{erfc} \sqrt{\frac{y^2}{4at}} \right] + \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \cos \frac{n\pi L_p}{L} \cos \frac{n\pi L_w}{L} \times \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \exp\left(-\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \frac{n\pi \sqrt{at}}{L}\right) - \\ - \exp\left(\frac{n\pi y}{L}\right) \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \frac{n\pi \sqrt{at}}{L}\right) \right\} \right\}. \quad (2.1.23)$$

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.5, получены на основе уравнения (2.1.21).

Таблица 2.5

 1	0 5	2	
1 рафик	Способ	Зависимость	
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$	
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$	
$(s_1 - s_2)$ lg t	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{(2n+1)Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$	
Примечание. $W'(u) = W(u) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W(ur_i'^j), r_i'^j = (\rho_i^j / r)^2,$			
$r' = \left( r \prod_{j=1}  ho_1^j  ho_2^j  ight)$ .			

Графоаналитическое определение параметров

# 2.1.3.3. Пласт-полоса: границы I и II рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right) + \\ + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}\right) \end{cases} \end{cases}$$
(2.1.24)

2. Решение на основе функции Грина (Бочевер, 1959):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} \ln \left[ \frac{\cosh \frac{\pi y}{2L} - \cos \pi \beta_1}{2L} \right] \left[ \cosh \frac{\pi y}{2L} + \cos \pi \beta_2 \right] \\ \left[ \cosh \frac{\pi y}{2L} + \cos \pi \beta_1 \right] \left[ \cosh \frac{\pi y}{2L} - \cos \pi \beta_2 \right] \\ + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1 - (-1)^n}{n} (\cos n\pi \beta_1 - \cos n\pi \beta_2) \times \\ \\ \times \left[ \exp \left( -\frac{n\pi y}{2L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} - \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) + \\ \\ + \exp \left( \frac{n\pi y}{2L} \right) \operatorname{erfc} \left( \frac{n\pi \sqrt{at}}{2L} + \frac{y}{2\sqrt{at}} \right) \\ \\ \end{bmatrix} \right], \quad (2.1.25)$$

$$\Gamma \text{TRe} \quad \beta_1 = \frac{L_p + L_w}{2L}, \quad \beta_2 = \frac{L_p - L_w}{2L}.$$

# Уравнения для стационарного периода

1. Решение, полученное с использованием принципа супер-позиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366Q}{T} \lg r', \qquad (2.1.26)$$

$$r' = \frac{\rho_1^n}{r} \prod_{j=1,5,9\dots}^{n-3} \frac{\rho_1^j \rho_1^{j+1} \rho_2^{j+1} \rho_2^{j+2}}{\rho_1^{j+2} \rho_1^{j+3} \rho_2^j \rho_2^{j+3}}.$$
 (2.1.27)

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1954):

$$s_m = \frac{Q}{4\pi T} \ln r' = \frac{0.183Q}{T} \lg r', \qquad (2.1.28)$$

$$r' = \frac{\left[\cosh\frac{\pi y}{2L} - \cos\frac{\pi (L_p + L_w)}{2L}\right] \left[\cosh\frac{\pi y}{2L} + \cos\frac{\pi (L_p - L_w)}{2L}\right]}{\left[\cosh\frac{\pi y}{2L} + \cos\frac{\pi (L_p + L_w)}{2L}\right] \left[\cosh\frac{\pi y}{2L} - \cos\frac{\pi (L_p - L_w)}{2L}\right]}.$$
 (2.1.29)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.6, получены на основе уравнений (2.1.24), (2.1.26) и (2.1.28).

Таблица 2.6

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln r'  (3)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}$ , $a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$s - \lg r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}  (2), \ T = \frac{0.183Q}{C}  (3)$
$(s_1 - s_2)$ —lgt	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара; (2) – из решения (2.1.26); (3) – из решения (2.1.28);  $W'(u) = W(u) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W(ur_i'^{j}) +$ 

$$+ \sum_{j=2,4\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W(ur_{i}^{\prime j}), \ r_{i}^{\prime j} = (\rho_{i}^{j} / r)^{2}.$$

## 2.2. Точечный источник: несовершенная скважина в напорном водоносном пласте

Опытная и наблюдательная скважины несовершенны по степени вскрытия. Длина фильтра опытной скважины значительно меньше мощности опробуемого водоносного пласта.

В разделе приводятся нестационарные, квазистационарные и стационарные аналитические решения для неограниченного, полуограниченного и ограниченного в плане или разрезе изотропных водоносных пластов. Для учета профильной анизотропии водоносного пласта в уравнениях фильтрации необходимо сделать следующее: – коэффициент фильтрации *k* заменить на коэффициент фильтрации по горизонтали *k<sub>r</sub>*;

– пьезопроводность *a* заменить на вертикальную пьезопроводность  $a_z$ , где  $a_z = k_z / S_s$ ;

– расстояние до опытной скважины r заменить на приведенное расстояние  $\chi r$ ; такую же замену необходимо сделать для всех горизонтальных расстояний, характеризующих положение скважин относительно плановых границ в полуограниченных и ограниченных водоносных пластах.

Например, решение (2.2.2) для профильно-анизотропного пласта записывается как

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r d_a} \operatorname{erfc} \frac{d_a}{2\sqrt{a_z t}}, \qquad (2.2.1)$$

где  $d_a = \sqrt{(\chi r)^2 + z^2}$ ; *z* – вертикальное расстояние между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин (рис. 2.5), м;  $\chi = \sqrt{k_z/k_r}$  – коэффициент профильной анизотропии.

По нестационарным решениям определяются коэффициент фильтрации (k) и пьезопроводность (a) изотропного водоносного пласта или коэффициент фильтрации по горизонтали ( $k_r$ ), коэффициент фильтрации по вертикали ( $k_z$ ) и вертикальная пьезопроводность ( $a_z$ ) анизотропного пласта. В табл. 2.7–2.15 приводятся зависимости для определения фильтрационных параметров изотропного водоносного пласта графоаналитическими способами.



Рис. 2.5. Типовая схема точечного источника в неограниченном в плане и разрезе напорном пласте.

а – трехмерное представление; б – разрез.

# 2.2.1. Неограниченный водоносный пласт в плане и разрезе

Схема проведения опыта (рис. 2.5):

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане и разрезе;

- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi kd} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}}, \qquad (2.2.2)$$

$$d = \sqrt{r^2 + z^2} , \qquad (2.2.3)$$

где erfc *u* – дополнительный интеграл вероятностей (см. Приложение 4).

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right). \tag{2.2.4}$$

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{4\pi kd} \,. \tag{2.2.5}$$

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.7, получены на основе уравнений (2.2.2), (2.2.4) и (2.2.5).

Таблица 2.7

	_	
График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot d \cdot A}$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgerfc( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d 10^{D}}, \ a = \frac{d^2 10^{E}}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 2.7 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$s - \frac{1}{\sqrt{t}}$	Прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot d \cdot A}, \ a = \frac{(A/C)^2}{\pi}d^2$
$s - \frac{1}{d}$	» »	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot C}, \ a = \frac{(C/A)^2}{\pi \cdot t}$
$ds - \frac{d}{\sqrt{t}}$	» »	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A}, \ a = \frac{(A/C)^2}{\pi}$
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	Эталонная кривая: $\lg \operatorname{erfc}(u) - \lg \frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \right)$

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара.

## 2.2.2. Полуограниченный пласт для точечного источника

Схема проведения опыта:

– водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, полуограниченный в разрезе или плане;

граница – прямолинейная бесконечная, профильная или плановая;

- понижение определяется в любой точке водоносного пласта.

Рассматриваются два варианта граничных условий (рис. 2.6): 1) плановая граница обеспеченного питания (условие I рода) и 2) профильная или плановая непроницаемая граница (условие II рода).



Рис. 2.6. Схематичные разрезы полуограниченного пласта.

 а – плановая граница обеспеченного питания; б – плановая непроницаемая граница; в – профильная граница – кровля пласта; г – профильная граница – подошва пласта.

# 2.2.2.1. Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница I рода

Схема проведения опыта (рис. 2.7):

 общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало 2.2.2);

 граница обеспеченного питания находится в плане – слева или справа от опытной и наблюдательной скважин;

пласт не ограничен в разрезе;

 – фиктивная скважина – одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины.



Рис. 2.7. Типовая схема точечного источника в напорном водоносном пласте с плановой границей обеспеченного питания: трехмерное представление.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left( \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} - \frac{1}{\rho} \operatorname{erfc} \frac{\rho}{2\sqrt{at}} \right), \qquad (2.2.6)$$

где  $\rho$  – расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной (П2.5), м.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \frac{\left(\rho - d\right)}{d\rho}.$$
(2.2.7)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.8, получены на основе уравнений (2.2.6) и (2.2.7).

Графоаналитическое определение параметров

Способ	Зависимость
Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'$
Эталонная кривая: lgerfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d 10^D}$ , $a = \frac{d^2 10^E}{4}$
То же	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D} , \ a = \frac{10^E}{4}$
Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$
	Способ Горизонтальная прямая линия (1) Эталонная кривая: lg erfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$ То же Горизонтальная прямая линия

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара;  $r' = \frac{\rho - d}{d\rho}$ , erfc'(u) = erfc(u) -  $\frac{1}{r'}$  erfc(ur"),  $r'' = \rho/d$ .

# 2.2.2.2. Полуограниченный в плане или разрезе пласт: граница II рода

Схема проведения опыта (рис. 2.8):

 общие условия для полуограниченного водоносного пласта (см. начало 2.2.2);



Рис. 2.8. Типовая схема точечного источника в напорном водоносном пласте с профильной или с плановой непроницаемой границей: трехмерные представления.

*а* – граница – кровля водоносного пласта; *б* – граница – подошва водоносного пласта; *в* – плановая граница.

 непроницаемая граница может находиться в разрезе (кровля или подошва водоносного пласта) или в плане (слева или справа от скважин);

 пласт полуограничен в разрезе для профильного расположения границы и не ограничен в разрезе для плановой границы;

 фиктивная скважина – одна, фиктивный расход равен расходу опытной скважины.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left( \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \frac{1}{\rho} \operatorname{erfc} \frac{\rho}{2\sqrt{at}} \right), \qquad (2.2.8)$$

где  $\rho$  – расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной, отраженной от профильной границы (П2.6) или от плановой границы (П2.5), м.

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left( \frac{d+\rho}{d\rho} - \frac{2}{\sqrt{\pi at}} \right).$$
(2.2.9)

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \frac{d+\rho}{d\rho} \,. \tag{2.2.10}$$

#### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.9, получены на основе уравнений (2.2.8)–(2.2.10).

Таблица 2.9

	_	
График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgerfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d 10^D}, \ a = \frac{d^2 10^E}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 2.9 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$s - \frac{1}{\sqrt{t}}$	Прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r', \ a = \frac{4}{\pi} \left( \frac{A}{Cr'} \right)$
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	Эталонная кривая: lgerfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$

Примечание. (1) – на период стационара;  $\operatorname{erfc}'(u) = \operatorname{erfc}(u) + \frac{1}{r'}\operatorname{erfc}(ur'')$ ,  $r'' = \rho/d$ ,  $r' = \frac{\rho+d}{d\rho}$ .

## 2.2.3. Ограниченный пласт для точечного источника

Схема проведения опыта (рис. 2.9):

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, ограниченный в разрезе или в плане;

 границы – две прямолинейные параллельные бесконечные, профильные или плановые;

 понижение определяется в любой точке водоносного пласта;

 – фиктивные скважины – один ряд бесконечных скважин (знаки расходов и расстояния до фиктивных скважин см. на рис. П2.6, б, в).



Рис. 2.9. Трехмерное представление точечного источника в напорном ограниченном в разрезе пласте (*a*) и пласте-полосе (*б*).



Рис. 2.10. Схематичные разрез (*a*) и план (*б*, *в*, *г*) профильных и плановых границ. *a* – профильные непроницаемые границы; *б* – плановые границы обеспеченного питания; *в* – плановые непроницаемые границы; *г* – плановые смешанные граничные условия.

Рассматриваются четыре варианта граничных условий (рис. 2.10): 1) две профильные непроницаемые границы; 2) две плановые границы обеспеченного питания (условия I рода); 3) две профильные или плановые непроницаемые границы (условия II рода); 4) две плановые границы со смешанными граничными условиями (условия I и II рода).

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Две границы обеспеченного питания (условие І рода):

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{i}^{j}}{2\sqrt{at}} \right], \quad (2.2.11)$$

где  $\rho_i^j$  – расстояние от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от левой / верхней (*i*=1) или от правой / нижней (*i*=2) границы – определяются уравнениями (П2.7, П2.9) и (П2.8, П2.10), м.

2. Две непроницаемые границы (условие II рода):

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{i}^{j}}{2\sqrt{at}} \right]. \quad (2.2.12)$$

3. Для границ I и II рода:

$$s = \frac{Q}{4\pi k} \begin{bmatrix} \frac{1}{d} \operatorname{erfc} \frac{d}{2\sqrt{at}} + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{i}^{j}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{i}^{j}}{2\sqrt{at}} + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}} \operatorname{erfc} \frac{\rho_{i}^{j}}{2\sqrt{at}} \end{bmatrix}.$$
 (2.2.13)

### Уравнения для стационарного периода

1. Две границы обеспеченного питания (условие І рода):

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right].$$
(2.2.14)

2. Для границ I и II рода:

$$s_m = \frac{Q}{4\pi k} \left[ \frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_i^j} + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \frac{1}{\rho_i^j} \right].$$
(2.2.15)

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.10, получены на основе уравнений (2.2.11)–(2.2.15).

Таблица 2.10

#### Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'  (2)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgerfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{Q}{4\pi d10^D}, \ a = \frac{d^2 10^E}{4}$
$\lg(ds) - \lg \frac{t}{d^2}$	То же	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$(s_1-s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара (способ не работает для схемы с непроницаемыми границами). Две границы обеспеченного питания: erfc'(u) = erfc(u) +  $\sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ;  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}}$ . Две непроницаемые границы: erfc'(u) = erfc(u) +  $\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}}$ . Для границ I и II рода: erfc'(u) = erfc(u) +  $\sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j}) + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{r_{i}'^{j}} \operatorname{erfc}(ur_{i}'^{j})$ ,  $r' = \frac{1}{d} + \sum_{j=1,3,...}^{n} \sum_{i=1}^{2} \frac{(-1)^{(j+2i-1)/2}}{\rho_{i}^{j}} + \sum_{j=2,4,...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} \frac{1}{\rho_{i}^{j}}$ .

## 2.3. Линейный источник: несовершенная скважина в напорном водоносном пласте

Опытная и наблюдательная скважины несовершенны по степени вскрытия. Длина фильтра опытной скважины меньше мощности опробуемого водоносного пласта.

Здесь рассматриваются понижения, полученные при проведении ОФО, в наблюдательной скважине и в пьезометре (трубка малого диаметра, вода в которую поступает через дно). В наблюдательной скважине определяется понижение, осредненное по длине ее фильтра. Оно, как правило, должно быть меньше, чем понижение в пьезометре.

В данном разделе приводятся нестационарные, квазистационарные и стационарные аналитические решения для неограниченного, полуограниченного и ограниченного в плане или разрезе изотропного водоносного пласта. Для учета профильной анизотропии водоносного пласта необходимо сделать ряд замен в уравнениях фильтрации (см. начало раздела 2.2). Наибольший практический интерес представляют решения для линейного источника в ограниченном в разрезе водоносном пласте (см. 2.3.3.1).

По нестационарным решениям определяется коэффициент фильтрации (k) и пьезопроводность (a) изотропного водоносного пласта или коэффициент фильтрации по горизонтали  $(k_r)$ , коэффициент фильтрации по вертикали  $(k_z)$  и вертикальная пьезопроводность  $(a_z)$  анизотропного пласта. Для решений Менча (2.3.14) и (2.3.15) дополнительно могут определяться коэффициент фильтрации и толщина скина опытной скважины  $(k_{skin}, m_{skin})$ .

# 2.3.1. Неограниченный водоносный пласт в плане и разрезе

Схема проведения опыта (рис. 2.11):

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане и разрезе;

– понижение – определяется в наблюдательной скважине или пьезометре в любой точке водоносного пласта.



Рис. 2.11. Типовая схема линейного источника в неограниченном в плане и в разрезе напорном пласте.

*а* – трехмерное представление; *б* – разрез с наблюдательной скважиной; *в* – разрез с пьезометром.

### Базовые аналитические зависимости

### Уравнения нестационарной фильтрации

1. Среднее понижение в наблюдательной скважине (Hantush, 1961b)

$$s = \frac{Qr}{8\pi k l_w l_p} \begin{bmatrix} F\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{z_{w1} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p1}}{r}\right) - F\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{z_{w2} + z_{p1}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p1}}{r}\right) + \\ + F\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{z_{w2} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w2} - z_{p2}}{r}\right) - F\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{z_{w1} + z_{p2}}{r}, \frac{z_{w1} - z_{p2}}{r}\right) \end{bmatrix},$$

$$(2.3.1)$$

где  $l_p, l_w$  – длина фильтра наблюдательной и опытной скважин, м;  $M(u, \beta)$  – специальная функция (см. Приложение 4); z – вертикальное расстояние между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин (рис. 2.11), м;  $z_{w1}, z_{w2}, z_{p1}, z_{p2}$  – определяет положение опытной и наблюдательной скважин относительно кровли пласта (см. на рис. 2.16, б), м.

$$F(u,\beta_{1},\beta_{2}) = \begin{cases} \beta_{1}M(u,\beta_{1}) - \beta_{2}M(u,\beta_{2}) + \\ \left(\sqrt{1+\beta_{2}^{2}}\operatorname{erfc}\sqrt{(1+\beta_{2}^{2})u} - \\ -\sqrt{1+\beta_{1}^{2}}\operatorname{erfc}\sqrt{(1+\beta_{1}^{2})u} + \\ + \frac{\exp[-(1+\beta_{1}^{2})u] - \exp[-(1+\beta_{2}^{2})u]}{\sqrt{\pi u}} \right) \end{cases}.$$
(2.3.2)

2. Понижение в пьезометре (полное решение) (Hantush, 1961a, 1961b):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} + L_{T_{p}}}{r}\right) - M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} + L_{T_{p}}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w1} - L_{T_{p}}}{r}\right) - M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{z_{w2} - L_{T_{p}}}{r}\right) \end{bmatrix} = \\ = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z + 2L_{T_{p}}}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z - 2L_{T_{p}}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

$$(2.3.3)$$

3. Понижение в пьезометре (сокращенное решение) (Мироненко, Шестаков, 1978):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \left[ M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) \right].$$
(2.3.4)

Уравнение для стационарного периода (Гиринский, 1950; Бабушкин, 1954):

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[ \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{r} \right] =$$

$$= \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z + 0.5l_{w})}{\sqrt{(z - 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z - 0.5l_{w})}.$$
(2.3.5)

161

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.11, получены на основе уравнений (2.3.1), (2.3.3)–(2.3.5).

Таблица 2.11

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot l_w \cdot A} r'$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая (2): $\lg f - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{8\pi l_w 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара; (2) – при построении эталонной кривой по уравнению (2.3.1) для среднего понижения коэффициент фильтрации равен  $k = \frac{Qr}{8\pi l_w l_p 10^D}$ ; f – одно из функциональных выражений в квадратных

скобках уравнений (2.3.1), (2.3.3) и (2.3.4);  $r' = \ln \frac{\sqrt{(z+0.5l_w)^2 + r^2} + (z+0.5l_w)}{\sqrt{(z-0.5l_w)^2 + r^2} + (z-0.5l_w)}$ или

 $r' = \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_w + z}{r} .$ 

## 2.3.2. Полуограниченный пласт для линейного источника

Схема проведения опыта:

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, полуограниченный в разрезе или в плане;

граница – прямолинейная бесконечная, профильная или плановая;

 понижение определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта.

Рассматриваются три варианта граничных условий (рис. 2.12): 1) плановая граница обеспеченного питания (условие I рода), 2) плановая непроницаемая граница (условие II рода), 3) профильная непроницаемая граница (условие II рода).



Рис. 2.12. Схематичные разрезы полуограниченного пласта.

*а* – плановая граница обеспеченного питания; *б* – плановая непроницаемая граница. *в* – профильная граница, кровля пласта; *г* – профильная граница, подошва пласта.

Зависимости, описанные в разделе, основаны на принципе суперпозиции. Для построения уравнений фильтрации используется упрощенное решение (2.3.4) для неограниченного в плане и разрезе пласта.

# 2.3.2.1. Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница I или II рода

Схема проведения опыта (рис. 2.13):

 общие условия для линейного источника в полуограниченном водоносном пласте;

 граница обеспеченного питания или непроницаемая находится в плане – слева или справа от опытной и наблюдательной скважин;

- пласт не ограничен в разрезе и полуограничен в плане;

 – фиктивная скважина – одна (фиктивный расход см. на рис. П2.2).



Рис. 2.13. Типовая схема линейного источника в напорном полуограниченном в плане пласте.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) \pm \\ \pm M\left(\frac{\rho^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{\rho}\right) \pm M\left(\frac{\rho^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{\rho}\right) \end{bmatrix}, (2.3.6)$$

где  $\rho$  – горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины (П2.1), м; знак «+» ставится при граничном условии II рода, а «–» – при граничном условии I рода.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[ \frac{\arcsin \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \arcsin \frac{0.5l_{w} + z}{r} \pm}{\pm \arcsin \frac{0.5l_{w} - z}{\rho} \pm} \pm \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{\rho} \pm \frac{1}{\rho} \right] = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \left[ \frac{\ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z + 0.5l_{w})}{\sqrt{(z - 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z - 0.5l_{w})}}{\pm \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_{w})^{2} + \rho^{2}} + (z + 0.5l_{w})}{\sqrt{(z - 0.5l_{w})^{2} + \rho^{2}} + (z - 0.5l_{w})}} \right].$$
(2.3.7)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.12, получены на основе уравнений (2.3.6) и (2.3.7).

Таблица 2.12

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot l_w \cdot A} r'$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg M'(u, \beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{8\pi d_w 10^D}$ , $a = \frac{r^2 10^E}{4}$

Таблица 2.12 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$(s_1-s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$

$$\begin{split} \Pi & \mathbf{p} \text{ и м е ч а н и е. } (1) - \mathbf{n} \mathbf{0} \text{ понижениям на период стационара; } M'(u, \beta) = \\ &= M \bigg( u, \frac{0.5l_w + z}{r} \bigg) + M \bigg( u, \frac{0.5l_w - z}{r} \bigg) \pm M \bigg( ur'', \frac{0.5l_w + z}{\rho} \bigg) \pm M \bigg( ur'', \frac{0.5l_w - z}{\rho} \bigg), \ r'' = (\rho/r)^2, \\ &r' = \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_w)^2 + r^2} + (z + 0.5l_w)}{\sqrt{(z - 0.5l_w)^2 + r^2} + (z - 0.5l_w)} \pm \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_w)^2 + \rho^2} + (z + 0.5l_w)}{\sqrt{(z - 0.5l_w)^2 + \rho^2} + (z - 0.5l_w)}. \end{split}$$

# 2.3.2.2. Полуограниченный в разрезе водоносный пласт: граница II рода

Схема проведения опыта (рис. 2.14):

 общие условия для линейного источника в полуограниченном водоносном пласте;

 непроницаемая граница находится в разрезе (кровля или подошва водоносного пласта);

пласт полуограничен в разрезе;

 фиктивная скважина – одна, фиктивный расход равен расходу опытной скважины.



Рис. 2.14. Типовая схема линейного источника в напорном пласте с профильной непроницаемой границей.

*а* – граница – кровля пласта; б – граница – подошва пласта.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \left| \begin{array}{l} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r}\right) \\ \end{array} \right|, (2.3.8)$$

где  $B_p = L_{T_p}$  или  $B_p = L_{B_p}$  – вертикальное расстояние от открытой части пьезометра до кровли  $(L_{T_p})$  или подошвы  $(L_{B_p})$  пласта, м;  $B_w = L_{T_w}$  или  $B_w = L_{B_w}$  – вертикальное расстояние от середины фильтра опытной скважины до кровли  $(L_{T_w})$  или подошвы пласта  $(L_{B_w})$ , м.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_{m} = \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} \arcsinh \frac{0.5l_{w} - z}{r} + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + z}{r} + \\ + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} - B_{w} - B_{p}}{r} + \\ + \operatorname{arcsinh} \frac{0.5l_{w} + B_{w} + B_{p}}{r} \end{bmatrix} =$$

$$= \frac{Q}{4\pi k l_{w}} \begin{bmatrix} \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z + 0.5l_{w})}{\sqrt{(z - 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (z - 0.5l_{w})} + \\ + \ln \frac{\sqrt{(B_{w} + B_{p} + 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (B_{w} + B_{p} + 0.5l_{w})}{\sqrt{(B_{w} + B_{p} - 0.5l_{w})^{2} + r^{2}} + (B_{w} + B_{p} - 0.5l_{w})} \end{bmatrix}.$$

$$(2.3.9)$$

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.13, получены на основе уравнений (2.3.8) и (2.3.9).

Таблица 2.13

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot l_w \cdot A} r'$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{8\pi d_w 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$(s_1-s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{Q}{4\pi \cdot A} (r_1' - r_2')$

$$\begin{split} &\Pi \text{ р и м е ч а н и е. } (1) - \text{ по понижениям на период стационара; } M'(u, \beta) = \\ &= M \bigg( u, \frac{0.5l_w + z}{r} \bigg) + M \bigg( u, \frac{0.5l_w - z}{r} \bigg) + M \bigg( u, \frac{0.5l_w + B_w + B_p}{r} \bigg) + M \bigg( u, \frac{0.5l_w - B_w - B_p}{r} \bigg), \\ &r' = \ln \frac{\sqrt{(z + 0.5l_w)^2 + r^2} + (z + 0.5l_w)}{\sqrt{(z - 0.5l_w)^2 + r^2} + (z - 0.5l_w)} + \ln \frac{\sqrt{(B_w + B_p + 0.5l_w)^2 + r^2} + (B_w + B_p + 0.5l_w)}{\sqrt{(B_w + B_p - 0.5l_w)^2 + r^2} + (B_w + B_p - 0.5l_w)}. \end{split}$$

## 2.3.3. Ограниченный пласт для линейного источника

Схема проведения опыта:

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, ограниченный в разрезе или в плане;

 граница – две прямолинейные параллельные бесконечные, профильные или плановые;

 понижение определяется в любой точке водоносного пласта.



Рис. 2.15. Схематичные разрезы ограниченного пласта.

а – профильные непроницаемые границы; б – плановые границы обеспеченного питания;
 в – плановые непроницаемые границы; г – плановые смешанные граничные условия.

Рассматриваются четыре варианта граничных условий (рис. 2.15): 1) две профильные непроницаемые границы (условия II рода); 2) две плановые границы обеспеченного питания (условия I рода); 3) две плановые непроницаемые границы (условия II рода); 4) две плановые границы со смешанными граничными условиями (условия I и II рода).

## 2.3.3.1. Ограниченный в разрезе водоносный пласт

Схема проведения опыта (рис. 2.16):

- общие условия для ограниченного пласта (см. начало 2.3.3);

- границы – две профильные непроницаемые (условия II рода);

– пласт не ограничен в плане;

– фиктивные скважины – один ряд бесконечных скважин (знаки расходов см. на рис. П2.6, *a*);

 понижение определяется в наблюдательной скважине или в пьезометре в любой точке водоносного пласта.



Рис. 2.16. Типовая схема линейного источника в напорном, ограниченном в разрезе пласте.

*а* – трехмерное представление; схематичные разрезы: *б* – с пьезометром, *в* – с наблюдательной скважиной.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции (для понижения в пьзометре):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_{w}} \begin{cases} M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z}{r}\right) + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} + z_{i}^{j}}{r}\right) + \\ + M\left(\frac{r^{2}}{4at}, \frac{0.5l_{w} - z_{i}^{j}}{r}\right) \right] \end{cases}, \quad (2.3.10)$$

где  $z_i^j$  – вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной скважины или открытой части пьезометра до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от верхней (*i* = 1) или от нижней (*i* = 2) границы, в ограниченном в разрезе пласте: определяется формулами (П2.11) и (П2.12), м.

2. Решение Хантуша – для понижения в пьзометре (Hantush, 1961b):

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \\ + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{n\pi r}{m}\right) \times \\ \times \left(\sin\frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{w2}}{m}\right) \cos\frac{n\pi L_{T_p}}{m} \right] \end{cases}, (2.3.11)$$

где  $z_{w1} = (L_{Tw} + l_w/2), z_{w2} = (L_{Tw} - l_w/2)$  – вертикальные расстояния от кровли водоносного пласта до низа фильтра и верха фильтра опытной скважины, м.

3. Решение Хантуша – для среднего понижения в наблюдательной скважине (Hantush, 1961b):

$$s = \frac{Q}{4\pi km} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4at}\right) + \\ + \frac{2m^2}{\pi^2 l_w l_p} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{\frac{1}{n^2} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{n\pi r}{m}\right) \times \\ \times \left(\sin\frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{w2}}{m}\right) \times \\ \times \left(\sin\frac{n\pi z_{p1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{p2}}{m}\right) \end{bmatrix} \end{cases}.$$
(2.3.12)

4. Решение Менча – для понижения в несовершенной наблюдательной скважине или пьезометре (Moench, 1993, 1996):

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} f(t, r, m, l_w, l_p, L_{Tw}, L_{Tp}, k_r, k_z, a).$$
(2.3.13)

Для решения функциональной зависимости (2.3.13) используется алгоритм программы WTAQ2 – автор Менч, 1995.

5. Решение Менча (Moench, 1997) для понижения в несовершенной наблюдательной скважине или пьезометре:

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} f(t, r, r_w, r_c, r_p, m, l_w, l_p, L_{Tw}, L_{Tp}, k_r, k_z, a, k_{skin}, m_{skin}).$$
(2.3.14)

Функциональная зависимость (2.3.14) учитывает емкость и скин-эффект опытной скважины и емкость наблюдательной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997.

6. Решение Менча – для понижения в несовершенной опытной скважине (Moench, 1997); учитывает емкость и скин-эффект опытной скважины:

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi k_{r}m} f(t, r_{w}, r_{c}, m, l_{w}, L_{Tw}, k_{r}, k_{z}, a, k_{skin}, m_{skin}). \quad (2.3.15)$$

Функциональная зависимость (2.3.15) учитывает емкость и скин-эффект опытной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997.

В решениях (2.3.13) и (2.314) при определении понижения в пьезометре из функции исключается длина фильтра наблюдательной скважины ( $l_n$ ).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.14, получены на основе уравнения (2.3.10).

Таблица 2.14

График	Способ	Зависимость
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg M'(u, \beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{8\pi l_w 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$
Примензиие	$M'(\mu,\beta) = M\left(\mu,\frac{0.5l_w+z}{2}\right) + 1$	$M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{u}\right) +$

Примечание. $M'(u,\beta) = M\left(u,\frac{0.5l_w+z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w+z}{r}\right)$	$\frac{0.5l_w-r}{r}$	<u>z</u> )
$+\sum_{j=1}^{n}\sum_{i=1}^{2}\left[M\left(u,\frac{0.5l_{w}+z_{i}^{j}}{r}\right)+M\left(u,\frac{0.5l_{w}-z_{i}^{j}}{r}\right)\right].$		

# 2.3.3.2. Ограниченный в плане водоносный пласт (пласт-полоса)

Схема проведения опыта (рис. 2.17):

- общие условия для ограниченного пласта (см. начало 2.3.3);
- границы две параллельные плановые;
- пласт не ограничен в разрезе и ограничен в плане;

 – фиктивные скважины – один ряд бесконечных скважин (знаки расходов см. на рис. П2.4);



Рис. 2.17. Типовая схема линейного источника в напорном ограниченном в плане пласте.

 понижение определяется в пьезометре в любой точке водоносного пласта.

Рассматриваются три варианта граничных условий (рис. 2.15, *в*–*г*): 1) две границы обеспеченного питания (условие I рода); 2) две непроницаемые границы (условие II рода); 3) одна граница обеспеченного питания (условие I рода), а противоположная – непроницаемая граница (условие II рода).

#### Базовые аналитические зависимости

#### Уравнения нестационарной фильтрации

1. Две границы обеспеченного питания (условие І рода):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_w} \left\{ M_1 + M_2 + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 [M_3 + M_4] \right\}, \quad (2.3.16)$$

где 
$$M_1 = M\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{0.5l_w + z}{r}\right), M_2 = M\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{0.5l_w - z}{r}\right),$$
  
 $M_3 = M\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^j}\right), M_4 = M\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^j}\right).$ 

2. Две непроницаемые границы (условие II рода):

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_w} \left\{ M_1 + M_2 + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 \left[ M_3 + M_4 \right] \right\}.$$
 (2.3.17)

3. Для границ I и II рода:

$$s = \frac{Q}{8\pi k l_w} \begin{cases} M_1 + M_2 + \sum_{j=1,3...}^n \sum_{i=1}^2 (-1)^{(j+2i-1)/2} [M_3 + M_4] + \\ + \sum_{j=2,4...}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 [M_3 + M_4] \end{cases}$$
(2.3.18)

Решения (2.3.16)–(2.3.18) получены на основе принципа суперпозиции.

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.15, получены на основе уравнений (2.3.16)–(2.3.18).

Таблица 2.15

٦

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg M'(u,\beta) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{8\pi l_w 10^D}, \ a = \frac{r^2 10^E}{4}$

Примечание.  $r_i'^{j} = \rho_i^{j} / r$ .

Две границы обеспеченного питания (условие I рода):

$$M'(u, \beta) = M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i'^{j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^{j}}\right) + M\left(ur_i'^{j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^{j}}\right)\right].$$

Две непроницаемые границы (условие II рода):

$$M'(u, \beta) = M\left(u, \frac{0.5l_w + z}{r}\right) + M\left(u, \frac{0.5l_w - z}{r}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} \left[M\left(ur_i'^{j}, \frac{0.5l_w + z}{\rho_i^{j}}\right) + M\left(ur_i'^{j}, \frac{0.5l_w - z}{\rho_i^{j}}\right)\right]$$

Для границ I и II рода:

$$M'(u,\beta) = \begin{cases} M\left(u,\frac{0.5l_w+z}{r}\right) + M\left(u,\frac{0.5l_w-z}{r}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,\dots}^n \sum_{i=1}^2 (-1)^{(j+2i-1)/2} \left[ M\left(ur_i'^j,\frac{0.5l_w+z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i'^j,\frac{0.5l_w-z}{\rho_i^j}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 \left[ M\left(ur_i'^j,\frac{0.5l_w+z}{\rho_i^j}\right) + M\left(ur_i'^j,\frac{0.5l_w-z}{\rho_i^j}\right) \right] \end{cases}$$

## 2.4. Безнапорный водоносный пласт

В основном в разделе рассмотрены решения и способы обработки опробований для условий схемы безнапорного водоносного пласта, не имеющего плановых границ фильтрационного потока. Краткая информация о построении зависимостей для безнапорных пластов, ограниченных в плане прямолинейными границами, содержится в 2.4.2.

## 2.4.1. Неограниченный в плане водоносный пласт

В разделе приводятся нестационарные и квазистационарные аналитические решения для опытного опробования, проведенного в неограниченном в плане безнапорном водоносном пласте. Определяемые фильтрационные параметры зависят от применяемого решения. В решениях для безнапорного пласта вместо мощности водоносного пласта используется начальная обводненная мощность (m).

Схема проведения опыта (рис. 2.18):

 водоносный пласт – безнапорный, изотропный или профильно-анизотропный, неограниченный в плане; рассмотрен случай перетекания из нижележащего слоя и откачка в напорнобезнапорном пласте (рис. 2.19);





Рис. 2.18. Типовые схемы (разрезы) неограниченного анизотропного безнапорного пласта.

 а – несовершенная опытная скважина и пьезометр; б – несовершенные опытная и наблюдательная скважины; в – совершенная опытная скважина и пьезометр; г – совершенные опытная и наблюдательная скважины. – опытная скважина – может быть совершенной или несовершенной по степени вскрытия;

 наблюдение – пьезометр или наблюдательная скважина (совершенная или несовершенная по степени вскрытия);

 могут учитываться емкость и скин-эффект опытной скважины, а также емкость наблюдательной скважины;

 понижение – определяется в наблюдательной скважине (совершенной или несовершенной по степени вскрытия) или пьезометре в любой точке водоносного пласта.

### Базовые аналитические зависимости

## Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Ньюмана для среднего понижения и понижения в пьезометре для совершенной или несовершенной скважины в анизотропном пласте (Neuman, 1972–1975):

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \int_0^\infty 4\tau J_0 \left(\tau \chi \frac{r}{m}\right) \left[ u_0(\tau) + \sum_{n=1}^\infty u_n(\tau) \right] d\tau . \qquad (2.4.1)$$

В зависимости от вида и совершенства по степени вскрытия опытной и наблюдательной скважин функциональные выражения  $u_0(\tau)$  и  $u_n(\tau)$  определяются следующим образом.

Для несовершенной опытной скважины и пьезометра (Neuman, 1974) (рис. 2.18, *a*):

$$u_{0}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2})\right)\right]\cosh\left(\gamma_{0}\frac{m - L_{\tau_{p}}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2})^{2}}{\sigma}\right]\cosh\gamma_{0}} \\ \times \frac{\sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0}\frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m}\sinh\gamma_{0}} \end{cases}; \quad (2.4.2)$$

$$u_{n}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2})\right)\right]\cos\left(\gamma_{n}\frac{m - L_{Tp}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right]\cos\gamma_{n}} \\ \times \frac{\sin\left(\gamma_{n}\frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n}\frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m}\sin\gamma_{n}} \end{cases} \end{cases}.$$
 (2.4.3)

Для несовершенных опытной и наблюдательной скважин (Neuman, 1974) (рис. 2.18, б):

$$u_{0}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2})\right)\right] \left[\sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{p2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{p1}}{m}\right)\right]}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right] \cosh \gamma_{0}} \\ \times \frac{\sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sinh\left(\gamma_{0} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m} \frac{l_{p}}{m} \gamma_{0} \sinh \gamma_{0}} \end{cases} ;$$

$$u_{n}(\tau) = \begin{cases} \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} - \gamma_{n}^{2})\right)\right] \left[\sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{p1}}{m}\right)\right]}{\left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right] \cos \gamma_{n}} \\ \times \frac{\sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w2}}{m}\right) - \sin\left(\gamma_{n} \frac{m - z_{w1}}{m}\right)}{\frac{l_{w}}{m} \frac{l_{p}}{m} \gamma_{n} \sin \gamma_{n}} \end{cases}$$

$$(2.4.5)$$

Для совершенной опытной скважины и пьезометра (Neuman, 1972, 1973) (рис. 2.18, в):

$$u_{0}(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2})\right)\right]\cosh\left(\gamma_{0}\frac{m - L_{Tp}}{m}\right)}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right]\cosh\gamma_{0}}, \quad (2.4.6)$$

$$u_n(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^2 + \gamma_n^2)\right)\right]\cos\left(\gamma_n \frac{m - L_{T_p}}{m}\right)}{\left[\tau^2 - (1 + \sigma)\gamma_n^2 - \frac{\left(\tau^2 + \gamma_n^2\right)^2}{\sigma}\right]\cos\gamma_n}.$$
 (2.4.7)

Для совершенных опытной и наблюдательной скважин (Neuman, 1975) (рис. 2.18, *г*):

$$u_{0}(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2})\right)\right] \tanh \gamma_{0}}{\left[\tau^{2} + (1 + \sigma)\gamma_{0}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} - \gamma_{0}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right]\gamma_{0}},$$
 (2.4.8)

$$u_{n}(\tau) = \frac{\left[1 - \exp\left(-u(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2})\right)\right]\tan\gamma_{n}}{\left[\tau^{2} - (1 + \sigma)\gamma_{n}^{2} - \frac{\left(\tau^{2} + \gamma_{n}^{2}\right)^{2}}{\sigma}\right]\gamma_{n}}.$$
 (2.4.9)

В выражениях (2.4.1)–(2.4.9):  $u = \frac{k_z t}{Sm}$ ,  $\sigma = S/S_y$ ,  $\gamma_0$  – корень уравнения  $\sigma\gamma_0 \sinh\gamma_0 = (\tau^2 - \gamma_0^2)\cosh\gamma_0$ ,  $\gamma_0^2 < \tau^2$ ,  $\gamma_n$  – корни уравнения  $\sigma\gamma_n \sin\gamma_n = -(\tau^2 - \gamma_n^2)\cos\gamma_n$ ,  $(2n-1)\frac{\pi}{2} < \gamma_n < n\pi$ ,  $n \ge 1$ .

Для решения уравнения (2.4.1) используется алгоритм программы DELAY2 – автор Ньюман, 1997. По решению Ньюмана определяется коэффициент фильтрации по горизонтали и вертикали ( $k_r$ ,  $k_z$ ), упругая и гравитационная водоотдача (S,  $S_y$ ) безнапорного пласта.

2. Решения Болтона для понижения в совершенной скважине в изотропном пласте (Boulton, 1963). Используются два подобных решения:

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\tau} J_{0} \left( r \sqrt{\frac{\alpha S_{y}}{km}} \tau \right) \begin{cases} 1 - \frac{1}{\tau^{2} + 1} \exp\left( -\frac{\alpha t}{\tau^{2} + 1} \tau^{2} \right) - \\ -\frac{\tau^{2}}{\tau^{2} + 1} \exp\left[ -\alpha \frac{S + S_{y}}{S} t(\tau^{2} + 1) \right] \end{cases} d\tau ,$$
(2.4.10)

$$s = \frac{Q}{2\pi km} \int_{0}^{\infty} \frac{1}{\tau} \begin{cases} 1 - \exp(-\mu_{1}) \times \\ \times \left[ \cosh \mu_{2} + \frac{\alpha t \eta (1 - \tau^{2})}{2\mu_{2}} \sinh \mu_{2} \right] \end{cases} J_{0} \left( r \sqrt{\frac{\alpha (S + S_{y})}{T}} \tau \right) d\tau ,$$

(2.4.11)

$$\mu_1 = \frac{\alpha t \eta \left(1 + \tau^2\right)}{2}, \qquad (2.4.12)$$

$$\mu_2 = \frac{\alpha t \sqrt{\eta^2 (1 + \tau^2)^2 - 4\eta \tau^2}}{2}, \qquad (2.4.13)$$

$$\eta = \frac{S + S_y}{S}.$$
 (2.4.14)

Эмпирический параметр  $\alpha$  (1/сут) можно определить как

$$\alpha = \frac{3k}{S_v m}.$$
 (2.4.15)

Ньюман (Neuman, 1975, 1979) предлагает другую зависимость для  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{k_z}{S_y m} \left[ 3.063 - 0.567 \lg \left(\frac{\chi r}{m}\right)^2 \right].$$
 (2.4.16)

По решениям Болтона (2.4.10) и (2.4.11) определяются коэффициент фильтрации, упругая и гравитационная водоотдача (*k*, *S*, *S*<sub>v</sub>) безнапорного пласта.

3. Решения Болтона для понижения уровня грунтовых вод (гравитационный режим) в совершенной скважине в изотропном пласте (Boulton, 1954):

$$s = \frac{Q}{2\pi km} F_B\left(\frac{kt}{S_y m}, \frac{r}{m}\right), \qquad (2.4.17)$$

178

где

$$F_B(u,\beta) = \int_0^\infty \frac{1}{\tau} J_0(\beta\tau) [1 - \exp(-u\tau \tanh\tau)] d\tau. \qquad (2.4.18)$$

По решению Болтона (2.4.17) определяются коэффициент фильтрации (k) и гравитационная водоотдача (S<sub>y</sub>) безнапорного пласта.

4. Решение Менча (Moench, 1993, 1996) для понижения в совершенной или несовершенной наблюдательной скважине или пьезометре:

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} f(t, r, m, l_w, l_p, k_r, k_z, S, S_y).$$
(2.4.19)

Для решения функциональной зависимости (2.4.19) используется алгоритм программы WTAQ2 – автор Менч, 1995. По решению Менча (2.4.19) определяются коэффициент фильтрации по горизонтали и вертикали ( $k_r$ ,  $k_z$ ), упругая и гравитационная водоотдача (S,  $S_y$ ) безнапорного пласта.

5. Решение Менча (Moench, 1997) для понижения в совершенной или несовершенной наблюдательной скважине или пьезометре с учетом емкости опытной скважины:

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} f(t, r, r_w, r_c, r_p, m, l_w, l_p, k_r, k_z, S_s, S_y, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}).$$
(2.4.20)

Функциональная зависимость (2.4.20) учитывает емкость опытной скважины, емкость наблюдательной скважины и скинэффект опытной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997. По решению Менча (2.4.20) определяются коэффициент фильтрации по горизонтали и вертикали ( $k_r, k_z$ ), удельная водоотдача ( $S_s$ ), гравитационная водоотдача ( $S_y$ ) безнапорного пласта, а также дополнительно – коэффициент фильтрации и толщина скина опытной скважины ( $k_{skin}, m_{skin}$ ).

6. Решение Менча (Менч, 1997) для понижения в совершенной или несовершенной опытной скважине:

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi k_{r}m} f(t, r_{w}, r_{c}, m, l_{w}, k_{r}, k_{z}, S_{s}, S_{y}, k_{skin}, m_{skin}). \quad (2.4.21)$$
Функциональная зависимость (2.4.21) учитывает емкость и скин-эффект опытной скважины. Для ее решения используется алгоритм программы WTAQ3 – автор Менч, 1997. Определяемые параметры аналогичны зависимости Менча (2.4.20).

7. Упрощенное решение для совершенной скважины в изотропном пласте при гравитационном режиме фильтрации:

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} W\left(\frac{r^2}{4at}\right)}$$
. (2.4.22)

По решению (2.4.22) определяются коэффициент фильтрации (*k*) и уровнепроводность (*a*) безнапорного пласта.

8. Упрощенное решение для совершенной скважины в изотропном пласте с учетом перетекания через подошву пласта (рис. 2.19) при гравитационном режиме фильтрации:

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k}} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right), \qquad (2.4.23)$$

$$B = \sqrt{\frac{k\overline{m}m'}{k'}},\qquad(2.4.24)$$

где  $\overline{m} = m$  – начальная обводненная мощность безнапорного водоносного пласта, м;  $W(u, \beta)$  – функция влияния скважины с учетом перетекания (см. Приложение 4).

По решению (2.4.23) определяются коэффициент фильтрации (k) и уровнепроводность (a) безнапорного пласта, а также параметр перетекания (B).



Рис. 2.19. Типовые схемы безнапорного водоносного пласта с перетеканием (*a*) и напорно-безнапорного пласта (б).

9. Решение Менча–Прикета (Moench, Prickett, 1972) для напорно-безнапорного пласта (рис. 2.19, б):

$$\begin{cases} s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2 S_y}{4Tt} \right) - W \left( \frac{R^2 S_y}{4Tt} \right) \right] + H - m \quad \rightarrow \quad r < R \\ s = \frac{Q}{4\pi T} \exp \left( -\frac{R^2 \left( S_y - S \right)}{4Tt} \right) W \left( \frac{r^2 S}{4Tt} \right) \quad \rightarrow \quad r > R, \end{cases}$$
(2.4.25)

где H – начальный напор, м; m – мощность напорного пласта, м; R – горизонтальное расстояние от опытной скважины до точки, где напорный пласт становится безнапорным (рис. 2.19,  $\delta$ ). Расстояние рассчитывается из следующего уравнения:

$$\frac{Q}{4\pi T (H-m)} \exp\left(-\frac{R^2 S_y}{4Tt}\right) - \frac{\exp\left(-\frac{R^2 S}{4Tt}\right)}{W\left(\frac{R^2 S}{4Tt}\right)} = 0. \quad (2.4.26)$$

Из корня уравнения (2.4.26) на каждый момент времени t определяются зона напорного режима в водоносном пласте и зона безнапорного режима. В зависимости от этого выбирается уравнение в системе (2.4.25), в котором верхнее уравнение отвечает за понижение на такие времена, когда наблюдательная скважина находится в безнапорной зоне, а нижнее – в напорной зоне. Если начальный напор изначально ниже кровли водоносного пласта, то система (2.4.25) переходит в уравнение для гравитационного режима

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left( \frac{r^2 S_y}{4Tt} \right), \qquad (2.4.27)$$

которое является аналогом решения (2.4.22). По решению Менча–Прикета (2.4.25) определяются проводимость водоносного пласта (T), водоотдача для зоны напорного режима (S) и гравитационная водоотдача для зоны безнапорного режима ( $S_y$ ).

При расчете изменения уровня в безнапорном пласте по нестационарным зависимостям надо помнить: 1) в решениях (2.4.19) и (2.4.20) при расчете понижения в пьезометре из функции исключается длина фильтра наблюдательной скважины  $(l_p)$ ; 2) при определении понижения в наблюдательной скважине по решениям (2.4.1), (2.4.19) и (2.4.20) получают осредненное понижение по длине фильтра; 3) при определении понижения в несовершенных скважинах в решениях (2.4.19)–(2.4.21) учитывается также положение фильтра относительно начального уровня грунтовых вод ( $L_{Tw}$ ,  $L_{Tp}$ ).

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s(2m-s) = \frac{0.366Q}{k} \lg \frac{2.25at}{r^2}$$
. (2.4.28)

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.16, получены на основе уравнений (2.4.22) и (2.4.28).

Таблица 2.16

График	Способ	Зависимость
s(2m-s)—lg t	Прямая линия	$k = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
s(2m-s)—lg r	» »	$k = \frac{0.732Q}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t)$
$s(2m-s)$ —lg $\frac{t}{r^2}$	» »	$k = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg 2.25$
$\lg[s(2m-s)] - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$k = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^{D}}, \ a = \frac{r^2 \cdot 10^{E}}{4}$
$\lg[s(2m-s)] - \lg\frac{t}{r^2}$	То же	$k = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. Графоаналитическая обработка по приведенным зависимостям используется только по фактическим данным, отвечающим гравитационному режиму фильтрации.

# 2.4.2. Полуограниченные и ограниченные (пласт-полоса) в плане водоносные пласты

Схемы проведения опыта и плановые границы фильтрационного потока для безнапорных пластов аналогичны расчетным схемам для полуограниченных (см. 2.1.2) и ограниченных (см. 2.1.3) напорных водоносных пластов.

Решения получены на основе базовых решений (2.4.1), (2.4.10), (2.4.11), (2.4.17) и (2.4.19) с учетом влияния фиктивных скважин: используется принцип суперпозиции.

# 2.5. Водоносный комплекс с перетеканием

Комплекс состоит из хорошо проницаемых пластов и слабопроницаемых разделяющих слоев. Опытная скважина находится в основном хорошо проницаемом пласте. Напор в смежном (хорошо проницаемом) пласте или смежных пластах постоянен в течение всего опробования или меняется во времени. Возможен учет емкости слабопроницаемых слоев.

В программном комплексе ANSDIMAT предусмотрена обработка следующих расчетных схем, учитывающих перетекание из выше- или нижележащих слоев:

 схема с постоянным уровнем в смежном пласте (емкостью разделяющих слоев пренебрегаем), учитывается влияние плановых границ фильтрационного потока;

 схема с изменяющимся уровнем в смежном пласте (емкостью разделяющих слоев пренебрегаем);

 схема с перетеканием, учитывающая емкость разделяющего слоя (с постоянным или изменяющимся уровнем в смежном пласте);

– схема профильно-анизотропного пласта с перетеканием, учитывающая несовершенство скважин по степени вскрытия.

Во всех решениях для водоносных комплексов с перетеканием предполагается: поток в слабопроницаемых пластах вертикальный, поток в основном хорошо проницаемом пласте горизонтальный.

# 2.5.1. Перетекание из водоносного пласта с постоянным напором

В разделе приводятся нестационарные и стационарные аналитические решения для неограниченного, полуограниченного и ограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием и постоянным напором в смежном пласте. По нестационарным решениям определяются проводимость (T) и пьезопроводность (a) основного пласта, а также параметр перетекания (B). Фильтрационные параметры рассчитываются на основе данных о понижении в основном водоносном пласте.

# 2.5.1.1. Неограниченный в плане водоносный комплекс

Схема проведения опыта (рис. 2.20):

 водоносный комплекс состоит из переслаивающихся хорошо и слабопроницаемых изотропных слоев;

 основной водоносный пласт – изотропный или плановоанизотропный хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина и определяется понижение;

 смежный водоносный пласт – один или два хорошо проницаемых слоя, уровень в которых не меняется в процессе опробования;

– начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и различаться;

 – разделяющий слой – один или два слабопроницаемых слоя, через которые происходит перетекание;

- граница – водоносный комплекс не ограничен в плане;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте, емкость скважины может учитываться;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте;

– упругий режим в слабопроницаемых слоях не учитывается.







Рис. 2.20. Типовые схемы водоносного пласта с перетеканием (разрезы) – уровень в смежных пластах не меняется в процессе опробования.

а – трехслойный напорный комплекс с перетеканием через кровлю, б – то же, через подошву пласта; в – пример трехслойного напорного комплекса с различными начальными уровнями в хорошо проницаемых пластах; г – трехслойный безнапорный комплекс с перетеканием через кровлю пласта; д, е – пятислойные напорный (д) и безнапорный (е) комплексы с перетеканием через кровлю и подошву пласта. Стрелками показаны направления потока в слоях.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Хантуша–Джейкоба (Hantush, Jacob, 1955b):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right). \tag{2.5.1}$$

2. Решение для понижения в пласте с перетеканием в совершенной наблюдательной скважине (Lai, Chen-Wu Su, 1974):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F_L \left( \frac{r_w^2}{4at}, \frac{r}{r_w}, \frac{r_w}{B}, \frac{Tr_w^2}{ar_c^2} \right), \qquad (2.5.2)$$

$$F_{L}(u,\beta_{1},\beta_{2},\beta_{3}) = 8 \frac{\beta_{3}}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} 1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}{4u}\right) \right] \frac{\tau}{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}} \times \\ \frac{\left\{ J_{0}(\beta_{1}\tau) \left[ (\tau^{2} + \beta_{2}^{2}) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau Y_{1}(\tau) \right] - \right\} \\ - Y_{0}(\beta_{1}\tau) \left[ (\tau^{2} + \beta_{2}^{2}) J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau J_{1}(\tau) \right] \right\} \\ \frac{\left[ \left[ (\tau^{2} + \beta_{2}^{2}) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau Y_{1}(\tau) \right]^{2} + \right] \\ + \left[ (\tau^{2} + \beta_{2}^{2}) Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau Y_{1}(\tau) \right]^{2} \right\} d\tau.$$

$$(2.5.3)$$

Решение (2.5.2) учитывает емкость опытной скважины.

3. Решение для понижения в опытной скважине в пласте с перетеканием (Lai, Chen-Wu Su, 1974):

$$s_{w} = \frac{Q}{4\pi T} F_{Lw} \left( \frac{r_{w}^{2}}{4at}, \frac{r_{w}}{B}, \frac{Tr_{w}^{2}}{ar_{c}^{2}} \right), \qquad (2.5.4)$$

$$F_{Lw}(u,\beta_{2},\beta_{3}) = 32 \frac{\beta_{3}^{2}}{\pi^{2}} \int_{0}^{\infty} \left\{ \frac{\left[1 - \exp\left(-\frac{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}{4u}\right)\right] \frac{\tau}{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}}{\left\{\left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2}\right)J_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau J_{1}(\tau)\right]^{2} + \left[\left(\tau^{2} + \beta_{2}^{2}\right)Y_{0}(\tau) - 2\beta_{3}\tau Y_{1}(\tau)\right]^{2}\right\}} d\tau . \quad (2.5.5)$$

Решение (2.5.4) учитывает емкость опытной скважины.

4. Решение Хантуша для планово-анизотропного пласта (Hantush, 1966a; Hantush, Thomas, 1966):

$$s = \frac{Q}{4\pi\sqrt{T_xT_y}}W\left[\frac{r^2\left(T_y\cos^2\theta + T_x\sin^2\theta\right)S}{4T_xT_yt}, \frac{r}{B}\right], \quad (2.5.6)$$

где параметр перетекания для планово-анизотропного пласта равен

$$B = \sqrt{\frac{T_x m'}{k'}} . \tag{2.5.7}$$

В уравнении (2.5.6) предполагается, что ось абсцисс совпадает с направлением анизотропии (рис. 2.21, *б*).



Рис. 2.21. Типовая схема планово-анизотропного водоносного комплекса с перетеканием.

а – разрез; б – план.

В отличие от всех представленных в разделе нестационарных решений на основе уравнения (2.5.6) определяются проводимость по осям x и y ( $T_x$ ,  $T_y$ ), водоотдача основного пласта (S) и параметр перетекания (B), который рассчитывается по формуле (2.5.7).

Уравнение для стационарного периода (Jacob, 1946b):

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} K_0 \left(\frac{r}{B}\right). \tag{2.5.8}$$

# Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 2.17, получены на основе уравнений (2.5.1) и (2.5.8).

Таблица 2.17

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линии (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} K_0 \left(\frac{r}{B}\right)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая (1): $\lg W\left(u, \frac{r}{B}\right) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}$ , $a = \frac{r^2 10^E}{4}$
$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	То же	$T = \frac{Q}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{10^E}{4}$
$\lg s - \lg r$	Эталонная кривая (2): $\lg K_0(\beta) - \lg \beta$	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot 10^D} , \ B = 10^{-E}$
$(s_1 - s_2)$ —lgt	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \left[ K_0 \left( \frac{r_1}{B} \right) - K_0 \left( \frac{r_2}{B} \right) \right]$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара при заданном параметре перетекания B; (2) – по понижениям на период стационара. При использовании графоаналитических способов определения параметров для планово-анизотропного пласта в качестве проводимости получаем эффективную проводимость  $\sqrt{T_x T_y}$ , для оценки пьезопроводности см. примечание к табл. 2.1, а параметр перетекания рассчитывается по формуле (2.5.7).

### 2.5.1.2. Полуограниченные в плане водоносные комплексы

Схема проведения опыта (рис. 2.22):

 общие условия для неограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием (см. начало 2.5.1.1);

- граница и фиктивная скважина (см. 2.1.2).

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) \pm W\left(\frac{\rho^2}{4at}, \frac{\rho}{B}\right) \right], \qquad (2.5.9)$$

где знак «+» ставится при граничном условии II рода, а «-» – при граничном условии I рода.



Рис. 2.22. Типовая схема полуограниченного водоносного комплекса с перетеканием.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left[ K_0 \left( \frac{r}{B} \right) \pm K_0 \left( \frac{\rho}{B} \right) \right].$$
 (2.5.10)

## Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 2.18, получена на основе уравнения (2.5.10).

Таблица 2.18

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \left[ K_0 \left( \frac{r}{B} \right) \pm K_0 \left( \frac{\rho}{B} \right) \right]$

 $\Pi$  р и м е ч а н и е. (1) – по понижениям на период стационара при заданном параметре перетекания *B*.

### 2.5.1.3. Ограниченные в плане водоносные комплексы

Схема проведения опыта (рис. 2.23):

 общие условия для неограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием (см. начало 2.5.1.1);

- границы и фиктивные скважины (см. 2.1.3).



Рис. 2.23. Типовая схема водоносного комплекса с перетеканием, ограниченного двумя параллельными границами.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Граничные условия I рода

1. Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}, \frac{\rho_i^j}{B}\right) \right\}. (2.5.11)$$

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1955а):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\beta_n} \sin \frac{n\pi L_p}{L} \sin \frac{n\pi L_w}{L} \times \\ \left\{ \exp\left(-\frac{\pi y}{L} \beta_n\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \frac{\pi \sqrt{at}}{L} \beta_n\right) - \\ -\exp\left(\frac{\pi y}{L} \beta_n\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \frac{\pi \sqrt{at}}{L} \beta_n\right) \end{array} \right\}, \quad (2.5.12)$$
Fig. 
$$\beta_n = \sqrt{n^2 + \left(\frac{L}{\pi B}\right)^2}.$$

Граничные условия II рода

1. Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}, \frac{\rho_i^j}{B}\right) \right\}.$$
 (2.5.13)

190

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1955а):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \frac{\pi B}{2L} \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{y}{B}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \frac{\sqrt{at}}{B}\right) - \\ -\exp\left(\frac{y}{B}\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \frac{\sqrt{at}}{B}\right) \end{bmatrix} + \\ +\sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta_n} \cos\frac{n\pi L_p}{L} \cos\frac{n\pi L_w}{L} \times \\ +\sum_{n=1}^{\infty} \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta_n} \cos\frac{n\pi L_p}{L} \cos\frac{n\pi L_w}{L} \times \\ -\exp\left(-\frac{\pi y}{L}\beta_n\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} - \frac{\pi \sqrt{at}}{L}\beta_n\right) - \\ -\exp\left(\frac{\pi y}{L}\beta_n\right) \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{y^2}{4at}} + \frac{\pi \sqrt{at}}{L}\beta_n\right) \end{bmatrix} \end{bmatrix}.$$

$$(2.5.14)$$

Граничные условия I и II рода Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{B}\right) + \sum_{j=2,4,\dots}^n (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^2 W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at}, \frac{\rho_i^j}{B}\right) + \\ + \sum_{j=1,3,\dots}^n \left[ (-1)^{(j+1)/2} W\left(\frac{(\rho_1^j)^2}{4at}, \frac{\rho_1^j}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} W\left(\frac{(\rho_2^j)^2}{4at}, \frac{\rho_2^j}{B}\right) \right] \end{cases}$$

$$(2.5.15)$$

Уравнения для стационарного периода

Граничные условия I рода

1. Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 K_0 \left(\frac{\rho_i^j}{B}\right) \right\}.$$
 (2.5.16)

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1954):

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} 2\left\{\frac{1}{\beta_n} \exp\left(-\frac{\pi y}{L}\beta_n\right) \sin\frac{n\pi L_p}{L} \sin\frac{n\pi L_w}{L}\right\}.$$
 (2.5.17)

Граничные условия II рода

1. Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \left\{ K_{0} \left( \frac{r}{B} \right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} K_{0} \left( \frac{\rho_{i}^{j}}{B} \right) \right\}.$$
 (2.5.18)

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1954):

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} \frac{\pi B}{L} \exp\left(-\frac{y}{B}\right) + \\ + 2\sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{\beta_{n}} \exp\left(-\frac{\pi}{L}y\beta_{n}\right) \cos\frac{n\pi L_{p}}{L} \cos\frac{n\pi L_{w}}{L}\right] \end{cases}.$$
 (2.5.19)

Граничные условия I и II рода

1. Решение с использованием принципа суперпозиции:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \begin{cases} K_{0}\left(\frac{r}{B}\right) + \sum_{j=1,3,\dots}^{n} \left[ (-1)^{(j+1)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{1}^{j}}{B}\right) + (-1)^{(j+3)/2} K_{0}\left(\frac{\rho_{2}^{j}}{B}\right) \right] + \\ + \sum_{j=2,4,\dots}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} K_{0}\left(\frac{\rho_{i}^{j}}{B}\right) \end{cases} \end{cases}$$

(2.5.20)

2. Решение на основе функции Грина (Hantush, Jacob, 1954):

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi T} \sum_{n=1}^{\infty} 4 \begin{cases} \left(-1\right)^{n} \frac{\exp\left[-\frac{\pi y}{2L}\sqrt{\left(2n-1\right)^{2} + \left(\frac{2L}{\pi B}\right)^{2}}\right]}{\sqrt{\left(2n-1\right)^{2} + \left(\frac{2L}{\pi B}\right)^{2}}} \times \\ \times \sin\frac{\left(2n-1\right)\pi \left(L_{p}-2L\right)}{2L}\cos\frac{\left(2n-1\right)\pi \left(L_{w}-L\right)}{2L} \end{cases} \end{cases} \right\}.$$
(2.5.21)

# Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 2.19, получена на основе уравнений (2.5.16)–(2.5.21).

Таблица 2.19

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} f$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по понижениям на период стационара при заданном параметре перетекания *B*; f – выражение в уравнениях (2.5.16)–(2.5.21), стоящее после отношения  $Q/(2\pi T)$ .

# 2.5.2. Перетекание из водоносного пласта с изменяющимся напором

В разделе приводятся нестационарные аналитические решения для неограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием и изменяющимся напором в смежном пласте. По решениям определяются проводимость и пьезопроводность основного и смежного пластов, а также параметр перетекания для основного и смежного пластов:  $T_1, a_1, B_1, T_2, a_2, B_2$ . Фильтрационные параметры определяются на основе данных о понижении уровня в основном и смежном водоносных пластах.

Схема проведения опыта (рис. 2.24):

 водоносный комплекс – состоит из трех слоев (два хорошо проницаемых напорных изотропных пласта разделены слабопроницаемым слоем);



Рис. 2.24. Типовые схемы водоносного комплекса с перетеканием (разрезы) при откачке из основного пласта (уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования).

Основной пласт находится: *а* – в подошве, *б* – в кровле водоносного комплекса.

 основной водоносный пласт – хорошо проницаемый слой (пласт 1), в котором находится опытная скважина;

 смежный водоносный пласт – хорошо проницаемый слой (пласт 2), в котором отсутствует опытная скважина, уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования;

– начальные уровни в хорошо проницаемых водоносных пластах могут как совпадать, так и быть различными;

– разделяющий слой – слабопроницаемый, через который происходит перетекание;

- граница - водоносный комплекс не ограничен в плане;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, находится в одном из хорошо проницаемых пластов, емкость скважины не учитывается;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в хорошо проницаемых пластах;

– упругий режим в слабопроницаемом слое не учитывается.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации (Hantush, 1967b)

1. Понижение в основном пласте

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} (\psi_1 - \psi_2 + \psi_3 + \psi_4). \qquad (2.5.22)$$

2. Понижение в смежном пласте

$$s^{(2)} = \frac{Q}{2\pi(T_1 + T_2)} (\psi_1 - \psi_2), \qquad (2.5.23)$$

где

$$\psi_{1} = \frac{a_{1}}{a_{2}} \frac{r^{2}}{B^{*2}} \int_{0}^{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\varphi_{3} \frac{a_{2}t}{r^{2}}\right) \right] \frac{\tau}{\varphi_{1}\varphi_{3}} J_{0}(\tau) d\tau , \quad (2.5.24)$$

$$\psi_{2} = \frac{a_{1}}{a_{2}} \frac{r^{2}}{B^{*2}} \int_{0}^{\infty} \left[ 1 - \exp\left(-\varphi_{2} \frac{a_{2}t}{r^{2}}\right) \right] \frac{\tau}{\varphi_{1}\varphi_{2}} J_{0}(\tau) d\tau , \quad (2.5.25)$$

$$\psi_{3} = \frac{a_{1}}{a_{2}} \left( 1 + \frac{T_{2}}{T_{1}} \right)_{0}^{\infty} \left[ \left( \varphi_{3} - \tau^{2} \right) \exp \left( -\varphi_{3} \frac{a_{2}t}{r^{2}} \right) \right] \frac{\tau}{\varphi_{1}\varphi_{3}} J_{0}(\tau) d\tau , \qquad (2.5.26)$$

$$\psi_{4} = \frac{a_{1}}{a_{2}} \left( 1 + \frac{T_{2}}{T_{1}} \right)_{0}^{\infty} \left[ \frac{\varphi_{1}\tau^{2}}{\varphi_{3}} - (\varphi_{2} - \tau^{2}) \exp\left( -\varphi_{2} \frac{a_{2}t}{r^{2}} \right) \right] \frac{\tau}{\varphi_{1}\varphi_{2}} J_{0}(\tau) d\tau , (2.5.27)$$

$$\varphi_{1} = \sqrt{\left[\left(1 - \frac{a_{1}}{a_{2}}\right)\tau^{2} + \left(\frac{r}{B_{2}}\right)^{2} - \frac{a_{1}}{a_{2}}\left(\frac{r}{B_{1}}\right)^{2}\right]^{2} + 4\frac{a_{1}}{a_{2}}\left(\frac{r^{2}}{B_{1}B_{2}}\right)^{2}}, \quad (2.5.28)$$

$$\varphi_2 = 0.5 \left[ \left( 1 + \frac{a_1}{a_2} \right) \tau^2 + \left( \frac{r}{B_2} \right)^2 + \frac{a_1}{a_2} \left( \frac{r}{B_1} \right)^2 + \varphi_1 \right], \quad (2.5.29)$$

$$\varphi_3 = 0.5 \left[ \left( 1 + \frac{a_1}{a_2} \right) \tau^2 + \left( \frac{r}{B_2} \right)^2 + \frac{a_1}{a_2} \left( \frac{r}{B_1} \right)^2 - \varphi_1 \right]; \quad (2.5.30)$$

$$\frac{1}{B^{*2}} = \frac{1}{B_1^2} + \frac{1}{B_2^2}$$
(2.5.31)

или в другой форме

$$B^* = \sqrt{T^* \frac{m'}{k'}}, \qquad (2.5.32)$$

$$T^* = \frac{T_1 T_2}{T_1 + T_2},$$
 (2.5.33)

$$B_1 = \sqrt{T_1 \frac{m'}{k'}}, \qquad (2.5.34)$$

$$B_2 = \sqrt{T_2 \frac{m'}{k'}} \,. \tag{2.5.35}$$

### 2.5.3. Перетекание с учетом емкости разделяющего слоя

В разделе приводятся нестационарные аналитические решения для неограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием, которые учитывают емкость разделяющего слоя и изменение напора в смежном пласте. По решениям определяются фильтрационные параметры водоносного комплекса на основе данных о понижении уровня в основном пласте, смежном пласте и разделяющем слое.

Реализованы также решения для понижения в слабопроницаемом слое при незначительном перетекании (Neuman, Witherspoon, 1968): понижение в слабопроницаемом слое фиксируется, но перетеканием при определении параметров в основном пласте можно пренебречь, т.е опробуемый водоносный пласт рассматривается как напорный изолированный (см. 2.1.1).

Схема проведения опыта (рис. 2.25):

– водоносный комплекс – напорный комплекс состоит из трех слоев (двух изотропных, хорошо проницаемых, разделенных слабопроницаемым слоем); отдельно рассмотрен вариант двухслойной толщи (хорошо проницаемый пласт, в кровле или подошве которого находится полуограниченный в разрезе слабопроницаемый слой);

– основной водоносный пласт (первый) – хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;

 смежный водоносный пласт (второй) – хорошо проницаемый слой, из которого происходит перетекание в основной водоносный пласт; уровень в смежном пласте постоянный или меняется в процессе опробования;

– разделяющий слой – слабопроницаемый, который находится между двумя хорошо проницаемыми слоями и через который осуществляется перетекание; упругий режим в слабопроницаемом слое учитывается; отдельно рассмотрена схема, когда слабопроницаемый слой полуограничен в разрезе (рис. 2.26);

- граница – водоносный комплекс не ограничен в плане;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном и смежном пластах, а также в любой точке слабопроницаемого слоя.



Рис. 2.25. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием (трехслойные системы) с учетом емкости слабопроницаемого слоя.

Опытная скважина находится: *а* – в подошве, *б* – в кровле водоносного комплекса.

#### Базовые аналитические зависимости

*Уравнения нестационарной фильтрации* (Neuman, Witherspoon, 1969a, 1969b)

1. Понижение в основном пласте (пласт №1) и разделяющем слое при постоянном уровне в смежном пласте в процессе опробования.

1.1. Понижение в основном пласте:

$$s^{(1)} = \frac{Q}{2\pi T_1} \int_0^\infty \left[ 1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{T_1 t}{S_1 r^2} \lambda_1\right) \right] J_0(\omega_1) \frac{d\tau}{\tau} . \quad (2.5.36)$$

1.2. Понижение в разделяющем слое:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{\infty} \left[ \frac{1 - \beta_n + \beta_n - \exp\left(-\tau^2 \frac{T_1 t}{S_1 r^2} \lambda_1\right)}{1 - \frac{\tau^2}{n^2 \pi^2}} \right] J_0(\omega_1) \frac{d\tau}{\tau} \right\},$$
(2.5.37)

где  $\beta_n = \exp\left(-n^2 \pi^2 \frac{T_1 t}{S_1 r^2} \lambda_1\right); \ \omega_1$  в уравнениях (2.5.36) и (2.5.37)

определяется как

$$\omega_1 = \sqrt{\lambda_1 \tau^2 - (r/B_1)^2 \tau \cot \alpha \tau} ; \qquad (2.5.38)$$

 $B_1 -$ см. формулу (2.5.52);  $z_p$  – расстояние от точки наблюдения в разделяющем слое до кровли (или подошвы) основного пласта (рис. 2.25);  $\lambda_1$  – см. формулу (2.5.50).

1.3. Понижение в разделяющем слое при незначительном перетекании (Neuman, Witherspoon, 1968):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_p}{m'} \int_{0}^{u} W \left( \frac{n^2 \pi^2 r^2 a'}{4 \left( n^2 \pi^2 a' t - m'^2 \tau^2 \right) a_1} \right) \tau \exp(-\tau^2) d\tau \right],$$
(2.5.39)

где

$$u = \frac{n\pi\sqrt{a't}}{m'},\qquad(2.5.40)$$

или аппроксимация для больших моментов времени:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \left( 1 - \frac{z_p}{m'} \right) W \left( \frac{r^2}{4a_1 t} \right).$$
(2.5.41)

Для схемы с постоянным уровнем в смежном пласте фильтрационные параметры рассчитываются на основе данных о понижении уровня в основном пласте и в разделяющем слое. По уравнениям (2.5.36) и (2.5.37) определяются проводимость и водоотдача основного пласта ( $T_1$ ,  $S_1$ ), параметр перетекания ( $B_1$ ) и водоотдача разделяющего слоя (S'). По решению, пренебрегающим перетеканием (2.5.39), определяемыми параметрами являются проводимость и пьезопроводность основного пласта (T, a), а также пьезопроводность разделяющего слоя (a').

2. Понижение в основном пласте (пласт  $\mathbb{N}_{2}1$ ), смежном пласте (пласт  $\mathbb{N}_{2}2$ ) и разделяющем слое – уровень в смежном пласте меняется в процессе опробования.

2.1. Понижение в основном пласте (пласт, в котором находится опытная скважина):

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_0^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} 1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{T_1 t}{S_1 r^2} \lambda_1\right) \end{bmatrix} \times \\ \times \left[ \left(1 + \frac{M(\tau)}{F(\tau)}\right) J_0(\omega_1) + \left(1 - \frac{M(\tau)}{F(\tau)}\right) J_0(\omega_2) \right] \right\} \frac{d\tau}{\tau} . \quad (2.5.42)$$

2.2. Понижение в смежном пласте (пласт без опытной скважины):

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_0^\infty \left[ 1 - \exp\left(-\tau^2 \frac{T_1 t}{S_1 r^2} \lambda_1\right) \right] \frac{2(r/B_2)^2}{F(\tau)} \left[ J_0(\omega_1) - J_0(\omega_2) \right] \frac{d\tau}{\sin \tau} .$$
(2.5.43)

# 2.3. Понижение в разделяющем слое:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_{1}} \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \begin{cases} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi z_{p}}{m'} \times \\ & \int_{0}^{\infty} \left[ \frac{-1 + \beta_{n} - \alpha}{\beta_{n} - \exp\left(-\tau^{2} \frac{T_{1}t}{S_{1}r^{2}} \lambda_{1}\right)} \right] \times \\ & \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{-1 + \beta_{n} - \alpha}{\beta_{n} - \exp\left(-\tau^{2} \frac{T_{1}t}{S_{1}r^{2}} \lambda_{1}\right)} \\ & \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{2(r/B_{2})^{2}(-1)^{n}\tau}{1 - \tau^{2}/(n^{2}\pi^{2})} \end{bmatrix} \\ & \int_{0}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} \frac{2(r/B_{2})^{2}(-1)^{n}\tau}{F(\tau)\sin\tau} - \frac{M(\tau)}{F(\tau)} - 1 \end{bmatrix} J_{0}(\omega_{1}) - \\ & -\left(\frac{2(r/B_{2})^{2}(-1)^{n}\tau}{F(\tau)\sin\tau} - \frac{M(\tau)}{F(\tau)} + 1 \right) J_{0}(\omega_{2}) \end{bmatrix} \right\} \end{cases}$$

$$(2.5.44)$$

где

$$\omega_{1} = \sqrt{\frac{N(\tau) + F(\tau)}{2}}, \qquad (2.5.45)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{N(\tau) - F(\tau)}{2}}, \qquad (2.5.46)$$

$$F(\tau) = \sqrt{M^{2}(\tau) + \left[\frac{2(r/B_{1})(r/B_{2})\tau}{\sin \tau}\right]^{2}}, \qquad (2.5.47)$$

$$M(\tau) = (\lambda_1 - \lambda_2)\tau^2 - \left[\left(\frac{r}{B_1}\right)^2 - \left(\frac{r}{B_2}\right)^2\right]\tau \cot \alpha \tau , \quad (2.5.48)$$

$$N(\tau) = (\lambda_1 + \lambda_2)\tau^2 - \left[\left(\frac{r}{B_1}\right)^2 + \left(\frac{r}{B_2}\right)^2\right]\tau \cot \alpha \tau , \quad (2.5.49)$$

$$\lambda_1 = \frac{r^2 S_1}{B_1^2 S'}, \qquad (2.5.50)$$

$$\lambda_2 = \frac{r^2 S_2}{B_2^2 S'},\tag{2.5.51}$$

$$B_{1} = \sqrt{\frac{k_{1}m_{1}m'}{k'}}, \qquad (2.5.52)$$

$$B_2 = \sqrt{\frac{k_2 m_2 m'}{k'}} . \tag{2.5.53}$$

Если в правой части уравнения (2.5.45) или (2.5.46) выражение под корнем меньше нуля, то для  $\omega_1^2 < 0$  устанавливаем  $J_0(\omega_1) = 0$ , а для  $\omega_2^2 < 0$  – соответственно  $J_0(\omega_2) = 0$ .

Для схемы с изменяющимся уровнем в смежном пласте фильтрационные параметры рассчитываются на основе данных о понижении уровня в основном и смежном пластах и разделяющем слое. По уравнениям (2.5.42)–(2.5.44) определяются проводимость основного пласта, водоотдача основного и смежного пластов, параметр перетекания для основного и смежного пластов и водоотдача разделяющего слоя:  $T_1, S_1, B_1$ ,  $S_2, B_2, S'$ .

3. Понижение в полуограниченном по мощности слабопроницаемом слое (рис. 2.26):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau-u)}} \left(\frac{r}{4}\sqrt{\frac{k'}{k_1m_1}} + \tau \frac{z_p}{r}\sqrt{\frac{k_1m_1}{k'}}\right) \sqrt{\frac{S'_s}{S_1}}\right) d\tau,$$
(2.5.54)

где

$$u = \frac{r^2 S_1}{4T_1 t} \,. \tag{2.5.55}$$



Рис. 2.26. Типовые схемы (разрезы) водоносного комплекса с перетеканием с учетом емкости полуограниченного в разрезе слабопроницаемого слоя.

Слабопроницаемый слой: а – в кровле, б – в подошве основного пласта.

3.1. Понижение в полуограниченном по мощности слабопроницаемом слое при незначительном перетекании (Neuman, Witherspoon, 1968):

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{\sqrt{u'}}^{\infty} W\left(\frac{u\tau^2}{\tau^2 - u'}\right) \exp\left(-\tau^2\right) d\tau, \qquad (2.5.56)$$

$$u = \frac{r^2}{4a_1 t},$$
 (2.5.57)

$$u' = \frac{z_p^2}{4a't} = \frac{z_p^2 S'_s}{4k't},$$
(2.5.58)

или аппроксимация для больших моментов времени:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T_1} W \left( \frac{r^2}{4a_1 t} \right).$$
 (2.5.59)

На основе данных о понижении уровня в слабопроницаемом слое с помощью уравнения (2.5.54) определяются проводимость и водоотдача основного пласта, а также коэффициент фильтрации и удельная водоотдача слабопроницаемого слоя:  $T_1, S_1, k', S'_s$ . При незначительном перетекании (2.5.56) определяемыми параметрами являются проводимость и пьезопроводность основного пласта (T, a), а также пьезопроводность слабопроницаемого слоя (a').

# 2.5.4. Профильно-анизотропный водоносный пласт

В разделе приводятся нестационарное и стационарное аналитические решения для неограниченного в плане водоносного комплекса с перетеканием и постоянным напором в смежном пласте. В нестационарном решении учитываются профильная анизотропия основного водоносного пласта и несовершенство опытной и наблюдательной скважин. По нему для понижения в основном пласте (2.5.60) определяются фильтрационные параметры водоносного комплекса: коэффициент фильтрации по горизонтали и вертикали ( $k_r$ ,  $k_z$ ), водоотдача основного пласта (*S*), а также параметр перетекания ( $B_r$ ), определяемый уравнением (2.5.61). Схема проведения опыта (рис. 2.27):

 общие условия для водоносного комплекса с перетеканием и постоянным уровнем в смежном пласте (см. начало 2.5.1.1);

- основной водоносный пласт профильно-анизотропный;
- опытная скважина несовершенная по степени вскрытия;

 понижение определяется в любой точке основного хорошо проницаемого пласта.

При использовании решений данного раздела можно рассматривать любое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев, которые показаны на рис. 2.20.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации (Hantush, 1964):

$$s = \frac{Q}{4\pi k_r m} \begin{cases} W\left(\frac{r^2 S}{4k_r m t}, \frac{r}{B_r}\right) + \\ + \frac{2m}{\pi l_w} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{1}{n} W\left(\frac{r^2 S}{4k_r m t}, \sqrt{\left(\frac{r}{B_r}\right)^2 + \chi^2 \left(\frac{n\pi r}{m}\right)^2}\right) \times \\ \times \left(\sin\frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{w2}}{m}\right) \cos\frac{n\pi L_{Tp}}{m} \end{bmatrix} \end{cases},$$

$$(2.5.60)$$

$$B_r = \sqrt{\frac{k_r mm'}{k'}} . \tag{2.5.61}$$



Рис. 2.27. Типовая схема (разрез) профильно-анизотропного водоносного пласта с перетеканием.

202

Уравнение для стационарного периода:

$$s_{m} = \frac{Q}{2\pi k_{r}m} \left\{ K_{0}\left(\frac{r}{B_{r}}\right) + \frac{2m}{\pi l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} K_{0}\left(\sqrt{\left(\frac{r}{B_{r}}\right)^{2} + \chi^{2}\left(\frac{n\pi r}{m}\right)^{2}}\right) \times \left(\frac{1}{2\pi k_{r}m}\right) + \frac{2m}{\pi l_{w}} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \frac{1}{n} \frac{n\pi z_{w1}}{m} - \sin\frac{n\pi z_{w2}}{m} \right] \cos\frac{n\pi L_{Tp}}{m} \right] \right\}.$$

$$(2.5.62)$$

### Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 2.20, получена на основе уравнения (2.5.62) без учета анизотропии основного пласта:  $k_r = k$ ,  $B_r = B$ .

Таблица 2.20

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$k = \frac{Q}{2\pi m \cdot A} f$

П р и м е ч а н и е. (1) – по понижениям на период стационара при заданном параметре перетекания B; f – выражение в фигурных скобках уравнения (2.5.62).

# 2.6. Двухслойный водоносный комплекс

Схема проведения опыта (рис. 2.28):

 водоносный комплекс – состоит из двух изотропных пластов разной проницаемости;



Рис. 2.28. Типовая схема (разрез) двухслойного безнапорного комплекса.

- граница – водоносный комплекс не ограничен в плане;

– верхний пласт – безнапорный, слабопроницаемый;

- нижний пласт - напорный, хорошо проницаемый;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, находится в хорошо проницаемом пласте, емкость скважины не учитывается;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в хорошо проницаемом пласте;

 поток в верхнем пласте вертикальный, в нижнем – горизонтальный.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации

1. Решение Мироненко (Мироненко, Сердюков, 1968):

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \left( \ln \frac{R(t)}{r} + \frac{r}{R(t)} - 1 \right), \qquad (2.6.1)$$

$$R(t) = \sqrt{\frac{12T}{S_{y} + S}} \left\{ t + \frac{m'S_{y}^{2}}{k'(S_{y} + S)} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{(S_{y} + S)k'}{S_{y}Sm'}t\right) \right] \right\}, \quad (2.6.2)$$

где *m'* – начальная обводненная мощность безнапорного слабопроницаемого пласта, м.

Решение (2.6.1) используется для наблюдательных скважин, находящихся на расстояниях меньше условного радиуса влияния:  $r \le R(t)$ . В противном случае понижение принимается нулевым.

По данным понижения уровня в основном пласте с помощью уравнения (2.6.1) определяются: проводимость и водоотдача основного напорного пласта (T, S), гравитационная водоотдача и коэффициент фильтрации слабопроницаемого слоя ( $S_y, k'$ ).

2. Решение Кули–Кэйса (Cooley, Case, 1973). Решение дано для малых и больших моментов времени.

2.1. Для малых значений времени  $t \le 0.1 \cdot m'S' / k'$ :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H\left[\frac{r^2 S}{4Tt}, \frac{r}{4B} \sqrt{\frac{S'}{S}}\right], \qquad (2.6.3)$$

где  $H(u, \beta)$  – специальная функция (см. Приложение 4).

2.2. Для больших значений времени  $t \ge 10 \cdot m'S' / k'$ :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{\mu}^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} 1 - \exp\left(-\frac{\tau^2}{u_y}\right) \times \\ \times \left(\cosh \mu_2 + \frac{\beta^2 \eta - 4\eta_2 \tau^2}{\sqrt{16\eta_2^2 \tau^4 - \beta^2 [8\eta_2 \tau^2 - \eta\beta^2]}} \sinh \mu_2 \right) \end{bmatrix}^{\times} \right\} d\tau ,$$
  
$$\times J_0 \left( \sqrt{\frac{8\tau^2}{\eta} - \frac{\beta^2}{\eta_2}} \right) \frac{16\eta_2 \tau}{8\eta_2 \tau^2 - \eta\beta^2}$$

(2.6.4)

$$u_{y} = r^{2} \frac{S + S' + S_{y}}{4Tt}, \qquad (2.6.5)$$

$$\beta = \frac{r}{B},\tag{2.6.6}$$

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}} , \qquad (2.6.7)$$

$$\mu = \beta \sqrt{\frac{\eta}{8\eta_2}} , \qquad (2.6.8)$$

$$\mu_2 = \frac{\sqrt{16\eta_2^2 \tau^4 - \beta^2 \left[ 8\eta_2 \tau^2 - \eta\beta^2 \right]}}{4u_y \eta_2}, \qquad (2.6.9)$$

$$\eta = \frac{S + S' + S_y}{S}, \qquad (2.6.10)$$

$$\eta_2 = \frac{S_y}{S + S' + S_y} \,. \tag{2.6.11}$$

3. Упрощенное решение уравнения (2.6.4) – пренебрегаем упругой водоотдачей основного пласта ( $\eta \rightarrow \infty$ ):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_{0}^{\infty} \frac{2J_{0}(2\tau)}{\tau} \left[ 1 - \frac{\beta^{2}}{\beta^{2} + 4\tau^{2}} \exp\left(-\frac{\beta^{2}\tau^{2}}{u[\beta^{2} + 4\tau^{2}]}\right) \right] d\tau , \quad (2.6.12)$$

e 
$$u = \frac{r^2 S_y}{4Tt}$$
. (2.6.13)

где

где

По данным понижения уровня в основном пласте по уравнениям (2.6.3) и (2.6.4) определяются проводимость и водоотдача основного напорного пласта – T, S, водоотдача, гравитационная водоотдача и коэффициент фильтрации безнапорного слабопроницаемого слоя –  $S', S_y, k'$ . Для уравнения (2.6.12) определяемые параметры:  $T, S_y, k'$ .

Уравнения (2.6.3) и (2.6.4) можно записать с учетом влияния капиллярной каймы (Cooley, Case, 1973).

### 2.7. Слоистые системы

В разделе рассматриваются водоносные комплексы, состоящие из чередования хорошо и слабопроницаемых пластов. Комплексы можно подразделить в зависимости от количества пластов, фильтрационные параметры которых определяются по данным понижения уровня, – трехслойная и двухслойная система. Трехслойная система состоит из хорошо проницаемого пласта, в кровле и подошве которого находятся слабопроницаемые слои (см. 2.7.1), а двухслойная система – из хорошо проницаемого пласта, в кровле или подошве которого находится слабопроницаемый слой (см. 2.7.2). Каждая система подразделяется на несколько вариантов расчетных гидрогеологических схем, зависящих от граничных условий на кровле и подошве водоносных комплексов.

Для слоистых систем представлено два набора нестационарных решений: решения Хантуша (Hantush, 1960) и решения Менча (Moench, 1985). С учетом того что решения двух авторов значительно отличаются по возможностям, в программном комплексе данная схема разбита на две: слоистые системы (решения Хантуша) и слоистые системы (решения Менча).

Решения Хантуша относительно просты в использовании, основаны на известных гидрогеологических функциях, но имеют ограничения: применимы к определенным временным интервалам и определяют понижение только в основном хорошо проницаемом пласте. При подборе параметров промежуток между решениями на графиках временного прослеживания должен соединяться прямой линией – рекомендация автора решений (Hantush, 1960).

Решения Менча более универсальны: расчетная кривая строится на весь временной интервал, понижение рассчитывается и в слабопроницаемых слоях; в решениях могут учитываться емкость опытной скважины и скин-эффект, который определяется через коэффициент фильтрации и толщину скина опытной скважины ( $k_{skin}$ ,  $m_{skin}$ ).

Для слоистых систем предполагается:

- неограниченность фильтрационного потока в плане;

поток в слабопроницаемых слоях вертикальный, в основном пласте – горизонтальный;

- учет упругого режима в слабопроницаемых слоях;

 опытная скважина, совершенная по степени вскрытия, находится в основном хорошо проницаемом пласте;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном хорошо проницаемом пласте, а для решений Менча и в слабопроницаемых слоях.

# 2.7.1. Трехслойные системы

Схема проведения опыта (рис. 2.29):

 водоносный комплекс – состоит из изотропного, хорошо проницаемого слоя, в кровле и подошве которого находятся слабопроницаемые слои;

основной водоносный пласт – хорошо проницаемый слой,
 в котором находится опытная скважина;

– смежные водоносные пласты – хорошо проницаемые слои, которые могут находиться в кровле и подошве водоносного комплекса; смежный водоносный пласт, который находится в кровле водоносного комплекса, может быть напорным или безнапорным;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном и разделяющем пластах.

Рассматриваются три варианта:

вариант 1 – в кровле и подошве водоносного комплекса находятся хорошо проницаемые водоносные пласты, напоры в которых остаются постоянными (рис. 2.29, a,  $\delta$ );

*вариант* 2 – в кровле и подошве водоносного комплекса находятся непроницаемые слои (рис. 2.29, *д*);



Рис. 2.29. Типовые схемы (разрезы) трехслойных систем.

а, б – в кровле и подошве – водоносные пласты с постоянным уровнем (а – напорный водоносный пласт в кровле, б – безнапорный);
 в, г – в кровле – водоносный пласт с постоянным уровнем (в – напорный, г – безнапорный), в подошве – непроницаемый слой; д – в кровле и подошве – непроницаемые слои;
 е – непроницаемые слои; е – непроницаемый слой – в кровле, водоносный пласт с постоянным уровнем – в подошве.

вариант 3 – подошву водоносного комплекса подстилает непроницаемый слой, а кровлю перекрывает хорошо проницаемый водоносный пласт, напор в котором остается постоянным (рис. 2.29, e, e), или, наоборот, подошву водоносного комплекса подстилает хорошо проницаемый водоносный пласт с постоянным напором, а кровлю перекрывает непроницаемый слой (рис. 2.29, e).

### Базовые аналитические зависимости

### Уравнения нестационарной фильтрации

### Решения Хантуша (Hantush, 1960)

Решения даны для понижения в основном пласте – отдельно для малых и больших значений времени и в зависимости от варианта расчетной схемы.

1. Для малых значений времени  $t < 0.1 \frac{m'S'}{k'}$  и  $t < 0.1 \frac{m'S''}{k''}$ 

(или 
$$t < 0.1 \frac{B_1^2}{T} S'$$
 и  $t < 0.1 \frac{B_2^2}{T} S''$ ):  

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[ \frac{r^2 S}{4Tt}, \frac{r}{4} \left( \frac{1}{B_1} \sqrt{\frac{S'}{S}} + \frac{1}{B_2} \sqrt{\frac{S''}{S}} \right) \right], \qquad (2.7.1)$$

$$B_1 = \sqrt{T \frac{m'}{L'}}, \qquad (2.7.2)$$

$$B_2 = \sqrt{T \frac{m''}{k''}} \,. \tag{2.7.3}$$

Уравнение (2.7.1) применимо для всех трех вариантов.

2. Для больших значений времени:

вариант 1 (рис. 2.29, 
$$a, \delta$$
) – для  $t > 5\frac{m'S'}{k'}$  и  $t > 5\frac{m'S''}{k''}$  (или  
 $t > 5\frac{B_1^2}{T}S'$  и  $t > 5\frac{B_2^2}{T}S''$ ):  
 $s = \frac{Q}{4\pi T}W\left[\frac{r^2S}{4Tt}\left(1+\frac{S'+S''}{3S}\right), r\sqrt{\left(\frac{1}{B_1}\right)^2+\left(\frac{1}{B_2}\right)^2}\right];$  (2.7.4)

вариант 2 (рис. 2.29,  $\partial$ ) – для  $t > 10 \frac{m'S'}{k'}$  и  $t > 10 \frac{m'S''}{k''}$  (или

$$t > 10 \frac{B_1^2}{T} S' \text{ M } t > 10 \frac{B_2^2}{T} S''):$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[ \frac{r^2 S}{4Tt} \left( 1 + \frac{S' + S''}{S} \right) \right]; \qquad (2.7.5)$$

вариант 3 (рис. 2.29, в, г, е) – для  $t > 5\frac{m'S'}{k'}$  и  $t > 10\frac{m'S''}{k''}$ (или  $t > 5\frac{B_1^2}{T}S'$  и  $t > 10\frac{B_2^2}{T}S''$ ):  $s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[ \frac{r^2S}{4Tt} \left( 1 + \frac{S'' + S'/3}{S} \right), \frac{r}{B_1} \right].$ (2.7.6)

Решения Менча (Moench, 1985)

Решения даны для понижения в основном пласте и в слабопроницаемых слоях. При определении понижения в слабопроницаемых слоях учитывается глубина, на которую установлен пьезометр или фильтр наблюдательной скважины (см.  $z_p$  на рис. 2.30). Для слабопроницаемого слоя, находящегося в кровле основного пласта, это расстояние от точки наблюдения до подошвы слоя, а для слабопроницаемого слоя, находящегося в подошве основного пласта, – от точки наблюдения до кровли слоя.



Рис. 2.30. Пример типовой схемы трехслойной системы для решений Менча. Для обработки доступны все варианты расположения слоев (см. рис. 2.29).

1. Понижение в основном пласте:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_{w}, r_{c}, T, S, S', S'', B_{1}, B_{2}, k_{skin}, m_{skin}).$$
(2.7.8)

2. Понижение в верхнем слабопроницаемом слое:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_w, r_c, T, S, S', S'', B_1, B_2, z_p, m', k_{skin}, m_{skin}).$$
(2.7.9)

3. Понижение в нижнем слабопроницаемом слое:

$$s'' = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_w, r_c, T, S, S', S'', B_1, B_2, z_p, m'', k_{skin}, m_{skin}). \quad (2.7.10)$$

Для решения зависимостей (2.7.8)–(2.7.10) используется алгоритм программы DP\_LAQ – автор Менч, 1990.

Для трехслойной системы на основе данных о понижении уровня в основном пласте (2.7.1), (2.7.4)–(2.7.6), (2.7.8) или в слабопроницаемых слоях (2.7.9), (2.7.10) определяются: проводимость и водоотдача основного пласта (T, S), водоотдача слабопроницаемых слоев (S', S'') и параметры перетекания через верхний и нижний слабопроницаемые пласты ( $B_1, B_2$ ).

# 2.7.2. Двухслойные системы

Схема проведения опыта (рис. 2.31):

 водоносный комплекс – состоит из изотропного хорошо проницаемого слоя, в кровле или подошве которого находится слабопроницаемый слой;

 основной водоносный пласт – хорошо проницаемый слой, в котором находится опытная скважина;

 – смежный водоносный пласт – хорошо проницаемый слой, который может находиться в кровле или подошве водоносного комплекса; смежный водоносный пласт, находящийся в кровле водоносного комплекса, может быть напорным или безнапорным;

 понижение определяется на любом расстоянии от опытной скважины в основном и разделяющем пластах.

Рассматриваются два варианта:

*вариант* 1 – к слабопроницаемому слою примыкает водоносный пласт, напор в котором остается постоянным (рис. 2.31, *a*–*в*);

*вариант* 2 – в кровле и подошве водоносного комплекса находятся непроницаемые слои (рис. 2.31, *г*, *д*).







Рис. 2.31. Типовые схемы (разрезы) двухслойных систем.

а, б – в кровле водоносного комплекса – напорный (а) или безнапорный (б) водоносные пласты с постоянным уровнем; в – в подошве водоносного комплекса – напорный водоносный пласт с постоянным уровнем; г, д – непроницаемые кровля и подошва водоносного комплекса; слабопроницаемый слой перекрывает (г) или подстилает (д) основной водоносный пласт.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

Решения Хантуша (Hantush, 1960)

Решения даны отдельно для малых и больших значений времени и в зависимости от варианта расчетной схемы.

1. Для малых значений времени 
$$t \le 0.1 \frac{m'S'}{k'}$$
 (или  $t \le 0.1 \frac{B^2}{T} S'$ )

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H\left[\frac{r^2 S}{4Tt}, \frac{r}{4B}\sqrt{\frac{S'}{S}}\right].$$
 (2.7.11)

Уравнение (2.7.11) применимо для двух вариантов.

2. Для больших значений времени:

вариант 1 (рис. 2.31, *a*-в) – для 
$$t \ge 5 \frac{m'S'}{k'}$$
 (или  $t \ge 5 \frac{B^2}{T} S'$ )  

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[ \frac{r^2 S}{4Tt} \left( 1 + \frac{S'}{3S} \right), \frac{r}{B} \right]; \qquad (2.7.12)$$

вариант 2 (рис. 2.31, *г*, *д*) – для 
$$t \ge 10 \frac{m'S'}{k'}$$
 (или  $t \ge 10 \frac{B^2}{T} S'$ )  
$$s = \frac{Q}{4\pi T} W \left[ \frac{r^2 S}{4Tt} \left( 1 + \frac{S'}{S} \right) \right].$$
(2.7.13)

Параметр перетекания здесь определяется как  $B = \sqrt{T \frac{m'}{k'}}$ .

Для двухслойной системы, в которой слабопроницаемый слой полуограничен в разрезе (рис. 2.32), понижение в основном пласте для всех временных замеров записывается в виде



Рис. 2.32. Типовая схема (разрез) водоносного комплекса со слабопроницаемым слоем, полуограниченным в разрезе.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H \left[ \frac{r^2 S}{4Tt}, \frac{r}{4} \sqrt{\frac{k' S'_s}{TS}} \right].$$
(2.7.14)

Решения Менча (Moench, 1985)

Решения даны для понижения в основном пласте и в слабопроницаемом слое. При определении понижения в слабопроницаемом слое учитывается глубина, на которую установлен пьезометр или фильтр наблюдательной скважины (см. *z<sub>p</sub>* на рис. 2.33).

1. Понижение в основном пласте:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_{w}, r_{c}, T, S, S', B, k_{skin}, m_{skin}).$$
(2.7.15)

2. Понижение в слабопроницаемом слое:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} f(t, r, r_w, r_c, T, S, S', B, z_p, m', k_{\rm skin}, m_{\rm skin}). \quad (2.7.16)$$

Для решения зависимостей (2.7.15) и (2.7.16) используется алгоритм программы DP\_LAQ – автор Менч, 1990.

Для двухслойной системы (2.7.11)–(2.7.13), (2.7.15), (2.7.16) на основе данных о понижении уровня в основном пласте определяются проводимость и водоотдача основного пласта (T, S), водоотдача слабопроницаемого слоя (S') и параметр перетекания (B).

По уравнению (2.7.14) для полуограниченного слабопроницаемого слоя (рис. 2.33) определяются проводимость и водоотдача основного пласта (T, S), коэффициент фильтрации и удельная водоотдача слабопроницаемого слоя ( $k', S'_s$ ).



Рис. 2.33. Пример типовой схемы двухслойной системы для решений Менча. Для обработки доступны все варианты расположения слоев (см. рис. 2.31).

# 2.8. Планово-неоднородный пласт

В разделе приводятся нестационарные и квазистационарные аналитические решения для планово-неоднородного водоносного пласта. По уравнениям для понижений в основной и смежной зонах определяются проводимость и пьезопроводность основной ( $T_1$ ,  $a_1$ ) и смежной ( $T_2$ ,  $a_2$ ) зон. В табл. 2.21 даны выражения для определения фильтрационных параметров графоаналитическими способами.

Схема проведения опыта (рис. 2.34):

 водоносный пласт – напорный, изотропный, состоит из двух полуограниченных в плане зон неоднородностей с общей прямолинейной границей;

– опытная скважина – находится в основной зоне неоднородности;

 наблюдательная скважина – находится в основной или смежной зоне;

 понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.



Рис. 2.34. Типовая схема планово-неоднородного пласта с двумя зонами неоднородности.

*a* – разрез; *б* – план (наблюдательная скважина находится в основной зоне); *в* – план (наблюдательная скважина находится в смежной зоне).
Расстояние от наблюдательной скважины, расположенной в основной зоне (рис. 2.34,  $\delta$ ), до отраженной от границы (фиктивной) скважины ( $\rho$ ) определяется, как и для полуограниченного в плане пласта (П2.1), а для наблюдательной скважины в смежной зоне (рис. 2.34,  $\beta$ ) как

$$\rho = \sqrt{r^2 - 4L_w L_p} \,. \tag{2.8.1}$$

### Базовые аналитические зависимости

### Уравнения нестационарной фильтрации

В программном комплексе ANSDIMAT реализованы решения двух авторов: Максимов (1962) и Фенске (Fenske, 1984).

1. Решение Максимова: понижение в основной зоне –

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[ W\left(\frac{r^2}{4a_1 t}\right) + \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} W\left(\frac{\rho^2}{4a_1 t}\right) - \delta_1 \right], \quad (2.8.2)$$

$$\delta_{1} \approx \delta_{1\infty} \left[ \exp\left(-\frac{\rho^{2}}{4a_{1}t}\right) - \frac{\sqrt{\pi}\left(L_{w}+L_{p}\right)}{2\sqrt{a_{1}t}} \exp\left(-\frac{r^{2}-\left(L_{w}-L_{p}\right)^{2}}{4a_{1}t}\right) \operatorname{erfc}\frac{L_{w}+L_{p}}{2\sqrt{a_{1}t}} \right], \quad (2.8.3)$$

$$\delta_{1\infty} = \begin{cases} \frac{2T_1T_2}{T_1^2 - T_2^2} \begin{bmatrix} \ln \frac{a_2}{a_1} + 4T_1 \sqrt{\frac{a_1 - a_2}{T_1^2 a_2 - T_2^2 a_1}} \times \\ \times \arctan \sqrt{\frac{(\sqrt{a_1} - \sqrt{a_2})(T_1 \sqrt{a_2} - T_2 \sqrt{a_1})}{(\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2})(T_1 \sqrt{a_2} + T_2 \sqrt{a_1})}} \end{bmatrix} \rightarrow T_1 \neq T_2; \\ \frac{a_1}{a_2 - a_1} \ln \frac{a_1}{a_2} + 1 \rightarrow T_1 = T_2, \end{cases}$$

(2.8.4)

понижение в смежной зоне -

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} \left[ \frac{2T_2}{T_1 + T_2} W \left( \frac{r^2}{4a_2 t} \right) - \delta_2 \right], \qquad (2.8.5)$$

$$\delta_{2} \approx \delta_{2\infty} \begin{bmatrix} \exp\left(-\frac{r^{2}}{4a_{2}t}\right) - \\ -\frac{\sqrt{\pi}\left(L_{w}+L_{p}\right)}{2\sqrt{a_{2}t}} \exp\left(-\frac{r^{2}-\left(L_{w}+L_{p}\right)^{2}}{4a_{2}t}\right) \exp\left(-\frac{L_{w}+L_{p}}{2\sqrt{a_{2}t}}\right), \quad (2.8.6)$$
$$\delta_{2\infty} = \frac{T_{2}}{T_{1}}\delta_{1\infty} - \frac{2T_{2}}{T_{1}+T_{2}}\ln\frac{a_{1}}{a_{2}}. \quad (2.8.7)$$

2. Решение Фенске:

понижение в основной зоне -

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi T_1} \left[ W\left(\frac{r^2}{4a_1t}\right) + \frac{\varepsilon T_1 - \omega T_2}{\varepsilon T_1 + \omega T_2} W\left(\frac{\rho^2}{4a_1t}\right) \right], \qquad (2.8.8)$$

понижение в смежной зоне -

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi T_2} \frac{2\varepsilon \omega T_2}{\varepsilon T_1 + \omega T_2} W\left(\frac{r^2}{4a_2 t}\right), \qquad (2.8.9)$$

$$\omega = \frac{W\left(\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w \pm L_p)^2}{4a_1 t}\right)}{W\left(\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w \pm L_p)^2}{4a_2 t}\right)},$$
(2.8.10)
$$\varepsilon = \frac{\exp\left(-\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w \pm L_p)^2}{4a_1 t}\right)}{\exp\left(-\frac{L_w^2 + r^2 - (L_w \pm L_p)^2}{4a_2 t}\right)}$$
(2.8.11)

где

(знак «+» ставится при определении понижения в смежной зоне, а «-» – в основной зоне).

## Уравнения для квазистационарного периода

На основе уравнений (2.8.2), (2.8.5) и утверждения о том, что на большие моменты времени  $\delta_1$  и  $\delta_2$  приблизительно равны соответственно  $\delta_{1\infty}$  и  $\delta_{2\infty}$ , решение для периода квазистационарной фильтрации записывается в следующем виде (Максимов, 1962):

$$s^{(1)} = \frac{Q}{4\pi \overline{T}} \left( \ln \frac{2.25a_{1}t}{r\rho} + \frac{T_{2}}{T_{1}} \ln \frac{\rho}{r} - \frac{\overline{T}}{T_{1}} \delta_{1\infty} \right), \qquad (2.8.12)$$

$$s^{(2)} = \frac{Q}{4\pi \overline{T}} \left( \ln \frac{2.25a_2 t}{r^2} - \frac{\overline{T}}{T_2} \delta_{2\infty} \right), \qquad (2.8.13)$$

$$\overline{T} = \frac{T_1 + T_2}{2} \,. \tag{2.8.14}$$

### Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 2.21 для определения параметров способом прямой линии получены на основе уравнений (2.8.12) и (2.8.13).

Таблица 2.21

График	Зависимость
$s^{(1)}$ —lg $t$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$
$s^{(2)}$ —lg $t$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a_2 \approx \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$s^{(2)}$ —lg r	$\overline{T} = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a_2 \approx 2\frac{A}{C} - \lg(2.25 \cdot t)$
$s^{(2)}$ —lg $\frac{t}{r^2}$	$\overline{T} = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a_2 \approx \frac{A}{C} - \lg(2.25)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. Определяемая пьезопроводность смежной зоны (  $a_2$  ) завышена, так как пренебрегаем  $\delta_{2\infty}$  .

## 2.9. Откачка около реки

Схема проведения опыта (рис. 2.35 и 2.37):

 водоносный пласт – напорный или безнапорный, изотропный, полуограниченный в плане;

– граница – прямолинейная, бесконечная в плане, представляет собой речную долину (граничное условие III рода);

- опытная скважина - совершенная по степени вскрытия;



Рис. 2.35. Типовая схема (для решения Шестакова) напорного полуограниченного водоносного пласта с граничным условием III рода.

а – разрез; б – план.

 – фиктивная скважина – одна, фиктивный расход равен и противоположен по знаку расходу опытной скважины;

– понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины (до речной долины).

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Шестакова (Зеегофер, Шестаков, 1968):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2}{4at} \right) - W \left( \frac{\rho_L^2}{4at} \right) \right], \qquad (2.9.1)$$

$$\rho_L = \rho \cdot f_L \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right), \qquad (2.9.2)$$

$$\rho = \sqrt{\left(L_p + L_w + 2\Delta L\right)^2 + r^2 - \left(L_w - L_p\right)^2}; \qquad (2.9.3)$$

здесь  $\Delta L$  – дополнительное фильтрационное сопротивление русла реки, м;  $\rho$  – расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной, с учетом сопротивления русла реки, м.



Рис. 2.36. Зависимость функции  $f_L$  от отношения  $\Delta L/\rho$  .

По численным оценкам В. М. Шестакова (1973), уравнение (2.9.1) используется в расчетах с вполне приемлемой точностью (от 1 до 2 %), начиная со времени  $t \ge (5 \cdot \Delta L)^2 / a$ .

Ю. О. Зеегофер и В. М. Шестаков (1968) дают табулированные значения функции  $f_L$  в зависимости от соотношения  $\Delta L$  и  $\rho$  (табл. 2.22). График этой функции показан на рис. 2.36.

Для неравенства  $\Delta L/\rho > 2$  функция имеет аппроксимацию (Зеегофер, Шестаков, 1968)

$$f_L = 0.96 + 0.16 \frac{\Delta L}{\rho} \,.$$

Для неравенства  $\Delta L/\rho \le 2$  можно использовать следующий полином (Синдаловский, 2006):

$$f_{L} = \begin{bmatrix} 1 - 0.00259435 \frac{\Delta L}{\rho} + 0.1424847 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^{2} - \\ - 0.04896219 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^{3} + 0.0060177989 \left(\frac{\Delta L}{\rho}\right)^{4} \end{bmatrix}.$$

Таблица 2.22

Таблица значений  $f_L$  и  $\Delta L/\rho$ 

$\Delta L/ ho$	0.0	0.3	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	3.0
$f_L$	1.00	1.01	1.03	1.05	1.10	1.18	1.27	1.44

Величина дополнительного фильтрационного сопротивления русла реки рассчитывается по теоретической зависимости (Боревский и др., 1973)

$$\Delta L = \frac{\sqrt{Tm'/k'}}{\tanh\left(\frac{b}{\sqrt{Tm'/k'}}\right)},$$
(2.9.4)

где m' – мощность русла реки, м; k' – коэффициент фильтрации русла реки, м/сут.

Для решения Шестакова (2.9.1) определяемыми фильтрационными параметрами по данным понижения являются проводимость (T), пьезопроводность (a) и сопротивление русла реки ( $\Delta L$ ), рассчитываемое по формуле (2.9.4).

2. Решение Хантуша (Hantush, 1965):

$$s = m - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} \left[ W\left(\frac{r^2}{4at}\right) - W\left(\frac{\rho^2}{4at}\right) + 2J^*(u, \beta_1, \beta_2) \right]}, \quad (2.9.5)$$

$$J^{*}(u,\beta_{1},\beta_{2}) = 2\int_{1}^{\infty} \exp\left[-\beta_{1}(\tau-1) - u(\tau^{2}+\beta_{2}^{2})\right] \frac{\tau}{\tau^{2}+\beta_{2}^{2}} d\tau , \qquad (2.9.6)$$

$$u = \frac{\left(L_w + L_p\right)^2}{4at},$$
 (2.9.7)



Рис. 2.37. Типовая схема (для решения Хантуша) безнапорного полуограниченного водоносного пласта с граничным условием III рода.

а – разрез; б – план.

$$\beta_1 = \frac{L_w + L_p}{\Delta L}, \qquad (2.9.8)$$

$$\beta_2 = \frac{\sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}}{L_w + L_p}, \qquad (2.9.9)$$

$$\Delta L = \frac{k}{k'}m'. \qquad (2.9.10)$$

Решение (2.9.5) дано для гравитационного режима откачки.

Для решения Хантуша (2.9.5) определяемыми фильтрационными параметрами, по данным понижения, являются коэффициент фильтрации (k), уровнепроводность (a) и сопротивление русла реки ( $\Delta L$ ), рассчитываемое по формуле (2.9.10).

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho_L}{r}.$$
 (2.9.11)

Зависимость (2.9.11) получена из решения Шестакова (2.9.1) и применяется для схемы, изображенной на рис. 2.35.

### Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 2.23, получена на основе уравнения (2.9.11).

Таблица 2.23

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_L}{r}$

П р и м е ч а н и е. (1) – на период стационара при заданном параметре сопротивлении русла реки  $\Delta L$ , который определяется по формуле (2.9.4).

## 2.10. Наклонный водоносный пласт

В данном разделе рассматриваются напорный водоносный пласт переменной мощности и безнапорные пласты с наклонным залеганием подошвы.

Схема проведения опыта для пласта переменной мощности (рис. 2.38):

 кровля и подошва водоносного пласта перекрыты абсолютными (полностью непроницаемыми) водоупорами;

уровень подземных вод не опускается ниже кровли пласта;

 опытная и наблюдательная скважины совершенны по степени вскрытия;

— водоносный пласт имеет переменную мощность по оси x и постоянную мощность (но для каждой точки на оси абсцисс разную) по оси y;

 мощность уменьшается по экспоненциальному закону в направлении оси *x*;

- водоносный пласт - неограниченный в плане;

– понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины в сторону уменьшения мощности пласта; в сторону увеличения мощности ограничение определяется тем, что тангенс угла наклона пласта не должен превышать 0.2 (т.е. отношение изменения мощности пласта к горизонтальному расстоянию, на котором оно определяется, должно быть меньше 0.2):  $\Delta m / \Delta x < 0.2$ .



Рис. 2.38. Типовая схема неограниченного в плане напорного пласта переменной мощности (разрез).

Схема проведения опыта для наклонного пласта (рис. 2.39):

 водоносный пласт – безнапорный, изотропный, наклонный, в подошве находится водоупор или слабопроницаемый слой, через который идет перетекание в процессе опробования;

– начальная обводненная мощность водоносного пласта не меняется в пространстве;

– наклон водоупора и уровня грунтовых вод одинаковый;

решения предназначены для такого угла наклона водоупора, что тангенс угла наклона водоупора меньше 0.2;

 понижение в опытной скважине не должно быть больше половины первоначальной мощности обводненной зоны основного водоносного пласта;

 для пласта с перетеканием емкостными запасами слабопроницаемого слоя пренебрегаем;

- водоносный пласт - не ограничен в плане;

– понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение для пласта переменной мощности (Hantush, 1962a):

$$s = \frac{Q}{4\pi km_w} \exp\left(\frac{r}{a_s}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2S}{4km_wt}, \frac{r}{a_s}\right), \qquad (2.10.1)$$



Рис. 2.39. Типовые схемы неограниченного в плане безнапорного наклонного пласта без учета перетекания (*a*) и с учетом перетекания (*б*).



Рис. 2.40. Расположение опытной и наблюдательной скважин в плане.

$$a_{s} = 2 \frac{\sqrt{r^{2} - L_{p}^{\prime 2}}}{\ln(m_{w}/m_{p})},$$
 (2.10.2)

где  $a_s$  – геометрический параметр, определяющий экспоненциальное изменение мощности пласта, м;  $\theta$  – угол между осью x и линией, соединяющей опытную и наблюдательную скважины (рис. 2.40), град.; косинус угла можно выразить как

$$\cos\theta = \frac{1}{r} \sqrt{r^2 - {L'_p}^2}, \qquad (2.10.3)$$

где  $L'_p$  – расстояние от наблюдательной скважины до горизонтальной линии, на которой находится опытная скважина (рис. 2.40), м;  $m_w, m_p$  – мощность водоносного пласта в точке расположения опытной и наблюдательной скважин, м.

Уравнение (2.10.1) упрощается, если подставить в него выражения (2.10.2) и (2.10.3):

$$s = \frac{Q}{4\pi km_w} \sqrt{\frac{m_w}{m_p}} W\left(\frac{r^2 S}{4km_w t}, \frac{r}{a_s}\right).$$
(2.10.4)

2. Решение для наклонного безнапорного пласта без перетекания (Hantush, 1962b):

$$s = s - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k}} \exp\left(-\frac{r}{\gamma}\cos\theta\right) W\left(\frac{r^2}{4at}, \frac{r}{\gamma}\right), \quad (2.10.5)$$

$$\gamma \approx (1.75 \div 2) \frac{m}{\tan \theta_s}$$
, (2.10.6)

где m – начальная обводненная мощность безнапорного пласта, м;  $\theta_s$  – наклон подошвы опробуемого пласта, град.

3. Решение для наклонного безнапорного пласта с учетом перетекания (Hantush, 1964):

$$s = s - \sqrt{m^2 - \frac{Q}{2\pi k} \exp\left(-\frac{r}{\gamma} \cos\theta\right)} W\left(\frac{r^2}{4at}, r\gamma'\right), \quad (2.10.7)$$

$$\gamma' = \sqrt{\frac{1}{\gamma^2} + \frac{1}{B^2}} .$$
 (2.10.8)

Понижение для наклонных пластов зависит не только от расстояния до опытной скважины, но и от угла  $\theta$  (см. рис. 2.40), а также от расположения наблюдательных скважин относительно опытной скважины: выше или ниже нее они находятся.

В идеальных условиях для пласта переменной мощности в наблюдательной скважине, расположенной в сторону уменьшения мощности пласта (см. рис. 2.38), понижение должно быть больше, чем в скважине, расположенной на таком же расстоянии в сторону увеличения мощности. А для наклонных пластов (см. рис. 2.39) в наблюдательной скважине, находящейся выше от скважины, понижение меньше, чем в симметричной скважине, расположенной ниже.

По решению для пласта переменной мощности (2.10.4) определяемые параметры – коэффициент фильтрации и водоотдача пласта (k, S). А по решениям (2.10.5) и (2.10.7) для наклонного пласта – коэффициент фильтрации и уровнепроводность безнапорного пласта (k, a). При учете перетекания (2.10.7) дополнительно определяется параметр перетекания (B).

### 2.11. Трещиновато-пористая среда

В разделе рассматриваются решения для опытных опробований, проведенных в различных видах трещиновато-пористых сред (решения Менча), а также в водоносных пластах, где опытная скважина пересекает одиночную вертикальную или горизонтальную трещину конечных размеров.

Приведенные здесь решения достаточно сложны для использования на практике, так как зависят от многих параметров. В программном комплексе ANSDIMAT для данных решений не представлены графоаналитические способы обработки.

### 2.11.1. Решения Менча

Опытные опробования, проведенные в трещиновато-пористых средах, описываются с помощью решений Менча (Moench, 1984). Решения представлены: 1) для слоистой системы трещин и блоков (рис. 2.41, *a*), 2) для блоков сферической формы (рис. 2.41,  $\delta$ ) и 3) для ортогональной системы трещин – модель Warren-Root (Warren, Root, 1963) (рис. 2.41,  $\delta$ ).



Рис. 2.41. Схемы трещиновато-пористых сред.

*а* – слоистая система трещин и блоков, *б* – блоки сферической формы, *в* – ортогональная система трещин (модель Warren–Root); *г* – схема трещины и блока со скином трещины.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Понижение в трещине (*s*) и блоке (*s'*) для слоистой системы трещин и блоков (рис. 2.41, *a*) и для блоков сферической формы (рис. 2.41, *б*, *г*):

$$s = \frac{Q}{4\pi km} f(t, r, r_w, r_c, k, k', S_s, S'_s, m_b, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}, k_{\rm skin}^f, m_{\rm skin}^f), \qquad (2.11.1)$$

$$s' = \frac{Q}{4\pi km} f(t, r, r_w, r_c, k, k', S_s, S'_s, m_b, z_p, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}, k_{\rm skin}^f, m_{\rm skin}^f), \quad (2.11.2)$$

где  $z_p$  – расстояние от центра блока до трещины, точка, где определяется изменение уровня в блоке, м.

2. Понижение в пласте с ортогональной системой трещин (рис. 2.41, в):

$$s = \frac{Q}{4\pi km} f(t, r, r_w, r_c, k, k', S_s, S'_s, m_b, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}). \quad (2.11.3)$$

Для решения функциональных зависимостей (2.11.1)– (2.11.3) используется алгоритм программы DP\_LAQ – автор Менч, 1990. Ниже приведены значения фильтрационных параметров для приведенных решений:

*m*<sub>b</sub> – размер блока, м;

*m*<sub>f</sub> – раскрытие трещины, м;

*k*<sup>*f*</sup><sub>skin</sub> – коэффициент фильтрации скина трещины, м;

*m*<sup>*f*</sup><sub>skin</sub> – толщина скина трещины, м;

 $k = k_f \frac{V_f}{V}$  – коэффициент фильтрации трещиноватой системы, м/сут;

 $k' = k_b \frac{V_b}{V}$  – коэффициент фильтрации блоковой системы, м/сут;

- k<sub>f</sub> коэффициент фильтрации средней по характеристикам трещины, м/сут;
- *k<sub>b</sub>* коэффициент фильтрации среднего по характеристикам блока, м/сут;

$$S_{s} = S_{sf} \frac{V_{f}}{V}$$
 – удельная водоотдача трещиноватой системы, 1/м;

 $S'_{s} = S_{sb} \frac{V_{b}}{V}$  – удельная водоотдача блоковой системы, 1/м;

- *S<sub>sf</sub>* удельная водоотдача средней по характеристикам трещины, 1/м;
- $S_{sb}$  удельная водоотдача среднего по характеристикам блока, 1/м;  $V_{t}$  – объем трещиноватой системы, м<sup>3</sup>;
- $V_{b}$  объем блоковой системы, м<sup>3</sup>;

V – общий объем, м<sup>3</sup>.

При использовании решений Менча определяются коэффициент фильтрации и удельная водоотдача трещиноватой  $(k, S_s)$  и блоковой  $(k', S'_s)$  систем. В решениях могут учитываться емкость опытной скважины и скин-эффект, который определяется через коэффициент фильтрации и толщину скина опытной скважины  $(k_{skin}, m_{skin})$ , а для решений (2.11.1) и (2.11.2) – коэффициент фильтрации и толщины  $(k_{skin}^f, m_{skin}^f)$ . Для всех решений необходимо дополнительно задать размер блока  $(m_b)$ : для слоистой системы трещин – это толщина блока, для сферических блоков – радиус, для ортогональной системы трещин – длина стороны кубического блока.

## 2.11.2. Скважина в вертикальной трещине

Схема проведения опыта (рис. 2.42):

 водоносный пласт – напорный, изотропный, неограниченный в плане;

 трещина ограниченной длины и высотой, равной мощности водоносного пласта;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, расположена в середине трещины;

 наблюдательная скважина – совершенная по степени вскрытия;

 поток к трещине – псевдорадиальный (рис. 2.43, *a*) или линейный (рис. 2.43, *б*);

- емкость трещины не учитывается;

– понижение определяется на любом расстояние от опытной скважины.



Рис. 2.42. Типовая схема для скважины в вертикальной трещине, ограниченной длины.

а – разрез; б – трехмерное представление; в – план.



Рис. 2.43. Схемы (план) псевдорадиального (*a*) и линейного (б) потока к вертикальной трещине.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Псевдорадиальный поток к трещине (Gringarten at el., 1974):

$$s = \frac{Q}{8\sqrt{\pi}T} \int_{0}^{u} \exp\left(\frac{-L_{p}^{2}/L_{f}^{2}}{\tau}\right) \left(\operatorname{erf}\frac{1-\beta}{2\sqrt{\tau}} + \operatorname{erf}\frac{1+\beta}{2\sqrt{\tau}}\right) \frac{d\tau}{\sqrt{\tau}}, \qquad (2.11.4)$$

$$u = \frac{4at}{L_f^2},$$
 (2.11.5)

$$\beta = 2 \frac{\sqrt{r^2 - L_p^2}}{L_f},$$
 (2.11.6)

где  $L_f$  – длина трещины, м;  $L_p$  – горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до трещины (рис. 2.42, *в*), м.

2. Линейный (параллельный) поток к трещине (Jenkins, Prentice, 1982):

$$s = \frac{Q}{2L_f T} \left\{ \sqrt{\frac{4at}{\pi}} \exp\left[-\frac{L_p^2}{4at}\right] + r \sin\theta \left[ \operatorname{erf} \sqrt{\frac{L_p^2}{4at}} - 1 \right] \right\}.$$
 (2.11.7)

Зависимость для линейного потока (2.11.7) рекомендуется использовать при откачке, когда опытная скважина находится в трещине большой длины, или для начальных моментов времени.

По решениям (2.11.4) и (2.11.7) определяются проводимость (T) и пьезопроводность (a) напорного водоносного пласта. До-полнительно необходимо задать длину трещины ( $L_{a}$ ).

## 2.11.3. Скважина в горизонтальной трещине

Схема проведения опыта (рис. 2.44):

 водоносный пласт – напорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане;



Рис. 2.44. Типовая схема для скважины в вертикальной ограниченной трещине. *a* – разрез; *б* – трехмерное представление.

трещина – ограниченного радиуса, параллельна подошве пласта;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, находится в центре трещины;

- понижение определяется в любой точке водоносного пласта;

- может учитываться раскрытие трещины.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации (Gringarten, Ramey, 1974)

1. Понижение в водоносном пласте с учетом раскрытия трещины:

$$s = \frac{Q}{2\pi k_{r}m} \int_{0}^{u} \left\{ \times \left[ \frac{1 + \frac{4m}{\tau} \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \int_{0}^{1} I_{0} \left( \frac{r/L_{f}}{\tau} \tau' \right) \exp\left( -\frac{\tau'^{2}}{4\tau} \right) \tau' d\tau' \right] \times \right] \right\} \frac{d\tau}{\tau} \\ \times \left[ \times \left[ \frac{1 + \frac{4m}{\pi m_{f}} \times \pi}{\pi m_{f}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \exp\left[ -\tau \left( \frac{n\pi L_{f}}{2m\sqrt{k_{r}/k_{z}}} \right)^{2} \right] \times \frac{1}{\pi m_{f}} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{n\pi m_{f}}{2m} \cos \frac{n\pi (m-L_{f})}{m} \cos \frac{n\pi (m-L_{fp})}{m} \right] \right\} \frac{d\tau}{\tau}.$$

$$(2.11.8)$$

2. Понижение в водоносном пласте без учета толщины трещины:

$$s = \frac{Q}{2\pi k_{r}m} \int_{0}^{u} \left\{ \begin{split} & \exp\left(-\frac{r^{2}/L_{f}^{2}}{\tau}\right) \left[\int_{0}^{1} I_{0}\left(\frac{r/L_{f}}{\tau}\tau'\right) \exp\left(-\frac{\tau'^{2}}{4\tau}\right)\tau' d\tau'\right] \times \\ & \times \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\tau\left(\frac{n\pi L_{f}}{2m\sqrt{k_{r}/k_{z}}}\right)^{2}\right] \times \\ & \times \left[1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} \exp\left[-\tau\left(\frac{n\pi L_{f}}{2m\sqrt{k_{r}/k_{z}}}\right)^{2}\right] \times \\ & \times \cos\frac{n\pi(m-z_{f})}{m}\cos\frac{n\pi(m-L_{Tp})}{m}\right] \end{split} \right\} \frac{d\tau}{\tau}. \end{split}$$

$$(2.11.9)$$

В решениях (2.11.8) и (2.11.9)

$$u = \frac{4k_r t}{S_s L_f^2},$$
 (2.11.10)

где  $L_f$  – диаметр трещины, м;  $m_f$  – раскрытие трещины, м;  $z_f$  – вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта до трещины (рис. 2.44), м.

По решениям (2.11.8) и (2.11.9) определяются горизонтальный и вертикальный коэффициенты фильтрации  $(k_r, k_z)$  и удельная водоотдача  $(S_s)$  напорного водоносного пласта. Дополнительно необходимо задать диаметр трещины  $(L_p)$  и вертикальное расстояние до трещины  $(z_f)$ , а для учета раскрытия трещины –  $m_f$ .

## Глава 3

## АНАЛИТИЧЕСКИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТНЫХ ОПРОБОВАНИЙ

Данная глава является продолжением гл. 2 и посвящена аналитическим зависимостям, которые описывают изменение уровня в водоносных пластах при различных технических условиях проведения опытных опробований: откачка с постоянным понижением уровня, экспресс-опробование, групповая откачка с постоянным расходом, асинхронная работа опытных скважин, откачка с переменным расходом в одной или нескольких опытных скважинах. Отдельно рассмотрены зависимости восстановления уровня для наиболее характерных типовых схем и для схем, где реализованы графоаналитические способы обработки данных восстановления уровня.

### 3.1. Откачка с постоянным понижением

В разделе приводятся нестационарные аналитические решения для схемы неограниченного в плане напорного водоносного пласта без учета перетекания и с учетом его. По всем нестационарным решениям определяется пьезопроводность (a) водоносного пласта. Для схемы с перетеканием дополнительно оценивается параметр перетекания (B).

Схема проведения опыта (рис. 3.1):

 водоносный пласт – напорный, изотропный, неограниченный в плане;



Рис. 3.1. Типовые схемы (разрез) для откачки с постоянным расходом.

*а* – изолированный напорный пласт; *б* – пласт с перетеканием. Для пласта с перетеканием может рассматриваться другое расположение водоносных пластов и разделяющих слоев (см. рис. 2.20).

рассматриваются две расчетные схемы – без учета и с учетом перетекания;

 понижение определяется в водоносном пласте на любом расстоянии от опытной скважины;

– понижение в опытной скважине не меняется в процессе опробования;

- учитывается емкость опытной скважины.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение для пласта без перетекания (Jaeger, 1959; Hantush, 1964):

$$s = s_w A \left( \frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w} \right), \tag{3.1.1}$$

$$A(u,\beta) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{J_{0}(\tau)Y_{0}(\tau\beta) - Y_{0}(\tau)J_{0}(\tau\beta)}{J_{0}^{2}(\tau) + Y_{0}^{2}(\tau)} \frac{\exp(-u\tau^{2})}{\tau} d\tau, \quad (3.1.2)$$

где  $s_w$  – постоянное понижение в опытной скважине, м.

2. Альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации для пласта без перетекания (Sternberg, 1969):

$$s = s_w K_0 \left( r_v \sqrt{\frac{1}{2at}} \right) / K_0 \left( r_w \sqrt{\frac{1}{2at}} \right).$$
(3.1.3)

Уравнение (3.1.3) получено из (3.1.6) для пласта с перетеканием.

3. Решение для пласта с перетеканием (Hantush, 1959, 1964):

$$s = s_w Z\left(\frac{at}{r_w^2}, \frac{r}{r_w}, \frac{r_w}{B}\right), \qquad (3.1.4)$$

$$Z(u, \beta_{1}, \beta_{2}) = \frac{K_{0}(\beta_{1}\beta_{2})}{K_{0}(\beta_{2})} + \exp(-u\tau^{2})\frac{2}{\pi}\int_{0}^{\infty}\frac{J_{0}(\tau\beta_{1})Y_{0}(\tau) - Y_{0}(\tau\beta_{1})J_{0}(\tau)}{J_{0}^{2}(\tau) + Y_{0}^{2}(\tau)}\frac{\exp(-u\tau^{2})}{\tau^{2} + \beta_{2}^{2}}\tau d\tau.$$
(3.1.5)

4. Альтернативная форма уравнения нестационарной фильтрации для пласта с перетеканием (Sternberg, 1969):

$$s = s_w K_0 \left( r \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right) / K_0 \left( r_w \sqrt{\frac{1}{2at} + \frac{1}{B^2}} \right).$$
(3.1.6)

Решения (3.1.3) и (3.1.6) являются приближенными.

## 3.2. Экспресс-опробование

Способ состоит в быстром наливе либо в откачке из опытной скважины некоторого известного объема воды и в последующем наблюдении за восстановлением уровня в той же скважине до первоначального положения.

Решения для экспресс-опробований даны для различных схем и условий проведения полевого эксперимента.

## 3.2.1. Решения Купера и Пикинга

В разделе приводятся решения для обработки экспрессопробования, проведенного в напорном водоносном пласте в совершенной по степени вскрытия скважине. С помощью решений Купера (Cooper) и Пикинга (Picking) определяются проводимость (T) и водоотдача (S) водоносного пласта.

Схема проведения опыта (рис. 3.2):

 водоносный пласт – напорный, изотропный, неограниченный в плане;

 опытная скважина – совершенная по степени вскрытия, учитывается емкость скважины.



Рис. 3.2. Типовая схема проведения экспресс-опробования в напорном изотропном пласте.

*а* – мгновенный налив в скважину; *б* – мгновенный забор воды из скважины.

### Базовые аналитические зависимости

Уравнения нестационарной фильтрации

1. Решение Купера – мгновенное изменение начального уровня (Карслоу, Егер, 1964; Cooper et al., 1967):

$$\frac{s_{w}}{s^{0}} = F_{s}\left(\frac{Tt}{r_{c}^{2}}, \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}}S\right),$$
(3.2.1)

$$F_{s}(u,\beta) = \frac{8\beta}{\pi^{2}} \int_{0}^{\infty} \frac{\exp(-u\tau^{2}/\beta)}{\tau \left\{ \left[ \tau J_{0}(\tau) - 2\beta J_{1}(\tau) \right]^{2} + \left[ \tau Y_{0}(\tau) - 2\beta Y_{1}(\tau) \right]^{2} \right\}} d\tau . \quad (3.2.2)$$

Здесь  $s^0$  – начальное (мгновенное) изменение уровня в опытной скважине, м;  $s_w$  – понижение в опытной скважине, м.

2. Решение Пикинга (Picking, 1994) – не мгновенное изменение начального уровня (перед восстановлением уровня вода из скважины отбиралась / нагнеталась с постоянным расходом в течение времени  $t_0$ ):

$$\frac{s_{w}}{s_{0}} = \frac{F\left(\frac{r_{w}^{2}S}{4T(t_{0}+t_{r})}, \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}}S\right) - F\left(\frac{r_{w}^{2}S}{4Tt_{r}}, \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}}S\right)}{F\left(\frac{r_{w}^{2}S}{4Tt_{0}}, \frac{r_{w}^{2}}{r_{c}^{2}}S\right)}.$$
 (3.2.3)

Здесь  $F(u, \beta)$  – функция для скважин большого диаметра (2.1.7);  $s_0$  – изменение уровня в опытной скважине на момент остановки откачки (нагнетания), м;  $t_0$  – длительность откачки (нагнетания), сут;  $t_r$  – время от начала восстановления уровня, сут.

### 3.2.2. Решение Бауэра-Райса

В разделе приводится решение для обработки экспрессопробования, проведенного в безнапорном водоносном пласте в несовершенной по степени вскрытия скважине. Решение Бауэра–Райса (Bouwer–Rice) позволяет определить коэффициент фильтрации (*k*) водоносного пласта способом прямой линии.

Схема проведения опыта (рис. 3.3):

 водоносный пласт – безнапорный, изотропный, неограниченный в плане;

- опытная скважина - несовершенная по степени вскрытия.

Уравнение нестационарной фильтрации (Bouwer, Rice, 1976):

$$\ln \frac{s^0}{s_w} = \frac{2kl_w}{r_c^2 \ln(R/r_w)} t , \qquad (3.2.4)$$

где радиус влияния *R* рассчитывается для несовершенной скважины

$$\ln \frac{R}{r_{w}} = \left(\frac{1.1}{\ln(z/r_{w})} + \frac{A_{1} + A_{2}\ln[(m-z)/r_{w}]}{l_{w}/r_{w}}\right)^{-1}$$
(3.2.5)

и для совершенной скважины

$$\ln \frac{R}{r_w} = \left(\frac{1.1}{\ln(z/r_w)} + \frac{r_w A_3}{l_w}\right)^{-1}.$$
 (3.2.6)



Рис. 3.3. Типовая схема проведения экспресс-опробования в безнапорном изотропном пласте в несовершенной по степени вскрытия опытной скважине.

Здесь z – расстояние от уровня грунтовых вод до низа фильтра скважины, м;  $A_1, A_2, A_3$  – безразмерные параметры, которые зависят от длины фильтра и радиуса опытной скважины, получены эмпирическим путем и определяются по графику (рис. 3.4) (Bouwer, Rice, 1976). Для практических расчетов безразмерные параметры можно определять с помощью следующей аппроксимации (Синдаловский, 2006):

- для диапазона  $1 \le \beta \le 200$  ( $\beta = l_w / r_w$ ):

$$\begin{split} A_{1} &= \begin{bmatrix} 1.4773306 + 0.02741954\beta + 8.0340006 \cdot 10^{-5}\beta^{2} - \\ &- 2.5045234 \cdot 10^{-7}\beta^{3} - 1.2204508 \cdot 10^{-8}\beta^{4} + \\ &+ 9.7196356 \cdot 10^{-11}\beta^{5} - 2.1463808 \cdot 10^{-13}\beta^{6} \end{bmatrix}, \\ A_{2} &= \begin{bmatrix} 0.166753 + 0.004970107\beta + 5.4654427 \cdot 10^{-5}\beta^{2} - \\ &- 1.278645 \cdot 10^{-6}\beta^{3} + 1.1887909 \cdot 10^{-8}\beta^{4} - \\ &- 5.1785833 \cdot 10^{-11}\beta^{5} + 8.6501211 \cdot 10^{-14}\beta^{6} \end{bmatrix}, \\ A_{3} &= \begin{bmatrix} 0.3905696 + 0.08310949\beta - 0.001515863\beta^{2} + \\ &+ 2.1736242 \cdot 10^{-5}\beta^{3} - 1.653479 \cdot 10^{-7}\beta^{4} + \\ &+ 6.3107187 \cdot 10^{-10}\beta^{5} - 9.4937404 \cdot 10^{-13}\beta^{6} \end{bmatrix}; \end{split}$$



Рис. 3.4. График для определения безразмерных эмпирических коэффициентов.

– для диапазона  $200 < \beta < 2000$ :

$$\begin{split} A_{\rm I} &= \begin{bmatrix} 2.510366 + 0.0260556\beta - 5.08597807 \cdot 10^{-5}\beta^2 + \\ + 5.8230884 \cdot 10^{-8}\beta^3 - 3.7929349 \cdot 10^{-11}\beta^4 + \\ + 1.2935074 \cdot 10^{-14}\beta^5 - 1.7859607 \cdot 10^{-18}\beta^6 \end{bmatrix}, \\ A_2 &= \begin{bmatrix} -0.0651429 + 0.006547392\beta - 4.1237584 \cdot 10^{-6}\beta^2 - \\ - 2.1340524 \cdot 10^{-9}\beta^3 + 4.5603083 \cdot 10^{-12}\beta^4 - \\ - 2.3529733 \cdot 10^{-15}\beta^5 + 4.0923695 \cdot 10^{-19}\beta^6 \end{bmatrix}, \\ A_3 &= \begin{bmatrix} 0.2593157 + 0.04869992\beta - 9.4552972 \cdot 10^{-5}\beta^2 + \\ + 1.05714921 \cdot 10^{-7}\beta^3 - 6.7058679 \cdot 10^{-11}\beta^4 + \\ + 2.2286538 \cdot 10^{-14}\beta^5 - 3.004312102 \cdot 10^{-18}\beta^6 \end{bmatrix}. \end{split}$$

## Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 3.1, получена на основе уравнения (3.2.4).

Таблица 3.1

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$\lg \frac{s^0}{s_w} - t$	Прямая линия	$k = 2.3 \frac{r_c^2}{2l_w} C \ln \frac{R}{r_w}$

П р и м е ч а н и е. Прямая должна выходить из начала координат; при наличии на графике двух прямых участков обработку следует проводить по второму из них, так как первый свидетельствует о нарушенной зоне вокруг скважины или о перетекании; на графике может быть и третий участок (не прямой), который возникает в результате малых понижений, когда восстановление напора практически завершилось.

### 3.2.3. Решения Хворслева

В разделе приводятся решения для обработки экспресс-опробования, проведенного в напорном или безнапорном профильно-анизотропном водоносном пласте в скважинах различной конструкции. Решения Хворслева (Hvorslev) позволяют определить горизонтальный коэффициент фильтрации ( $k_r$ ) и коэффициент профильной анизотропии ( $\chi$ ) водоносного пласта способом прямой линии.



Рис. 3.5. Схемы расположения опытной скважины в водоносном пласте для обработки экспресс-опробований по методу Хворслева.

*a* – несовершенная скважина в напорном пласте; *δ* – скважина в непроницаемой толще
 вскрывает напорный пласт своим дном; *в*, *c* – несовершенная скважина в безнапорном
 пласте (*c* – открыта только нижняя часть фильтра).

Схема проведения опыта (рис. 3.5):

 водоносный пласт – напорный или безнапорный, профильно-анизотропный, неограниченный в плане;

- опытная скважина - несовершенная по степени вскрытия.

### Графоаналитическая обработка

В табл. 3.2 приводятся решения Хворслева (Hvorslev, 1951) для определения горизонтального коэффициента фильтрации по каждой из четырех типовых схем (рис. 3.5). Определения проводят на графике  $lg(s^0/s_w)-t$  способом прямой линии. Прямая должна выходить из начала координат. Коэффициент фильтрации по горизонтали определяется при заданном коэффициенте профильной анизотропии.

Таблица 3.2

Схема	Зависимость
Несовершенная скважина в напорном пласте, фильтр примыкает к кровле (рис. 3.5, <i>a</i> )	$\begin{aligned} k_r &= \frac{2.3r_c^2}{2l_w} C \ln \Biggl( \frac{2l_w}{\chi r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{2l_w}{\chi r_w}\right)^2} \Biggr) \end{aligned}$ для $\frac{l_w}{\chi r_w} > 4 - k_r = \frac{2.3r_c^2}{2l_w} C \ln \frac{2l_w}{\chi r_w} \end{aligned}$
Скважина в непроницаемом пласте вскрывает напорный пласт своим дном (рис. 3.5, б)	$k_r = \frac{2.3\pi c_c^2}{4\chi r_w}C$

Графоаналитическое определение параметров

Таблица 3.2 (продолжение)

Схема	Зависимость
Несовершенная скважина в безнапорном пласте (рис. 3.5, <i>в</i> )	$\begin{aligned} k_r &= \frac{2.3r_c^2}{2l_w} C \ln \Biggl( \frac{l_w}{\chi r_w} + \sqrt{1 + \left(\frac{l_w}{\chi r_w}\right)^2} \Biggr) \\ \text{для } \frac{l_w}{\chi r_w} > 8 - k_r &= \frac{2.3r_c^2}{2l_w} C \ln \frac{l_w}{\chi r_w} \end{aligned}$
Скважина в безнапорном пласте, открыта только нижняя часть фильтра (рис. 3.5, <i>г</i> )	$k_r = \frac{2.3\pi 2r_c^2}{11\chi r_w}C$

## 3.3. Групповая откачка с постоянным расходом

В разделе рассматриваются аналитические и графоаналитические решения для понижения при откачке с постоянным расходом из нескольких опытных скважин. Расход в каждой скважине может отличаться как по величине, так и по знаку. Все решения для описания изменения уровня строятся с использованием принципа суперпозиции, который определяет изменение уровня в наблюдательной скважине как сумму понижений от действия каждой опытной скважины. На примере схемы Тейса (см. 2.1.1) общее уравнение понижения для системы опытных скважин записывается как

$$s = \frac{1}{4\pi T} \left[ Q_1 W \left( \frac{r_1^2}{4at} \right) + Q_2 W \left( \frac{r_2^2}{4at} \right) + \dots + Q_N W \left( \frac{r_N^2}{4at} \right) \right], \quad (3.3.1)$$

где N – количество опытных скважин;  $Q_1, Q_2, ..., Q_N$  – постоянные расходы в 1-й, 2-й, ..., N-й опытных скважинах,  $m^3/$ сут;  $r_1, r_2, ..., r_N$  – расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до 1-й, 2-й, ..., N-й опытных скважин, м.

Аналогично формуле (3.3.1) можно записать уравнение для любой расчетной схемы (см. гл. 2), где вместо функции влияния скважины подставляется требуемая для описания изменения уровня функция.

# 3.3.1. Изолированный напорный водоносный пласт (совершенная скважина)

Графоаналитические способы обработки для групповой откачки с постоянным расходом наиболее полно представлены для данной схемы. При построении решений учитывается влияние плановых границ фильтрационного потока. Описание схемы и решения для откачки с постоянным расходом даны в разд. 2.1.

# 3.3.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса)

Решения в разделе приводятся в зависимости от синхронности начала работы опытных скважин.

# 3.3.1.1.1. Откачка с одновременным началом работы опытных скважин

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \left[ Q_i W \left( \frac{r_i^2}{4at} \right) \right], \qquad (3.3.2)$$

где  $Q_i$  – постоянный расход в *i*-й опытной скважине, м<sup>3</sup>/сут;  $r_i$  – расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до *i*-й опытной скважины, м.

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at}{r'^2},$$
 (3.3.3)

$$\ln r' = \frac{1}{Q_i} \sum_{i=1}^{N} (Q_i \ln r_i), \qquad (3.3.4)$$

$$Q_{t} = \sum_{i=1}^{N} Q_{i} . \qquad (3.3.5)$$

243

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.3, получены на основе уравнений (3.3.2) и (3.3.3).

Таблица 3.3

	-	
График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q_t}{C}, \ \lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r'^2}{2.25}$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{1}{4\pi 10^D}$ , $a = \frac{r_1^2 10^E}{4}$
$s - \lg r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q_t}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t)$
$s - \lg \frac{t}{r'^2}$	» »	$T = \frac{0.183Q_t}{C}, \ \lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$
$(s_1-s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q_t}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание.  $W'(u) = \sum_{i=1}^{N} Q_i W(ur_i')$ ,  $r_i' = (r_i / r_1)^2$ . Значение  $r_i'$  можно приводить

к расстоянию до любой опытной скважины (расстояние до приведенной опытной скважины используется также при определении пьезопроводности по способу эталонной кривой).

# 3.3.1.1.2. Откачка с асинхронным началом работы опытных скважин

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N_i} \left[ Q_i W \left( \frac{r_i^2}{4a(t-t_i)} \right) \right]; \qquad (3.3.6)$$

здесь  $N_t$  – количество опытных скважин, работающих на момент времени t;  $t_i$  – время начала работы i-й опытной скважины, отсчитанное от начала опытного опробования, сут. Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'_A}{r'^2}, \qquad (3.3.7)$$

$$\ln t'_{A} = \frac{1}{Q_{t}} \sum_{i=1}^{N_{t}} Q_{i} \ln(t - t_{i}), \qquad (3.3.8)$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N_t} (Q_i \ln r_i).$$
 (3.3.9)

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.4, получены на основе уравнения (3.3.7).

Таблица 3.4

График	Способ	Зависимость
$\frac{s}{Q_t} - \lg t'_A$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.183}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$\frac{s}{Q_t}$ - lg r'	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t'_A)$
$\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'_A}{r'^2}$	Прямая линия (2)	$T = \frac{0.183}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – количество прямолинейных участков соответствует количеству включений опытных скважин; (2) – все замеры ложатся на один прямолинейный участок.

# 3.3.1.2. Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница I рода

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \left\{ Q_i \left[ W \left( \frac{r_i^2}{4at} \right) - W \left( \frac{\rho_i^2}{4at} \right) \right] \right\}; \quad (3.3.10)$$

здесь  $\rho_i$  – расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до фиктивной скважины, полученной в результате отражения *i*-й опытной скважины, м.

Уравнение для стационарного периода:

$$s_m = \frac{1}{2\pi T} \ln r', \qquad (3.3.11)$$

$$\ln r' = \sum_{i=1}^{N} \left( Q_i \ln \frac{\rho_i}{r_i} \right).$$
 (3.3.12)

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.5, получены на основе уравнений (3.3.10) и (3.3.11).

Таблица 3.5

	-			
График	Способ	Зависимость		
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln r'$		
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgW'(u)—lg <u>1</u>	$T = \frac{1}{4\pi 10^{D}}, \ a = \frac{r_{1}^{2} 10^{E}}{4}$		
<i>s</i> — lg <i>r</i> '	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$		
$(s_1 - s_2)$ —lg $t$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}$		
Примечание. $W'(u) = \sum_{i=1}^{N} \mathcal{Q}_i [W(ur_i') - W(u\rho_i')], r_i' = (r_i / r_1)^2, \rho_i' = (\rho_i / r_1)^2.$ Зна-				

Графоаналитическое определение параметров

чения  $r'_i$  и  $\rho'_i$  можно приводить к расстоянию до любой опытной скважины (см. примечание к табл. 3.3).

# 3.3.1.3. Полуограниченный в плане водоносный пласт: граница II рода

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \left\{ Q_i \left[ W \left( \frac{r_i^2}{4at} \right) + W \left( \frac{\rho_i^2}{4at} \right) \right] \right\}.$$
 (3.3.13)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{2\pi T} \ln \frac{2.25at}{r'}, \qquad (3.3.14)$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N} (Q_i \ln r_i \rho_i).$$
 (3.3.15)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.6, получены на основе уравнений (3.3.13) и (3.3.15).

Таблица 3.6

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость	
$s - \lg t$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r'}{2.25}$	
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{1}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r_1^2 10^E}{4}$	
$s - \lg r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25t)$	
$s - \lg \frac{t}{r'}$	» »	$T = \frac{0.366Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$	
$(s_1 - s_2)$ —lg t	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}$	
Примечание. $W'(u) = \sum_{i=1}^{N} \mathcal{Q}_i \left[ W(ur'_i) + W(u\rho'_i) \right]$ ; см. примечание к табл. 3.5.			

## 3.3.1.4. Пласт-полоса: границы I рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} Q_i \left[ W\left(\frac{r_i^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{l=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i,l}^j)^2}{4at}\right) \right]; \quad (3.3.16)$$

здесь n – количество отражений от одной границы;  $\rho_{i,I}^{j}$  – расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до *j*-х фиктивных скважин, отраженных от левой (I = 1) или от правой (I = 2) границы и полученных в результате отражения *i*-й опытной скважины, м.

Решение (3.3.16) построено на основе уравнения (2.1.14). Аналогично можно построить зависимости на основе уравнений (2.1.15) и (2.1.16).

### Уравнения для стационарного периода

1. Решение, полученное с использованием принципа суперпозиции:

$$s_m = \frac{1}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366}{T} \lg r', \qquad (3.3.17)$$

$$\lg r' = \sum_{i=1}^{N} Q_i \lg \left( \frac{1}{r_i \rho_{i,1}^n} \frac{\prod_{j=1,3,5,\dots}^n \rho_{i,1}^j \rho_{i,2}^j}{\prod_{j=2,4,6,\dots}^n \rho_{i,1}^j \rho_{i,2}^j} \right) = \sum_{i=1}^{N} Q_i \lg \left( \frac{\rho_{i,1}^1 \rho_{i,2}^1}{r_i \rho_{i,1}^n} \prod_{j=2}^{n-1} \frac{\rho_{i,1}^{j+1} \rho_{i,2}^{j+1}}{\rho_{i,1}^j \rho_{i,2}^j} \right).$$
(3.3.18)

2. Решение на основе функции Грина:

$$s_m = \frac{1}{4\pi T} \ln r' = \frac{0.183}{T} \lg r', \qquad (3.3.19)$$

$$\ln r' = \sum_{i=1}^{N} Q_{i} \ln \frac{\cosh \frac{\pi y_{i}}{L} - \cos \frac{\pi (L_{p} + L_{w,i})}{L}}{\cosh \frac{\pi y_{i}}{L} - \cos \frac{\pi (L_{p} - L_{w,i})}{L}}, \qquad (3.3.20)$$

$$y_{i} = \sqrt{r_{i}^{2} - (L_{w,i} - L_{p})^{2}}$$
(3.3.21)

 $(L_{w,i} -$ расстояние до границы от *i*-й опытной скважины, м).

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.7, получены на основе уравнений (3.3.16), (3.3.17) и (3.3.19).

Таблица 3.7

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln r' \ (1), \ T = \frac{1}{4\pi \cdot A} \ln r' \ (2)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{1}{4\pi 10^{D}}; \ a = \frac{r_{1}^{2}10^{E}}{4}$
$s_m$ — lg $r$ '	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$ (1), $T = \frac{0.183}{C}$ (2)
$(s_1 - s_2)$ —lgt	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (1), \ T = \frac{1}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – с использованием принципа суперпозиции; (2) – на основе функции Грина;  $W'(u) = \sum_{i=1}^{N} Q_i \left[ W(ur_i') + \sum_{j=1}^{n} (-1)^j \sum_{l=1}^{2} W(ur_{i,l}') \right], r_i' = \left(\frac{r_i}{r_1}\right)^2, r_{i,l}' = \left(\frac{\rho_{i,l}^j}{r_1}\right)^2.$ 

Значения  $r_i'$  и  $r_{i,I}'^{j^{\times}}$  можно приводить к расстоянию до любой опытной скважины (см. примечание к табл. 3.3).

### 3.3.1.5. Пласт-полоса: границы II рода

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} Q_i \left[ W\left(\frac{r_i^2}{4at}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{l=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i,l}^j)^2}{4at}\right) \right].$$
(3.3.22)

Решение (3.3.22) построено на основе уравнения (2.1.21). Аналогично можно построить зависимости на основе уравнений (2.1.22) и (2.1.23).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 3.8 получены на основе уравнения (3.3.22).

Таблица 3.8

График	Способ	Зависимость		
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgW'(u)—lg <u>1</u>	$T = \frac{1}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r_1^2 10^E}{4}$		
$(s_1 - s_2)$ —lgt	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{(2n+1)Q_t}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$		
Примечание. $W'(u) = \sum_{i=1}^{N} Q_i \left[ W(ur_i') + \sum_{j=1}^{n} \sum_{I=1}^{2} W(ur_{i,I}') \right];$ определение $r_i'$ и $r_{i,I}'$				
см. в примечании к табл. 3.7; $\ln r' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N} \left[ Q_i \ln \left( r_i \prod_{j=1}^n \rho_{i,1}^j \rho_{i,2}^j \right)^{1/(2n+1)} \right]; Q_t = \sum_{i=1}^N Q_i.$				

Графоаналитическое определение параметров

## 3.3.1.6. Пласт-полоса: границы I и II рода

### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} Q_{i} \begin{bmatrix} W\left(\frac{r_{i}^{2}}{4at}\right) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{I=1}^{2} (-1)^{(j+2I-1)/2} W\left(\frac{(\rho_{i,I}^{j})^{2}}{4at}\right) + \\ + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{I=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i,I}^{j})^{2}}{4at}\right) \end{bmatrix}$$
(3.3.23)

Решение (3.3.23) построено на основе уравнения (2.1.24). Аналогично можно построить зависимость на основе уравнения (2.1.25).

Уравнения для стационарного периода

1. Решение, полученное с использованием суперпозиции:

$$s_m = \frac{1}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366}{T} \lg r', \qquad (3.3.24)$$

$$\lg r' = \sum_{i=1}^{N} Q_i \lg \left( \frac{\rho_{i,1}^n}{r_i} \prod_{j=1,5,9...}^{n-3} \frac{\rho_{i,1}^j \rho_{i,1}^{j+1} \rho_{i,2}^{j+1} \rho_{i,2}^{j+2}}{\rho_{i,1}^{j+2} \rho_{i,1}^{j+3} \rho_{i,2}^j \rho_{i,2}^{j+3}} \right).$$
(3.3.25)

2. Решение на основе функции Грина:

$$s_m = \frac{1}{4\pi T} \ln r',$$
 (3.3.26)

$$\ln r' = \sum_{i=1}^{N} Q_{i} \ln \left[ \frac{\cosh \frac{\pi y_{i}}{2L} - \cos \frac{\pi (L_{p} + L_{w,i})}{2L}}{\left[ \cosh \frac{\pi y_{i}}{2L} + \cos \frac{\pi (L_{p} - L_{w,i})}{2L} \right]} \right] \left[ \cosh \frac{\pi y_{i}}{2L} - \cos \frac{\pi (L_{p} - L_{w,i})}{2L} \right].$$
(3.3.27)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.9, получены на основе уравнений (3.3.23), (3.3.24) и (3.3.26).

Таблица 3.9

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln r' \ (1), \ T = \frac{1}{4\pi \cdot A} \ln r' \ (2)$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: $\lg W'(u) - \lg \frac{1}{u}$	$T = \frac{1}{4\pi 10^D}, \ a = \frac{r_1^2 10^E}{4}$
$s_m$ — lg $r$ '	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$ (1), $T = \frac{0.183}{C}$ (2)
$(s_1 - s_2)$ —lgt	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{1}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (1), \ T = \frac{1}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2)$

П р и м е ч а н и е. Определение  $r'_i$  и  $r'_{i,I}^{j}$  см. в примечании к табл. 3.7. W'(u) =

$$=\sum_{i=1}^{N} Q_{i} \left[ W(ur_{i}') + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{I=1}^{2} (-1)^{(j+2I-1)/2} W(ur_{i,I}') + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{I=1}^{2} W(ur_{i,I}') \right].$$
# 3.3.2. Точечный источник в неограниченном в плане и разрезе напорном водоносном пласте

Описание схемы и решения для откачки с постоянным расходом дано в 2.2.1.

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi k} \sum_{i=1}^{N} \left( \frac{Q_i}{d_i} \operatorname{erfc} \frac{d_i}{2\sqrt{at}} \right), \qquad (3.3.28)$$

$$d_i = \sqrt{r_i^2 + z_i^2}; \qquad (3.3.29)$$

здесь *z<sub>i</sub>* – расстояние по вертикали между серединой фильтров *i*-й опытной скважины и наблюдательной скважины, м.

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi k} \left( \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i} - \frac{1}{\sqrt{\pi at}} \right).$$
(3.3.30)

Уравнения для стационарного периода:

$$s_m = \frac{1}{4\pi k} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i}.$$
 (3.3.31)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.10, получены на основе уравнений (3.3.28), (3.3.30) и (3.30.31).

Таблица 3.10

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t$	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{1}{4\pi \cdot A} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i}$
$\lg s - \lg t$	Эталонная кривая: lgerfc'( $u$ )—lg $\frac{1}{u^2}$	$k = \frac{1}{4\pi 10^{D}}, \ a = \frac{d_{1}^{2}10^{E}}{4}$

Таблица 3.10 (продолжение)

График	Способ	Зависимость	
$s - \frac{1}{\sqrt{t}}$	Прямая линия	$k = \frac{1}{4\pi \cdot A} \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i}, \ a = \frac{(A/C)^2}{\pi} \left( \frac{Q_i}{\sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i}} \right)^2$	
$(s_1 - s_2)$ —lg $t$	Горизонтальная прямая линия	$k = \frac{1}{4\pi \cdot A} \left( \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_{i,1}} - \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_{i,2}} \right)$	
Примечание. $\operatorname{erfc}'(u) = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{d_i} \operatorname{erfc}'(ud'_i)$ , $d'_i = (d_i/d_1)^2$ . Значение $d'_i$ можно			

приводить к расстоянию до любой опытной скважины (расстояние до этой опытной скважины используется при определении пьезопроводности по способу эталонной кривой).

# 3.4. Откачка с переменным расходом

Изменение уровней в водоносном пласте под действием откачки (нагнетания) определяется как сумма понижений, вызываемых действием каждой опытной скважины в отдельности. Действие же скважины рассматривается как сумма понижений от каждого скачка (ступени) расхода в самой скважине. При этом расход считается постоянным между любым изменением



Рис. 3.6. Пример схемы расположения трех опытных скважин с произвольным ступенчатым изменением расхода в каждой из них.

производительности в работе скважины. Для схем, ограниченных в плане и/или в разрезе, на данное наложение течений накладывается также изменение уровней от действия фиктивных скважин, полученных в результате зеркального отражения опытных скважин от плановых или профильных границ.

Для построения аналитических зависимостей таких сложных систем используется принцип суперпозиции или сложения течений.

На рис. 3.6 показан пример со схемой расположения трех опытных скважин и одной наблюдательной. Для каждой опытной скважины приведен пример графика изменения расхода во времени.

Общее уравнение для понижения уровня в наблюдательной скважине при групповой откачке с переменным расходом

$$s = P \sum_{i=1}^{N+M} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left\{ \left( Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) f \left[ r_i, \left( t - t_i^j \right) \right] \right\},$$
(3.4.1)

где  $f(r_i,t)$  – функция, описывающая расчетную гидрогеологическую схему опытного опробования; M – количество фиктивных скважин для ограниченных и полуограниченных пластов (для неограниченных пластов M = 0); N – количество опытных скважин;  $n_i^j$  – количество скачков *i*-й опытной скважины на момент времени  $t_i^j$ ; P – постоянная величина (зависит от расчетной схемы);  $Q_i^j$  – расход *j*-го скачка *i*-й опытной скважины  $(Q_i^0 = 0)$ , м<sup>3</sup>/сут;  $r_i$  – расстояние от наблюдательной скважины до *i*-й опытной скважины (реальной или фиктивной), м; t – время от начала откачки, сут;  $t_i^j$  – время начала *j*-го скачка *i*-й опытной скважины ( $t_i^1 = 0$ ), сут.

В данном разделе рассматриваются аналитические и графоаналитические решения при опробовании водоносных пластов одной или несколькими опытными скважинами, расход в которых может произвольно меняться во времени. Решения показаны на примере схемы неограниченного напорного изотропного водоносного пласта (см. 2.1.1).

### 3.4.1. Одна опытная скважина с переменным расходом

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{j=1}^{n_1^j} \left[ \left( Q_1^j - Q_1^{j-1} \right) W \left( \frac{r^2}{4a(t-t_1^j)} \right) \right].$$
(3.4.2)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2},$$
 (3.4.3)

$$\ln t' = \frac{1}{Q_t} \sum_{j=1}^{n_l^j} \left[ \left( Q_1^j - Q_1^{j-1} \right) \ln \left( t - t_1^j \right) \right], \qquad (3.4.4)$$

$$Q_{t} = \sum_{j=1}^{n_{1}^{j}} \left( Q_{1}^{j} - Q_{1}^{j-1} \right).$$
(3.4.5)

#### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.11, получены на основе уравнения (3.4.3).

Таблица 3.11

График	Способ	Зависимость
$\frac{s}{Q_t}$ —lg $t'$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.183}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$\frac{s}{Q_t}$ —lg r	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t')$
$\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'}{r^2}$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.183}{C}, \ \lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – все замеры ложатся на одну прямую (при остановке работы опытной скважины замеры исключаются из построения графика).

## 3.4.2. Несколько опытных скважин с переменным расходом

#### Базовые аналитические зависимости

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i^j} \left[ \left( Q_i^{j} - Q_i^{j-1} \right) W \left( \frac{r_i^2}{4a(t - t_i^{j})} \right) \right].$$
(3.4.6)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2},$$
 (3.4.7)

$$\ln t' = \frac{1}{Q_t} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_t^j} \left[ \left( Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) \ln \left( t - t_i^j \right) \right], \qquad (3.4.8)$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_i} \sum_{i=1}^{N} \left[ \ln r_i \sum_{j=1}^{n_i^j} \left( Q_i^j - Q_i^{j-1} \right) \right], \qquad (3.4.9)$$

$$Q_{i} = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_{i}^{j}} \left( Q_{i}^{j} - Q_{i}^{j-1} \right).$$
(3.4.10)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 3.12 получены на основе уравнения (3.4.7).

Таблица 3.12

График	Способ	Зависимость
$\frac{s}{Q_t}$ —lg $t'$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.183}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r'^2}{2.25}$
$\frac{s}{Q_t}$ —lg $r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t')$
$\frac{s}{Q_t} - \lg \frac{t'}{{r'}^2}$	Прямая линия (2)	$T = \frac{0.183}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – количество прямолинейных участков соответствует количеству включений опытных скважин; (2) – все замеры ложатся на один прямолинейный участок.

## 3.5. Восстановление уровня

В программном комплексе ANSDIMAT предусмотрена аналитическая обработка периода восстановления уровня в наблюдательных скважинах для всех реализованных в комплексе расчетных схем.

Все решения для описания восстановления уровня строятся с использованием принципа суперпозиции (разд. 3.4), который в данном случае определяет изменение уровня в скважине как сумму понижений от двух периодов: откачки с определенным (постоянным или переменным) расходом опытной скважины и восстановления с нулевым расходом.

Способы обработки зависят от принятия точки отсчета данных восстановления уровня: 1) изменение уровня отсчитывается от уровня на начало опытного опробования – статического уровня; 2) изменение уровня отсчитывается от начала восстановления – динамического уровня на момент окончания откачки / нагнетания. На рис. 3.7 приводятся индикаторные графики временного прослеживания s - lgt, построенные по одним и тем же фактическим данным восстановления уровня, для двух случаев принятия точки отсчета. Ниже будет показано, что такой прием позволяет использовать дополнительные возможности при определении фильтрационных параметров графоаналитическими способами.

Выражения для изменения уровня в наблюдательной скважине записываются как понижение при откачке с двумя ступенями расхода (см. 3.4.1).



Рис. 3.7. Пример графиков временно́го прослеживания (*s*—lg*t*): восстановление уровня отсчитывается от статического уровня (*a*) и динамического уровня на момент окончания откачки (*б*).

На примере схемы Тейса (см. 2.1.1) запишем решение для первого случая

$$s = \frac{Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + \frac{Q_2 - Q_1}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right)$$
(3.5.1)

и для второго случая  $s_r = s_0 - s$ , (3.5.2)

$$s_{0} = \frac{Q_{1}}{4\pi T} W \left( \frac{r^{2}}{4at_{0}} \right), \qquad (3.5.3)$$

где *s* – понижение в наблюдательной скважине после остановки откачки на момент времени  $t_r$  (т.е. восстановление уровня, отсчитанное от начального статического уровня в скважине), м;  $s_0$  – понижение в наблюдательной скважине на конец откачки, м;  $s_r$  – восстановление в наблюдательной скважине после остановки откачки на момент времени  $t_r$ , м;  $t_0$  – длительность откачки, сут;  $t_r$  – время от начала восстановления, сут;  $Q_1 = Q$  – расход на период откачки, м<sup>3</sup>/сут;  $Q_2 = 0$  – нулевой расход с момента остановки откачки, м<sup>3</sup>/сут.

Уравнение (3.5.1) соответствует уравнению (3.5.9), а (3.5.2) – уравнению (3.5.12). Логарифмическая аппроксимация этих уравнений записывается соответственно:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25a(t_0 + t_r)}{r^2} - \frac{Q}{4\pi T} \frac{2.25at_r}{r^2}, \qquad (3.5.4)$$

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at_0}{r^2} - \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25a(t_0 + t_r)}{r^2} + \frac{Q}{4\pi T} \frac{2.25at_r}{r^2} .$$
 (3.5.5)

С помощью небольших преобразований уравнений (3.5.4) и (3.5.5) переходим к базовым зависимостям для периода восстановления уровней (3.5.10) и (3.5.13), на основе которых возможна графоаналитическая обработка данных ОФО.

Любое решение, описывающее изменение уровня в скважине, можно записать аналогично (3.5.1) и (3.5.2), где вместо функции влияния скважины подставляется требуемая для решения функция:

$$s \sim f(t_0 + t_r) - f(t_r),$$
 (3.5.6)

$$s_r \sim f(t_0) - f(t_0 + t_r) + f(t_r),$$
 (3.5.7)

где f – произвольная функция, входящая в уравнение фильтрации и зависящая от времени. Зависимости (3.5.6) и (3.5.7) используются в программном комплексе для всех схем и практически для всех решений, описанных в гл. 2, при обработке восстановления уровня.

Восстановление уровня в скважине возможно обрабатывать так же, как откачку с постоянным расходом, используя для этого все доступные зависимости (см. гл. 2). Здесь надо иметь в виду, что такая обработка (когда игнорируется период откачки) может привести к искажению определяемой проводимости пласта. Так, при длительности восстановления  $(t_r)$  менее 10 % от длительности откачки  $(t_0)$ , т.е.  $t_r \le 0.1t_0$ , откачкой при обработке восстановления можно пренебречь, а при отношении  $t_r/t_0 = 2.5$  ошибка достигает 45 % в сторону завышения проводимости (Боревский и др., 1973). При площадном прослеживании игнорирование периода откачки приводит к меньшим погрешностям.

Кроме этого, в программном комплексе рассматривается совместная обработка периода откачки / нагнетания и восстановления уровня (рис. 3.8).

Совместная обработка является аналогом обработки откачки с переменным расходом опытной скважины (см. 3.4.1), где для последней ступени берется нулевой расход. Решение в этом случае записывается раздельно для двух периодов (на примере схемы Тейса):

$$s = \begin{cases} \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r^2}{4at}\right), & t \le t_0 \\ \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r^2}{4at}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a(t-t_0)}\right) \right], & t > t_0. \end{cases}$$
(3.5.8)

Систему (3.5.8) можно записать и для нескольких опытных скважин, используя уравнение (3.3.2), и для переменного расхода – (3.4.2) и (3.4.6). Описание функциональных зависимостей для восстановления уровня после групповой откачки с постоянным расходом дано в 3.5.2.

Ниже приводятся аналитические зависимости, на основе которых предусмотрены графоаналитические способы получения фильтрационных параметров по периоду восстановления уровня.



Рис. 3.8. Пример графика временного прослеживания (*s*—lg*t*), построенного для совместной обработки данных понижения и восстановления уровня.

## 3.5.1. Одна опытная скважина с постоянным расходом

## 3.5.1.1. Напорный пласт

В разделе приводятся нестационарные, квазистационарные и стационарные зависимости, описывающие восстановление уровня в неограниченном, полуограниченном и ограниченном в плане водоносном пласте (см. разд. 2.1). Уравнения нестационарной фильтрации построены с использованием принципа суперпозиции и уравнения Тейса (2.1.1). Для пласта-полосы также даются решения, полученные на основе функций Грина.

# 3.5.1.1.1. Неограниченный в плане водоносный пласт (схема Тейса)

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)} \right) - W \left( \frac{r^2}{4at_r} \right) \right]. \tag{3.5.9}$$

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r} \,. \tag{3.5.10}$$

Для учета различия в параметрах водоотдачи водоносного пласта при откачке и восстановлении уровня используется следующее уравнение для изменения уровня на период квазистационарного режима (Jacob, 1963):

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left( \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} - \ln \frac{S}{S'} \right),$$
 (3.5.11)

где S' – водоотдача водоносного пласта при восстановлении уровня (может отличаться от водоотдачи при откачке).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.13, получены на основе уравнений (3.5.10) и (3.5.11).

Таблица 3.13

График	Способ	Зависимость
$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.183Q}{C}, \ \frac{S}{S'} = 10^{A/C},$ $\lg a = \lg \frac{r^2}{2.25} + \frac{s_0}{C} - \lg t_0 \ (3)$
$(s_1-s_2)$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2}{r_1}$
$(s_0 - s) - \lg \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r}$	Прямая линия (2)	$T = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание.  $s_0$  – понижение на конец откачки; (1) – прямая линия должна выходить из начала координат; (2) –  $s_0 - s = s_r$ , обработка совпадает с обработкой по графику  $s_r - \lg t'$  из табл. 3.14; (3) – зависимость взята из работы Боревского и др. (1973).

Прямая линия должна пересекать начало координат (рис. 3.9), если значение водоотдачи водоносного пласта при понижении и восстановлении уровня не меняется (S/S'=1) (см. расчет этого отношения в табл. 3.13). Прямая линия может отклоняться от начала координат в результате ошибочного замера статического уровня (Шестаков, 1973).



Рис. 3.9. Схематичный график восстановления уровня при правильном (1) и неправильном (2) задании статического уровня.

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W \left( \frac{r^2}{4at_0} \right) - W \left( \frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)} \right) + W \left( \frac{r^2}{4at_r} \right) \right]. \quad (3.5.12)$$

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s_r = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r^2} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{r^2},$$
 (3.5.13)

$$t' = \frac{t_0 t_r}{t_0 + t_r}.$$
 (3.5.14)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 3.14 получены на основе уравнения (3.5.13).

Таблица 3.14

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg r$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t')$
$s_r - \lg t'$	» »	$T = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$s_r - \lg \frac{t'}{r^2}$	» »	$T = \frac{0.183Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$
$\left(s_{r,1}-s_{r,2}\right)-\lg t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2}{r_1}$

Графоаналитическое определение параметров

# 3.5.1.1.2. Полуограниченный в плане пласт: граница I рода

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{\rho^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) + W\left(\frac{\rho^2}{4at_r}\right) \right].$$
(3.5.15)

Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 3.15 получены на основе уравнения (3.5.17).

Таблица 3.15

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho}{r}$
$s - \lg \frac{\rho}{r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$
$(s_1 - s_2)$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. Параметры определяются по начальным замерам восстановления.

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}}\right) - W\left(\frac{\rho^{2}}{4at_{0}}\right) - W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}\right) + \\ + W\left(\frac{\rho^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}\right) + W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}}\right) - W\left(\frac{\rho^{2}}{4at_{r}}\right) \end{bmatrix}.$$
(3.5.16)

Уравнение для стационарного периода:

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{\rho}{r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{\rho}{r}$$
 (3.5.17)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.16, получены на основе уравнения (3.5.17).

Таблица 3.16

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho}{r}$
$s_{mr} - \lg \frac{\rho}{r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$
$(s_{r,1}-s_{r,2})$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_1 r_2}{\rho_2 r_1}$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по конечным замерам восстановления уровня.

## 3.5.1.1.3. Полуограниченный в плане пласт: граница II рода

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + W\left(\frac{\rho^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) - W\left(\frac{\rho^2}{4at_r}\right) \right].$$
(3.5.18)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (3.5.19)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.17, получены на основе уравнения (3.5.19).

Таблица 3.17

Графоаналитическо	е определение	параметров
-------------------	---------------	------------

График	Способ	Зависимость
$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	Прямая линия (1)	$T = \frac{0.366Q}{C}$
$(s_1-s_2)$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_2 r_2}{\rho_1 r_1}$

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, начинающемуся от начала координат (последние значения восстановления); прямолинейный участок, отвечающий начальным значениям восстановления, будет давать удвоенную величину проводимости.

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{bmatrix} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}}\right) + W\left(\frac{\rho^{2}}{4at_{0}}\right) - W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) - \\ -W\left(\frac{\rho^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) + W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}}\right) + W\left(\frac{\rho^{2}}{4at_{r}}\right) \end{bmatrix}.$$
(3.5.20)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s_r = \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r\rho} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{r\rho},$$
 (3.5.21)

где t' – определяется по формуле (3.5.14).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.18, получены на основе уравнения (3.5.21).

Таблица 3.18

Гp	афоаналитическое	определение	параметров
- r		on percente	mapa pos

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg t'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r\rho}{2.25}$

Таблица 3.18 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg r \rho$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25 \cdot t')$
$s_r - \lg \frac{t'}{r\rho}$	» »	$T = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$
$(s_{r,1}-s_{r,2})$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{\rho_2 r_2}{\rho_1 r_1}$

## 3.5.1.1.4. Пласт-полоса: границы I рода

Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4a(t_0+t_r)}\right] - \\ -W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) - \sum_{j=1}^n (-1)^j \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at_r}\right] \end{cases} \end{cases}$$
(3.5.22)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (3.5.23)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.19, получены на основе уравнения (3.5.23).

Таблица 3.19

рафоаналитическ	ое определение	параметров
-----------------	----------------	------------

График	Способ	Зависимость
$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q}{C}$

Таблица 3.19 (продолжение)

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'  (3)$
$(s_1-s_2)$ lg $t_r$	То же	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему начальным значениям восстановления уровня; (2) – с использованием принципа суперпозиции; (3) – на основе функции Грина; при использовании принципа суперпозиции приведенное расстояние (r') определяется по формуле (2.1.18), а при использовании функции Грина – (2.1.20).

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{0}}\right] - \\ -W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) - \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right] + \\ +W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}}\right) + \sum_{j=1}^{n} (-1)^{j} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{r}}\right] \end{cases} \end{cases}$$
(3.5.24)

Уравнения для стационарного периода

#### 1. С использованием принципа суперпозиции:

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366Q}{T} \lg r', \qquad (3.5.25)$$

где r' – приведенное расстояние: определяется по формуле (2.1.18).

2. На основе функции Грина:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi T} \ln r' = \frac{0.183Q}{T} \lg r', \qquad (3.5.26)$$

где г' определяется по формуле (2.1.20).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.20, получены на основе уравнений (3.5.25) и (3.5.26).

Таблица 3.20

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln r'  (3)$
$s_{mr}$ —lg $r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}  (2), \ T = \frac{0.183Q}{C}  (3)$
$(s_{r,1}-s_{r,2})$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему конечным значениям восстановления уровня; (2), (3) – см. примечание к табл. 3.19.

## 3.5.1.1.5. Пласт-полоса: границы II рода

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0 + t_r)}\right) + \\ + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4a(t_0 + t_r)}\right] - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) - \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^2 W\left[\frac{(\rho_i^j)^2}{4at_r}\right] \end{cases}. (3.5.27)$$

#### Графоаналитическая обработка

Зависимость в табл. 3.21 получена на основе логарифмического преобразования уравнения (3.5.27) для разности понижений в двух наблюдательных скважинах. Приведенное расстояние здесь определяется как

$$r' = \left( r \prod_{j=1}^{n} \rho_1^{j} \rho_2^{j} \right)^{1/(2n+1)}.$$
 (3.5.28)

Таблица 3.21

График	Способ	Зависимость
$(s_1-s_2)$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия	$T = \frac{(2n+1)Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. Определяется по прямолинейному участку, отвечающему начальным значениям восстановления уровня.

### Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{0}}\right] - W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}\right) - \\ -\sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})}\right] + W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}}\right) + \sum_{j=1}^{n} \sum_{i=1}^{2} W\left[\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{r}}\right] \end{cases}.$$
(3.5.29)

## Графоаналитическая обработка

Для данного представления замеров восстановления уровня графоаналитическая обработка в программном комплексе ANSDIMAT не предусмотрена.

# 3.5.1.1.6. Пласт-полоса: границы I и II рода

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \begin{cases} W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + \\ + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4a(t_0+t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) - \\ - \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at_r}\right) - \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_i^j)^2}{4at_r}\right) \end{cases}$$

$$(3.5.30)$$

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (3.5.31)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости в табл. 3.22 получены на основе уравнения (3.5.31).

Таблица 3.22

График	Способ	Зависимость
$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q}{C}$
$s - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'  (3)$
$(s_1 - s_2)$ —lg $t_r$	То же	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему начальным значениям восстановления уровня; (2) – с использованием принципа суперпозиции; (3) – на основе функции Грина; при использовании принципа суперпозиции, приведенное расстояние определяется по формуле (2.1.27), а при использовании функции Грина – (2.1.29).

#### Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{Q}{4\pi T} \left\{ \begin{split} & W\left(\frac{r^{2}}{4at_{0}}\right) + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{0}}\right) + \\ & + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{0}}\right) - W\left(\frac{r^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) - \\ & - \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) - \\ & - \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4a(t_{0}+t_{r})}\right) + W\left(\frac{r^{2}}{4at_{r}}\right) + \\ & + \sum_{j=1,3...}^{n} \sum_{i=1}^{2} (-1)^{(j+2i-1)/2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{r}}\right) + \sum_{j=2,4...}^{n} (-1)^{j/2} \sum_{i=1}^{2} W\left(\frac{(\rho_{i}^{j})^{2}}{4at_{r}}\right) \right\}$$

$$(3.5.32)$$

Уравнения для стационарного периода

1. С использованием принципа суперпозиции:

$$s_{mr} = \frac{Q}{2\pi T} \ln r' = \frac{0.366Q}{T} \lg r', \qquad (3.5.33)$$

где приведенное расстояние r' определяется зависимостью (2.1.27).

2. На основе функции Грина:

$$s_{mr} = \frac{Q}{4\pi T} \ln r' = \frac{0.183Q}{T} \lg r', \qquad (3.5.34)$$

где приведенное расстояние r' определяется зависимостью (2.1.29).

### Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.23, получены на основе уравнений (3.5.33) и (3.5.34).

Таблица 3.23

График	Способ	Зависимость
$s - \lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} r'  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} r'  (3)$
$s_{mr}$ —lg $r'$	Прямая линия	$T = \frac{0.366Q}{C}$
$\left(s_{r,1}-s_{r,2}\right)-\lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (2), \ T = \frac{Q}{4\pi \cdot A} \ln \frac{r_1'}{r_2'}  (3)$

Графоаналитическое определение параметров

Примечание. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему конечным значениям восстановления уровня; (2), (3) – см. примечание к табл. 3.22.

#### 3.5.1.2. Безнапорный пласт

Решения, описывающие восстановление уровня, даны для совершенной скважины в безнапорном изотропном неограниченном в плане пласте (см. 2.4.1) и построены на зависимости (2.4.22) для гравитационного режима.

#### Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s(2m-s) = \frac{Q}{2\pi k} \left[ W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) - W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]. \quad (3.5.35)$$

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s(2m-s) = \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r} = \frac{0.366Q}{k} \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}.$$
 (3.5.36)

## Графоаналитическая обработка

Зависимость в табл. 3.24, получена на основе уравнения (3.5.36).

Таблица 3.24

Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s(2m-s)$ —lg $\frac{t_0+t_r}{t_r}$	Прямая линия	$k = \frac{0.366Q}{C}$

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_r(2m-s_r) = \frac{Q}{2\pi k} \left[ W\left(\frac{r^2}{4at_0}\right) - W\left(\frac{r^2}{4a(t_0+t_r)}\right) + W\left(\frac{r^2}{4at_r}\right) \right]. \quad (3.5.37)$$

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s_r(2m - s_r) = \frac{Q}{2\pi k} \ln \frac{2.25at'}{r^2} = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{2.25at'}{r^2}, \quad (3.5.38)$$

где t' – определяется по формуле (3.5.14).

## Графоаналитическая обработка

Зависимость в табл. 3.25 получена на основе уравнения (3.5.38).

Таблица 3.25

График	Способ	Зависимость
$s_r(2m-s_r)$ —lg $t'$	Прямая линия	$k = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$
$s_r(2m-s_r)$ -lg $\frac{t'}{r^2}$	» »	$k = \frac{0.366Q}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg 2.25$

Графоаналитическое определение параметров

# 3.5.2. Несколько опытных скважин с постоянным расходом

Здесь рассмотрены решения для восстановления уровня после одновременного начала работы опытных скважин и их одновременной остановки. Решения работают для условий схемы Тейса (разд. 2.1.1).

Кроме этого, в разделе приведены квазистационарные уравнения для восстановления уровня после асинхронного включения опытных скважин во время откачки. Нестационарные зависимости для этого случая могут быть получены на основе уравнения (3.3.6). Построение расчетных кривых восстановления уровня после группового асинхронного возмущения удобнее осуществлять на графике  $s - lg(t - t_0)$  аналогично восстановлению после откачки с переменным расходом (подробнее см. в 3.5.3).

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \left\{ Q_i \left[ W \left( \frac{r_i^2}{4a(t_0 + t_r)} \right) - W \left( \frac{r_i^2}{4at_r} \right) \right] \right\}.$$
 (3.5.39)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{t_0 + t_r}{t_r}, \qquad (3.5.40)$$

$$Q_i = \sum_{i=1}^{N} Q_i$$
 (3.5.41)

Для асинхронного начала работы опытных скважин и их одновременной остановки

$$s = \frac{1}{4\pi T} \ln t'_{A}, \qquad (3.5.42)$$

$$\ln t'_{A} = \sum_{i=1}^{N} Q_{i} \ln \frac{t_{0} - t_{i} + t_{r}}{t_{r}}.$$
(3.5.43)

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.26, получены на основе уравнений (3.5.40).

Таблица 3.26

	1	
График	Способ	Зависимость
$s - \lg \frac{t_0 + t_r}{t_r}$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q_t}{C}$
$(s_1-s_2)$ —lg $t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q_t}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$
$s - \lg t'_A$	Прямая линия (2)	$T = \frac{0.183}{C}$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему начальным значениям восстановления уровня; (2) – по данным восстановления уровня после асинхронного возмущения; приведенное расстояние определяется по зависимости (3.5.46).

#### Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от окончания откачки)

Уравнение нестационарной фильтрации:

$$s_{r} = \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} \left\{ Q_{i} \left[ W \left( \frac{r_{i}^{2}}{4at_{0}} \right) - W \left( \frac{r_{i}^{2}}{4a(t_{0} + t_{r})} \right) + W \left( \frac{r_{i}^{2}}{4at_{r}} \right) \right] \right\}.$$
 (3.5.44)

Уравнение для квазистационарного периода:

$$s_r = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'}{r'^2}, \qquad (3.5.45)$$

$$\ln r' = \frac{1}{Q_i} \sum_{i=1}^{N} (Q_i \ln r_i), \qquad (3.5.46)$$

где  $Q_t$  – сумма расходов всех опытных скважин (3.5.41); t' определяется по формуле (3.5.14).

Для асинхронного начала работы опытных скважин и их одновременной остановки

$$s_r = \frac{Q_t}{4\pi T} \ln \frac{2.25at'_A}{r'^2}, \qquad (3.5.47)$$

$$\ln t'_{A} = \frac{1}{Q_{i}} \sum_{i=1}^{N} Q_{i} \ln \frac{(t_{0} - t_{i})t_{r}}{t_{0} - t_{i} + t_{r}}, \qquad (3.5.48)$$

где r' определяется по формуле (3.5.46).

## Графоаналитическая обработка

Зависимости, приведенные в табл. 3.27, получены на основе уравнений (3.5.45) и (3.5.47).

Таблица 3.27

График	Способ	Зависимость
$s_r - \lg t'$	Прямая линия	$T = \frac{0.183Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r'^2}{2.25}$
$s_r - \lg r'$	» »	$T = \frac{0.366Q_t}{C} , \ \lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t')$
$s_r - \lg \frac{t'}{r'^2}$	» »	$T = \frac{0.183Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$
$\left(s_{r,1}-s_{r,2}\right)-\lg t_r$	Горизонтальная прямая линия (1)	$T = \frac{Q_t}{2\pi \cdot A} \ln \frac{r_2'}{r_1'}$
$s_r - \lg t'_A$	Прямая линия (2)	$T = \frac{0.183Q_t}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r'^2}{2.25}$
$s_r - \lg r'$	То же	$T = \frac{0.366Q_t}{C}$ , $\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t'_A)$
$s_r - \lg \frac{t'_A}{{r'}^2}$	» »	$T = \frac{0.183Q_r}{C}$ , $\lg a = \frac{A}{C} - \lg(2.25)$

Графоаналитическое определение параметров

П р и м е ч а н и е. (1) – по прямолинейному участку, отвечающему конечным значениям восстановления уровня; (2) – по данным восстановления уровня после асинхронного возмущения. На графике разности понижений формула определения проводимости не зависит от синхронности возмущения.

## 3.5.3. Переменный расход

На примере схемы Тейса (см. 2.1.1) в разделе показаны возможности программного комплекса ANSDIMAT и возникающие при этом проблемы при обработке данных восстановления уровня в наблюдательной скважине после откачки с переменным расходом из одной или нескольких опытных скважин.

## Базовые аналитические зависимости (изменение уровня отсчитывается от начала откачки)

## Уравнение нестационарной фильтрации

Аналитические нестационарные зависимости для обработки опробования с переменным расходом описываются уравнениями (3.4.2) и (3.4.6). Для расчета восстановления уровня в таком эксперименте в уравнениях добавляется еще одна ступень с нулевым значением расхода. Подбор фильтрационных параметров осуществляется на всех графиках, доступных для выбранной схемы и условий проведения эксперимента, причем одновременно по фактическим замерам понижения и восстановления уровня.

Данные изменения уровня после остановки откачки на логарифмическом графике выглядят малоинформативными (см. рис. 3.8). Поэтому для обработки этого участка индикаторной кривой рекомендуется использовать график в координатах  $s - \lg(t - t_0)$ , который соответствует графику, построенному только по замерам восстановления уровня  $s - \lg t_r$ , где  $t_r = t - t_0$  – время от начала опробования минус длительность откачки (см. рис. 3.7, *a*).

## Уравнение для квазистационарного периода

Для откачки из одной опытной скважины

$$s = \frac{1}{4\pi T} \sum_{j=1}^{n_1} \left( Q_1^j - Q_1^{j-1} \right) \ln\left(t - t_1^j\right) - \frac{Q_1^{n_1}}{4\pi T} \ln t_r \qquad (3.5.49)$$

и для групповой откачки

$$s = \frac{1}{4\pi T} \left[ \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{n_i} \left( Q_i^{j} - Q_i^{j-1} \right) \ln\left(t - t_i^{j}\right) \right] - \frac{1}{4\pi T} \sum_{i=1}^{N} Q_i^{n_i} \ln t_r, \quad (3.5.50)$$

где  $n_i$  – количество скачков изменения расхода в *i*-й опытной скважине до начала восстановления уровня;  $Q_i^{n_i}$  – расход последней ступени в *i*-й опытной скважине перед остановкой откачки, м<sup>3</sup>/сут.

# Графоаналитическая обработка

Зависимость, приведенная в табл. 3.28, получена на основе уравнения (3.5.50).

Таблица 3.28

#### Графоаналитическое определение параметров

График	Способ	Зависимость
$s - \lg(t - t_0)$	Прямая линия	$T = \frac{0.183}{C} \sum_{i=1}^{N} \mathcal{Q}_i^{n_i}$

П р и м е ч а н и е. Для опробования с одной опытной скважиной формула расчета проводимости пласта упрощается:  $T = \frac{0.183Q_1^{n_1}}{C}$ .

# Глава 4

# СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ОПЫТНО-ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ОПРОБОВАНИЙ

В программном комплексе ANSDIMAT поиск фильтрационных параметров осуществляется графоаналитическими и аналитическими способами. Кроме того, для этих целей предусмотрено применение численного моделирования полевых экспериментов (см. разд. 1.9).

Графоаналитические способы основаны на преобразовании исходных аналитических зависимостей и на использовании индикаторных кривых. Они являются наиболее информативными и удобными способами.

Аналитические способы основаны на решении прямой или обратной задачи для поиска необходимых фильтрационных параметров с последующим визуальным сравнением фактической и расчетной кривых. Способ появился в результате развития вычислительной техники и требует точного решения специальных функций. Он становится незаменим при решении задач, основанных на сложных аналитических зависимостях.

Каждая расчетная гидрогеологическая схема требует своей методики интерпретации опытно-фильтрационных опробований и определенной последовательности в выборе способов обработки для наиболее оптимального и быстрого нахождения искомых параметров. Выбор способа во многом зависит от обрабатываемого временного участка индикаторной кривой – нестационарный, квазистационарный или стационарный режим фильтрации соответствует выбранному участку. Так, квазистационарный режим позволяет использовать графоаналитические способы, стационарный – графоаналитические способы для площадного прослеживания, а нестационарный – способы подбора параметров или эталонных кривых.

Длительность проведенной откачки в сложных водоносных комплексах может определять выбор расчетной схемы. Начальные временные участки индикаторных кривых разумнее (а иногда это единственно возможный вариант) обрабатывать по упрощенным схемам, например ограниченные в разрезе или в плане пласты – по аналогичным схемам в неограниченных условиях, слоистые системы – по схемам с меньшим количеством слоев. При достаточной длительности опробований также возможна обработка по упрощенным схемам с использованием приведенных коэффициентов.

# 4.1. Графоаналитические способы

Большинство функций, описывающих фильтрационный процесс, при некоторых значениях времени – обычно это соответствует началу квазистационарного режима – упрощаются до простых линейных уравнений. При этом их точность остается достаточно высокой. Данный подход позволяет получить осредненные результаты по одной или нескольким наблюдательным скважинам, используя выбранный временной интервал опробования. Такие способы применяются к тем расчетным схемам, аналитические решения для которых наиболее разработаны в настоящее время. Это самый удобный способ определения фильтрационных параметров, так как позволяет быстро находить заранее неизвестные параметры пласта.

В данном разделе подробно рассмотрены способы обработки на примере откачки с постоянным расходом в однородном изотропном напорном пласте (см. разд. 2.1.1).

## 4.1.1. Способ прямой линии

Способы прямой линии основаны на преобразовании исходных аналитических зависимостей к уравнениям прямой линии.

Логарифмическая аппроксимация уравнения Тейса (2.1.1) с учетом перехода к десятичному логарифму дает следующую зависимость для понижения уровня при наступлении квазистационарного режима:

$$s = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r^2}.$$
 (4.1.1)

Представляя уравнение (4.1.1) в различных формах (табл. 4.1), получим три способа определения фильтрационных параметров с помощью прямой линии: на графике временного, площадного и комбинированного прослеживания. По углу наклона прямой линии ( $\alpha$ ) и по величине, которую она отсекает на оси ординат (A) на одном из графиков (рис. 4.1), определяют проводимость пласта T и пьезопроводность пласта a.

Определение параметров по способу прямой линии в зависимости от вида прослеживания сведено в табл. 4.1.



Рис. 4.1. Определение параметров по способу прямой линии на графиках временно́го (*a*), площадного (*б*) и комбинированного (*в*) прослеживания.

Треугольниками и кружками показаны фактические замеры.

<b>^</b>		~	
ΠΠΔΠΔΠΔΗΙΙΔ	ΠΩΝΩΜΔΤΝΟΡ	TO CHOCODY	ппамои пинии
OUDCACACHERC	navameruvo		полжов липии

График, зависимости и	Прослеживание			
определяемые параметры	Временное (рис. 4.1, <i>a</i> )	Площадное (рис. 4.1, б)	Комбинированное (рис. 4.1, в)	
График	$s - \lg t$	$s - \lg r$	$s - \lg \frac{t}{r^2}$	
Форма записи уравнения (4.1.1)	(1)	(2)	(3)	
Линейная зависимость	$s = C \lg t + A$	$s = -C\lg r + A$	$s = C \lg \frac{t}{r^2} + A$	
Угловой коэффициент	$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg t_2 - \lg t_1}$	$C = \frac{s_1 - s_2}{\lg r_2 - \lg r_1}$	$C = \frac{s_2 - s_1}{\lg(t/r^2)_2 - \lg(t/r^2)_1}$	
Расчет проводимости, м <sup>2</sup> /сут	$T = \frac{0.183Q}{C}$	$T = \frac{0.366Q}{C}$	$T = \frac{0.183Q}{C}$	
Расчет пьезопровод- ности, м <sup>2</sup> /сут	$\lg a = \frac{A}{C} + \lg \frac{r^2}{2.25}$	$\lg a = 2\frac{A}{C} - \lg(2.25t)$	$\lg a = \frac{A}{C} - \lg 2.25$	

Примечание. C – угловой коэффициент прямой линии; A – величина, которую отсекает прямая линия на оси ординат. (1) –  $s = \frac{0.183Q}{T} \left( \lg t + \lg \frac{2.25a}{r^2} \right)$ , (2) –  $s = \frac{0.366Q}{T} \left( -\lg r + \lg \sqrt{2.25at} \right)$ , (3) –  $s = \frac{0.183Q}{T} \left( \lg \frac{t}{r^2} + \lg (2.25a) \right)$ .

## 4.1.2. Способ горизонтальной прямой линии

Используя уравнение для квазистационарного периода (4.1.1), рассмотрим систему для понижения уровня в двух наблюдательных скважинах:

$$\begin{cases} s_1 = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r_1^2} \\ s_2 = \frac{0.183Q}{T} \lg \frac{2.25at}{r_2^2} \end{cases} \Rightarrow s_1 - s_2 = \frac{0.366Q}{T} \lg \frac{r_2}{r_1}, \quad (4.1.2) \end{cases}$$



Рис. 4.2. Определение проводимости по способу горизонтальной прямой линии на графике временного прослеживания.

где  $s_1, s_2$  – понижения в первой и второй наблюдательных скважинах, м;  $r_1, r_2$  – расстояния от первой и второй наблюдательных скважин до опытной скважины, м.

Разность понижений в двух скважинах на этот период не зависит от времени. По величине *A* (рис. 4.2), которую отсекает прямая, параллельная оси абсцисс, определяется проводимость пласта

$$T = \frac{0.366Q}{A} \lg \frac{r_2}{r_1} \,. \tag{4.1.3}$$

Этот же способ применяется для схем со стационарным режимом фильтрации. Например, для откачки вблизи границы обеспеченного питания (см. 2.1.2.1). Определение проводимости в таком случае может осуществляться и по одной наблюдательной скважине на период стабилизации уровня.

## 4.1.3. Способ эталонной кривой

Способ эталонной кривой основан на логарифмировании исходной аналитической зависимости и на логарифмировании аргумента специальной функции, входящей в эту зависимость.

Рассмотрим систему уравнений (на примере решения 2.1.1):

$$\begin{cases} s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \\ u = \frac{r^2}{4at} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s = \lg \frac{Q}{4\pi T} + \lg W(u) \\ \lg \frac{1}{u} = \lg \frac{t}{r^2} + \lg(4a) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \lg s - \lg W(u) = \lg \frac{Q}{4\pi T} = D \\ \lg \frac{1}{u} - \lg \frac{t}{r^2} = \lg(4a) = E, \end{cases}$$

$$(4.1.4)$$



Рис. 4.3. Определение параметров по способу эталонной кривой на графике комбинированного прослеживания.

где  $D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$ ,  $E = \lg(4a) - сдвиг$  графиков фактической кривой и эталонной кривой по вертикали и горизонтали соответственно.

Из системы уравнений (4.1.4) видно, что график фактической кривой удобно строить в координатах  $\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$ , а график эталон-

ной кривой – в координатах  $\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$ . При этом координат-

ные оси графиков фактической и эталонной кривых будут сдвинуты по вертикали на величину D, а по горизонтали – на величину E (рис. 4.3). График фактической кривой здесь является графиком комбинированного прослеживания. Для расчетных схем, в которых не учитывается влияние границ, индикаторные кривые по разным наблюдательным скважинам должны совпадать.

По-разному представляя второе уравнение системы (4.1.4), получаем различные возможности использования способа эталонной кривой.

Для графика временного прослеживания фактических данных второе уравнение системы (4.1.4) можно записать в виде

$$u = \frac{r^2}{4at} \Longrightarrow \lg \frac{1}{u} = \lg t + \lg \frac{4a}{r^2} \Longrightarrow \lg \frac{1}{u} - \lg t = \lg \frac{4a}{r^2} = E, \quad (4.1.5)$$

и тогда график фактической кривой –  $\lg s - \lg t$ , эталонной –  $\lg W(u) - \lg(1/u)$ , а  $E = \lg(4a/r^2)$ .

Для графика площадного прослеживания фактических данных второе уравнение системы (4.1.4) следующее:

$$u = \frac{r^2}{4at} \Rightarrow \lg \sqrt{u} = \lg r - \lg \sqrt{4at} \Rightarrow \lg r - \lg \sqrt{u} = \lg \sqrt{4at} = E, (4.1.6)$$

и тогда график фактической кривой –  $\lg s - \lg r$ , эталонной –  $\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$ , а  $E = \lg \sqrt{4at}$ . В этих двух примерах (равенства (4.1.5) и (4.1.6)) величина  $D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$ .

Все возможные комбинации построения графиков эталонных и фактических кривых и формулы для определения фильтрационных параметров сведены в табл. 4.2.

#### Таблица 4.2

таолица для пос	просния прафиков этал	юнных и фактических	кривых

Способ обработки (прослеживание)	График кривой		Сдвиг осей	
	фактической	эталонной	ординат	абсцисс
Комбинированное	$\lg s - \lg \frac{t}{r^2}$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$		$E = \lg(4a)$
Временное	$\lg s - \lg t$	$\lg W(u) - \lg \frac{1}{u}$	$D = \lg \frac{Q}{4\pi T}$	$E = \lg \frac{4a}{r^2}$
Площадное	$\lg s - \lg r$	$\lg W(u) - \lg \sqrt{u}$		$E = \lg \sqrt{4at}$

#### 4.2. Способ биссектрисы

Способ биссектрисы состоит в графическом определении соответствия фактических и расчетных значений при правильно подобранном фильтрационном параметре. Для этого используется график отношения фактических изменений уровня в двух скважинах от отношения расчетных изменений уровня в этих же скважинах (рис. 4.4).

При наличии данных об изменении уровня в двух наблюдательных скважинах получаем систему уравнений для понижений в первой  $(s_1)$  и второй  $(s_2)$  скважинах (на примере уравнения 2.1.1):



Рис. 4.4. Пример определения параметров по способу биссектрисы.

*а* – график временного прослеживания для двух наблюдательных скважин; *б* – график для способа биссектрисы, построенный по этим скважинам. Точками показаны фактические замеры.

$$\begin{cases} s_1 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) \\ s_2 = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right)}{W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right)} \Rightarrow \frac{s_1}{s_2} = \frac{W(u_1)}{W(u_2)}, \quad (4.2.1)$$

где  $u_1, u_2$  – аргументы функции для первой и второй наблюдательных скважин.

Подбор пьезопроводности осуществляется способом биссектрисы на графике  $\frac{s_1}{s_2} - \frac{W(u_1)}{W(u_2)}$ . График, построенный в этих ко-

ординатах, представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат под углом  $45^{\circ}$  (рис. 4.4,  $\delta$ ). Это утверждение истинно при правильно подобранной величине пьезопроводности. В противном случае точки на графике будут отклоняться от прямолинейного участка. Способ удобен тем, что определение пьезопроводности не зависит от проводимости пласта и расхода опытной скважины.

Способ биссектрисы является графическим аналогом точечного способа получения параметров по отношению понижений в двух наблюдательных скважинах.

При наличии одной наблюдательной скважины и данных об изменении уровня в ней на период откачки и период восстанов-

ления вместо системы уравнений (4.2.1) можно записать следующую систему:

$$\begin{cases} s_{0} = \frac{Q}{4\pi T} W\left(\frac{r}{4at_{0}}\right) \\ s = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r}{4a(t_{0} + t_{r})}\right) - W\left(\frac{r}{4at_{r}}\right) \right] \Rightarrow \frac{s_{0}}{s} = \frac{W\left(\frac{r}{4at_{0}}\right)}{W\left(\frac{r}{4a(t_{0} + t_{r})}\right) - W\left(\frac{r}{4at_{r}}\right)},$$

$$(4.2.2)$$

где  $s_0$  – понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;  $t_0$  – длительность откачки, сут;  $t_r$  – время от начала восстановления, сут. В последнем случае график строится в координатах  $\frac{s_0}{s} - \frac{W(u)}{W'(u)}$ , где W'(u) – выражение в квадратных скобках второго уравнения системы (4.2.2). Здесь более наглядно строить график в билогарифмических координатах.

## 4.3. Аналитические способы

Аналитические способы заключаются в совмещении кривых прослеживания: решение прямой или обратной задачи для поиска необходимых фильтрационных параметров с последующим визуальным сравнением фактической и расчетной кривых.

## 4.3.1. Решение прямой задачи: способ «ручного» подбора параметров

Способ используется на графиках временного, площадного или комбинированного прослеживания и применяется для всех рассматриваемых расчетных схем. Данный способ решает прямую фильтрационную задачу и позволяет подбирать искомые коэффициенты путем визуального сравнения графика фактических изменений уровня с теоретической кривой (рис. 4.5), рассчитанной по соответствующей зависимости, для заданных технических величин опробования (расход, расстояние до эксплуатационной скважины, время и др.). Способ подбора дает возможность быстро и наглядно проводить



Рис. 4.5. Определение параметров способом подбора. Сплошная линия – расчетная кривая; точки – фактические замеры.

анализ чувствительности выбранной схемы к различным фильтрационным и техническим параметрам, а также сравнивать результаты, полученные по разным расчетным схемам. «Ручной» подбор становится незаменимым способом обработки опытнофильтрационных опробований при сложной аналитической зависимости расчетной схемы или при обработке групповой откачки с переменным расходом, где не существует приемлемого графоаналитического способа.

При такой обработке надо иметь в виду, что в ряде фильтрационных схем, где подбор осуществляется более чем по двум параметрам, возможна неоднозначность найденных коэффициентов. В первую очередь это относится к схемам с профильной анизотропией.

Особенностью «ручного» подбора для схем, использующих принцип суперпозиции (полуограниченные, ограниченные пласты или групповые откачки), является то, что на графиках площадного прослеживания трудно оценивать понижение в произвольной точке опробуемого пласта, так как понижение зависит не только от расстояния до опытной скважины, но и от расстояния до границы фильтрационного потока. Поэтому подбор может осуществляться только по точкам, в которых расположены наблюдательные скважины.

Подбор параметров позволяет осуществлять прогноз изменения уровня во времени в данной точке (на графике временно́го прослеживания) или в пространстве на любой момент времени (на графике площадного прослеживания). Это особенно актуально при вероятных изменениях в производительности опытных скважин, когда нет простых аналитических решений для быст-
рой оценки влияния опытного возмущения. Подбор параметров на графике комбинированного прослеживания, когда на один график наложены индикаторные кривые по нескольким наблюдательным скважинам, дает возможность оценить степень неоднородности или анизотропию опробуемого участка.

Как разновидность способа «ручного» подбора используется подбор параметров по изменению уровня в двух наблюдательных скважинах. Для этого строятся графики временно́го прослеживания по отношению понижений или разности понижений. Способы отношения и разности понижений в данном виде являются некоторым аналогом точечных способов, которые широко использовались ранее, с той разницей что исследователь получает осредненные параметры по всему выбранному временно́му интервалу, а не по одному или двум замерам.

Способ отношения понижений. На графике временного прослеживания строится график отношения понижений по двум выбранным наблюдательным скважинам. Параметры подбираются аналогично способу «ручного» подбора. Преимущество этого способа перед предыдущим в том, что при откачке с одной опытной скважиной и постоянным расходом исходное уравнение преобразуется к уравнению с одним неизвестным (обычно пьезопроводность), из подбора исключается ряд величин (расход, проводимость), а подбор ведется по одному параметру (для некоторых схем по двум):

$$\frac{s_1}{s_2} = W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) / W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right).$$
(4.3.1)

Для откачки с постоянным понижением (см. разд. 3.1) из подбора исключается понижение в опытной скважине.

График  $s_1/s_2$ —lgt удобнее строить для наблюдательных скважин, находящихся на расстояниях  $r_1 > r_2$ , т.е. за величину  $s_2$  надо принимать понижения в ближней к опытной скважине точке наблюдения.

Способ разности понижений. В основном способ используется для графоаналитической обработки (см. 4.1.2). Но и с его помощью можно осуществлять подбор параметров:

$$s_1 - s_2 = \frac{Q}{4\pi T} \left[ W\left(\frac{r_1^2}{4at}\right) - W\left(\frac{r_2^2}{4at}\right) \right] \approx \frac{Q}{2\pi T} \ln \frac{r_2}{r_1}.$$
 (4.3.2)

Из уравнения (4.3.2) видно, что для нестационарного периода понижение зависит от проводимости и пьезопроводности, а для квазистационарного – только от проводимости пласта. График для способа разности понижений строится в координатах  $(s_1 - s_2)$ —lgt.

## 4.3.2. Решение обратной задачи: способ «автоматического» подбора параметров

Способ «автоматического» подбора параметров осуществляется по выбранным экспериментальным данным одной или нескольких наблюдательных скважин минимизацией отклонения этих данных от аналитической зависимости. В программном комплексе ANSDIMAT для решения обратной задачи используются метод наименьших квадратов и специализированная компьютерная программа UCODE (Poeter, Hill, 1998).

Ниже приводится пример использования метода наименьших квадратов. Применение программы UCODE для определения фильтрационных параметров по фактическим данным изменения уровня даны в описании программного комплекса (см. 1.7.4.2).

Процедура применения данного способа для метода наименьших квадратов (на примере схемы неограниченного напорного пласта (разд. 2.1)) выглядит следующим образом.

Пусть понижение  $s_i$  в наблюдательной скважине, находящейся на расстоянии r от опытной скважины, в определенный момент времени  $t_i$  определяется по уравнению Тейса (2.1.1)

$$s_i = c_k W \left( \frac{r^2}{4at_i} \right), \tag{4.3.3}$$

где  $c_k = Q/(4\pi T)$  – постоянная величина, зависящая от расхода опытной скважины и проводимости водоносного пласта.

Рассмотрим сумму квадратов погрешностей фактических замеров и расчетных значений при некоторых неизвестных параметрах *а* и *c*<sub>*k*</sub>, которые подлежат определению

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W \left( \frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 = f(a, c_k), \qquad (4.3.4)$$

289

где *n* – количество фактических замеров, которые участвуют в решении обратной задачи.

Задача сводится к нахождению таких значений параметров *a* и  $c_k$ , при которых погрешность имеет минимум. Продифференцировав функцию  $f(a, c_k)$  по каждому неизвестному параметру и приравняв частные производные к нулю, получим линейную систему из двух уравнений с двумя неизвестными *a* и  $c_k$ :

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W \left( \frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 \right\}' = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial c_k} = \left\{ \sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W \left( \frac{r^2}{4at_i} \right) \right]^2 \right\}' = 0. \end{cases}$$

$$(4.3.5)$$

Далее найдем производные:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial a} = 2\sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W(u_i) \right] \left( -c_k \right) \frac{\partial W(u_i)}{\partial a} = 0, \\ \frac{\partial f}{\partial c_k} = 2\sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W(u_i) \right] \left[ -W(u_i) \right] = 0, \end{cases} \Longrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W(u_i) \right] \frac{e^{-u_i}}{a} = 0, \\ \sum_{i=1}^{n} \left[ s_i - c_k W(u_i) \right] W(u_i) = 0, \end{cases}$$

$$(4.3.6)$$

где 
$$u_i = \frac{r^2}{4at_i}$$
.

Окончательно система уравнений для определения искомых фильтрационных параметров выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} \left[ s_{i} \frac{1}{a} \exp(-u_{i}) \right] - \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ s_{i} W(u_{i}) \right]}{\sum_{i=1}^{n} \left[ W(u_{i}) \right]^{2}} \sum_{i=1}^{n} \left\{ W(u_{i}) \frac{1}{a} \exp(-u_{i}) \right\} = 0, \\ c_{k} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left[ s_{i} W(u_{i}) \right]}{\sum_{i=1}^{n} \left[ W(u_{i}) \right]^{2}}, \end{cases}$$

$$(4.3.7)$$

где пьезопроводность *а* находится из первого уравнения системы (4.3.7), например «методом вилки» или итерационно, а параметр  $c_k$  (и, следовательно, проводимость пласта T) вычисляется прямым расчетом из второго уравнения системы (4.3.7). Подбор пьезопроводности осуществляется с любой заданной точностью.

В общем виде система уравнений для произвольной расчетной схемы с любым количеством опытных и наблюдательных скважин и со скачкообразным изменением расхода в каждой опытной скважине записывается как

$$\begin{cases} \sum_{m=1}^{N_0} \sum_{i=1}^n s_i^m \Sigma' - c_k \sum_{m=1}^{N_0} \sum_{i=1}^n \Sigma \times \Sigma' = 0, \\ \sum_{m=1}^{N_0} \sum_{i=1}^n s_i^m \Sigma - c_k \sum_{m=1}^{N_0} \sum_{i=1}^n \Sigma^2 = 0, \end{cases}$$
(4.3.8)  
rge  $\Sigma = \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{k=1}^{n_j} \Delta Q_j^k F(a, t_i^k, r_j^m); \quad \Sigma' = \sum_{j=1}^{N+M} \sum_{k=1}^{n_j} \Delta Q_j^k \frac{\partial F(a, t_i^k, r_j^m)}{\partial a}; \quad c_k = 0$ 

постоянная величина, которая зависит от выбранной схемы (как правило, в нее входит проводимость или коэффициент фильтрации водоносного пласта); i = 1, 2, 3, ..., n – номер замера; i = 1, 2, 3, ..., N + M – номер опытной скважины (реальной и фиктивной);  $k = 1, 2, 3, ..., n_i$  – количество скачков изменения расхода в *j*-й опытной (реальной или фиктивной) скважине;  $F(a,t_{i},r_{i}^{m})$  – функция, описывающая расчетную схему;  $s_{i}^{m}$  – значение *i*-го фактического замера в *m*-й наблюдательной скважине, м; М – количество фиктивных скважин для ограниченных и полуограниченных пластов (для неограниченных пластов M = 0);  $m = 1, 2, 3, ..., N_0$  – номер наблюдательной скважины; N – количество опытных скважин; N<sub>0</sub> – количество наблюдательных скважин, по которым ведется подбор; *n* – количество фактических замеров, по которым ведется подбор (в каждой наблюдательной скважине может быть разное);  $n_i$  – количество скачков изменения расхода в *j*-й опытной (реальной или фиктивной) скважине, в каждой из них и на каждый момент времени может быть разное;  $\Delta Q_i^k - k$ -е изменение расхода в *j*-й опытной (реальной или фиктивной) скважине, м<sup>3</sup>/сут;  $r_i^m$  – расстояние от *m*-й наблюдательной скважины до *j*-й опытной (реальной или фиктивной) скважины, м;  $t_i^k$  – время *i*-го замера от начала *k*-го скачка (изменения расхода), сут.

Как и для системы уравнений (4.3.7), решение первого уравнения системы (4.3.8) основано на приближенном вычислении корня. Из него находят пьезопроводность опробуемого пласта с любой заданной точностью. Полученное значение подставляют во второе уравнение системы (4.3.8), откуда прямым расчетом определяют проводимость или коэффициент фильтрации:

$$c_{k} = \sum_{m=1}^{N_{0}} \sum_{i=1}^{n} s_{i}^{m} \Sigma / \sum_{m=1}^{N_{0}} \sum_{i=1}^{n} \Sigma^{2} .$$
(4.3.9)

Перед началом процедуры «автоматического» подбора желательно исключить из расчета заведомо некондиционные по каким-либо причинам (технические факторы или ошибки исследователя) замеры. В противном случае конечные результаты могут быть сильно искажены. Рекомендуется по подобранным параметрам построить расчетную кривую на графике временного, площадного или комбинированного прослеживания и визуально сравнить фактические и теоретические данные.

## Фильтрационные параметры

Одна из главных задач проведения опытно-фильтрационных опробований – это определение фильтрационных параметров водоносных пластов и комплексов на основе данных об изменении уровня подземных вод.

Основные фильтрационные параметры, их обозначения, размерности и краткие определения приводятся ниже. Терминология и определения взяты из учебных и научных публикаций.

Коэффициент фильтрации (hydraulic conductivity), k, м/сут: по горизонтали –  $k_r$ ; по вертикали –  $k_s$ .

Скорость фильтрации при единичном градиенте напора; зависит от геометрии порового пространства и от гидродинамических свойств жидкости: плотности и вязкости (Шестаков, 1973). Характеризует способность данного грунта пропускать ту или иную жидкость (Мироненко, 1996).

Коэффициент фильтрации определяется равенством

$$k = \frac{k_0 \rho g}{\mu},\tag{\Pi1.1}$$

где  $k_0$  – проницаемость (свойство пористой среды пропускать через себя жидкость, газ или газожидкостную смесь под воздействием приложенного перепада давлений (Пыхачев, Исаев, 1973)), не зависит от свойств фильтрующей жидкости и определяется геометрией порово-трещинного пространства (Гавич, 1988), м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>; g – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\mu$  – динамическая вязкость жидкости, кг/м·с. Коэффициент фильтрации является коэффициентом пропорциональности между скоростью фильтрации и градиентом напора. Это соотношение выражается законом Дарси (Darcy, 1856):

$$v = k \frac{\Delta H}{L}, \qquad (\Pi 1.2)$$

где v – скорость фильтрации, м/сут;  $\Delta H$  – изменение напора, м; L – длина пути фильтрации, м.

Если выразить скорость фильтрации через отношение расхода потока к площади его поперечного сечения

$$v = \frac{Q}{w}, \qquad (\Pi 1.3)$$

то закон Дарси запишется в виде

$$Q = kw \frac{\Delta H}{L}, \qquad (\Pi 1.4)$$

где Q – расход потока, м<sup>3</sup>/сут; w – площадь поперечного сечения, м<sup>2</sup>.

**Проводимость** (transmissivity, transmissibility), T = km, м<sup>2</sup>/сут.

Расход жидкости через единицу поперечного сечения водоносного пласта мощностью *m* при единичном напорном градиенте (Боревский и др., 1973). Для многослойного пласта, состоящего из *n* слоев, проводимость

$$T = \sum_{i=1}^{n} k_{i} m_{i} , \qquad (\Pi 1.5)$$

где n – количество слоев;  $k_i$  – коэффициент фильтрации *i*-го слоя, м/сут;  $m_i$  – мощность *i*-го слоя, м.

Пьезопроводность (hydraulic diffusivity),  $a = T / S = k / S_s$ , м<sup>2</sup>/сут.

Показатель скорости изменения напора (гидростатического давления) в пласте (Мироненко, 1996).

**Уровнепроводность**,  $a = k\overline{m} / S_v$ , м<sup>2</sup>/сут.

Отражает скорость распространения возмущений в безнапорных пластах (Мироненко, 1996);  $\overline{m}$  – средняя обводненная мощность безнапорного пласта, м.

Водоотдача, упругая водоотдача, упругая емкость пласта (storage coefficient, storativity),  $S = S_s m$ , безразмерный.

Характеризует изменение водонасыщенности горных пород, обусловленное их деформациями, возникающими при изменении напряженного состояния пласта вследствие действия гидродинамических факторов – изменение напора, водоотбора и т.п. (Шестаков, 1973). Для многослойного пласта, состоящего из *n* слоев, водоотдача

$$S = \sum_{i=1}^{n} S_{si} m_i , \qquad (\Pi 1.6)$$

где n – количество слоев;  $S_{si}$  – водоотдача *i*-го слоя;  $m_i$  – мощность *i*-го слоя, м.

Удельная водоотдача, упругая емкость породы (specific storage),  $S_s$ , 1/M.

Изменение объема воды, отнесенное к объему породы, при единичном изменении напора (Шестаков, 1973). Удельная водоотдача определяется равенством

$$S_s = \gamma_0 \left[ \frac{n}{E} + (1 - n)a_c \right], \qquad (\Pi 1.7)$$

где  $\gamma_0$  – объемная масса жидкости, Н/м<sup>3</sup>; *n* – пористость;  $a_c$  – коэффициент сжимаемости породы, показатель интенсивности уменьшения объема пор по мере нагружения (Мироненко, 1996), 1/Па;  $E = 1/\beta_w \approx 2.2 \cdot 10^9$  Па – объемный модуль Юнга (модуль упругости воды), Па;  $\beta_w$  – коэффициент сжимаемости воды или объемного сжатия воды, относительное изменение плотности воды при единичном изменении давления (Шестаков, 1995), 1/Па.

Гравитационная водоотдача, гравитационная емкость (specific yield),  $S_y$ , безразмерный.

Отношение изменения объема воды в гравитационной зоне потока к изменению объема этой зоны (Шестаков, 1973).

#### Параметр перетекания (leakage factor), В, м.

Комплексный параметр, который зависит от проводимости основного водоносного пласта, коэффициента фильтрации и мощности разделяющих слабопроницаемых слоев (Боревский и др., 1973). Чем меньше величина *B*, тем интенсивнее, при прочих равных условиях, идет перетекание. Значение параметра перетекания определяется количеством питающих слоев. При наличии одного питающего слоя, когда вода поступает только через слабопроницаемый слой, находящийся в кровле, или только через слой, находящийся в подошве водоносного пласта

$$B = \sqrt{\frac{Tm'}{k'}} ; \qquad (\Pi 1.8)$$

а при наличии двух питающих слоев, когда вода поступает через слабопроницаемые слои, находящиеся в кровле и подошве водоносного пласта

$$B = \sqrt{\frac{Tm'm''}{k'm' + k''m'}},$$
 (II1.9)

где T – проводимость водоносного пласта, м<sup>2</sup>/сут; k', k'' – коэффициенты фильтрации слабопроницаемых слоев, м/сут; m', m'' – мощности слабопроницаемых слоев, м.

Коэффициент профильной анизотропии,  $\chi$ ,  $\chi = \sqrt{k_z/k_r}$ , безразмерный.

Корень из отношения коэффициента фильтрации по вертикали ( $k_z$ ) к коэффициенту фильтрации по горизонтали ( $k_r$ ).

#### Сопротивление русла реки, $\Delta L$ , м.

Обобщенный гидрогеологический параметр ложа водоема, характеризующий его фильтрационное сопротивление; зависит от строения ложа водоема (его геометрии и фильтрационной неоднородности) (Шестаков, 1995).

### Границы фильтрационного потока

В Приложении приводятся схематичные рисунки водоносных пластов, имеющих плановые или профильные границы фильтрационного потока, а также формулы для расчета расстояний от точек наблюдения за изменением уровня до фиктивных скважин.

#### Полуограниченные в плане пласты

Для полуограниченных в плане водоносных пластов рассматриваются два типа граничных условий: граница обеспеченного питания и непроницаемая граница (рис. П2.1).

Горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины, в которой определяется понижение, до фиктивной (рис. П2.2), полученной в результате отражения опытной скважины от плановой прямолинейной границы, рассчитывается по следующей зависимости:

$$\rho = \sqrt{\left(L_w + L_p\right)^2 + y^2} = \sqrt{r^2 + 4L_w L_p} , \qquad (\Pi 2.1)$$



Рис. П2.1. Схематичный план полуограниченного пласта. *a* – граница обеспеченного питания; *б* – непроницаемая граница.



Рис. П2.2. Горизонтальные расстояния до границы и до фиктивной скважины. Знаки фиктивного расхода над фиктивной скважиной: «–» – для границы обеспеченного питания, «+» – для непроницаемой границы.

где  $L_p$ ,  $L_w$  – расстояние от наблюдательной и опытной скважин до плановой границы, м;

$$y = \sqrt{r^2 - (L_w - L_p)^2}$$
(II2.2)

 проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной на линию границы, м.

#### Ограниченные в плане пласты

Для ограниченных в плане водоносных пластов двумя параллельными прямолинейными линиями рассматриваются следующие граничные условия: две границы обеспеченного питания, две непроницаемые границы и смешанные граничные условия (рис. П2.3).

Горизонтальные расстояния от наблюдательной скважины до фиктивных скважин (рис. П2.4), полученных в результате отражения опытной скважины от левой ( $\rho_1^j$ ) и от правой ( $\rho_2^j$ ) границ, рассчитываются по следующим зависимостям:

$$\rho_{1}^{j} = \sqrt{\left(L_{p} + L_{w} + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L'_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2L_{w}\right)^{2} + y^{2}}, \qquad (\Pi 2.3)$$



Рис. П2.3. Схематичный план пласта-полосы.

a – две границы обеспеченного питания;  $\delta$  – две непроницаемые границы; s – смешанные граничные условия.



Рис. П2.4. Схематичный план пласта-полосы с горизонтальными расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивных.

Под фиктивными скважинами – знаки фиктивных расходов: первый – для границ обеспеченного питания, второй – для непроницаемых границ, третий – для смешанных граничных условий.

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L'_p + L'_w + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_w + \sum_{j_0=3,5,\dots}^j 2L'_w\right)^2 + y^2}, \qquad (\Pi 2.4)$$

где j – номер фиктивной скважины для ограниченного пласта;  $j_0$  – номер суммы при определении расстояния до *j*-й фиктивной скважины; L – ширина пласта-полосы, м;  $L'_p = (L - L_p)$ ,  $L'_w = (L - L_w)$  – расстояние от наблюдательной и опытной скважин до второй границы пласта-полосы, м.

#### Несовершенная скважина в полуограниченном пласте

Для схемы точечного источника в полуограниченном водоносном пласте рассматриваются плановая граница (I или II рода) и непроницаемая, расположенная в кровле или подошве водоносного пласта (рис. П2.5).

Для точечного источника в полуограниченном в плане пласте (рис. П2.5, *a*, *б*) расстояние до фиктивной скважины равно:

$$\rho = \sqrt{4L_w L_p + d^2} , \qquad (\Pi 2.5)$$

где  $d = \sqrt{r^2 + z^2}$  – расстояние между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин, м; *z* – расстояние по вертикали между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин, м.

Для точечного или линейного источника в полуограниченном в разрезе пласте (рис. П2.5, *в*, *г*) расстояние до фиктивной скважины равно

$$\rho = \sqrt{r^2 + (L_{T_p} + L_{T_w})^2}$$
или  $\rho = \sqrt{r^2 + (L_{B_p} + L_{B_w})^2}, \quad (\Pi 2.6)$ 



Рис. П2.5. Схема точечного источника в полуограниченном пласте в плане  $(a, \delta)$  и разрезе (b, c) с расстояниями от наблюдательной скважины до фиктивной.

*а* – граница обеспеченного питания в плане; *б* – непроницаемая граница в плане; *в*, *г* – ненепроницаемая граница в кровле (*в*) и подошве (*г*) водоносного пласта.

где  $L_{T_p}$ ,  $L_{T_w}$  – вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта до середины фильтра наблюдательной и опытной скважин, м;  $L_{B_p}$ ,  $L_{B_w}$  – вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной и опытной скважин до подошвы пласта, м.

#### Несовершенная скважина в ограниченном пласте

Несовершенные по степени вскрытия скважины (линейный и точечный источник), как правило, рассматриваются в ограниченных в плане или разрезе водоносных пластах (рис. П2.6). Для плановых границ учитываются все условия, изученные для совершенных скважин (рис. П2.3), а для разреза - только непроницаемые границы, находящиеся в кровле и подошве пласта. Исключение составляет схема точечного источника (см. разд. 2.2), расстояния до фиктивных скважин у которого рассчитываются иначе.

Для точечного источника в ограниченном в плане пласте (рис. П2.6, *в*) расстояние до фиктивной скважины равно:

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_p + L_w + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2(L - L_w) + \sum_{j_0=3,5,\dots}^j 2L_w\right)^2 + d^2 - (L_w - L_p)^2}, (\Pi 2.7)$$



Рис. П2.6. Схемы для определения расстояний до фиктивных скважин для точечного и линейного источников.

*a* – разрез для линейного источника; *б*, *в* – трехмерная схема для точечного источника, ограниченного в разрезе (*б*) и в плане (*в*). Пояснения к знакам расхода см. на рис. П2.4.

$$\rho_{2}^{j} = \sqrt{\left(2L - \left(L_{p} + L_{w}\right) + \sum_{j_{0}=2,4,\dots}^{j} 2L_{w} + \sum_{j_{0}=3,5,\dots}^{j} 2\left(L - L_{w}\right)\right)^{2} + d^{2} - \left(L_{w} - L_{p}\right)^{2}}$$
(II2.8)

Для точечного источника в ограниченном в разрезе пласте (рис. П2.6, *б*) расстояние до фиктивной скважины равно:

$$\rho_1^j = \sqrt{\left(L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_{B_w} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^j 2L_{T_w}\right)^2 + r^2}, \quad (\Pi 2.9)$$

$$\rho_2^j = \sqrt{\left(L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^j 2L_{Bw}\right)^2 + r^2} . \quad (\Pi 2.10)$$

Вертикальные расстояния от открытой части пьезометра или середины фильтра несовершенной наблюдательной скважины (схема линейного источника) до середины фильтра фиктивных скважин (рис. П2.6, *a*), полученных в результате отражения опытной скважины от кровли  $z_1^j$  и от подошвы  $z_2^j$  равны:

$$z_1^j = L_{T_p} + L_{T_w} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^j 2L_{B_w} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^j 2L_{T_w} , \qquad (\Pi 2.11)$$

$$z_2^{j} = L_{Bp} + L_{Bw} + \sum_{j_0=2,4,\dots}^{j} 2L_{Tw} + \sum_{j_0=3,5,\dots}^{j} 2L_{Bw} .$$
(II2.12)

## Список решений

В табл. П1 приведен полный список нестационарных аналитических решений, реализованных в программном комплексе ANSDIMAT. Ссылки даны на уравнения фильтрации, описывающие изменение уровня в водоносных пластах при откачке из одной опытной скважины с постоянным расходом (за исключением откачки с постоянным понижением и экспресс-опробований). На их основе строятся многочисленные решения для восстановления уровня, групповой откачки и переменного расхода.

Данные функциональные зависимости участвуют в определении фильтрационных параметров решением прямой или обратной задачи. Их преобразование и аппроксимация позволяют применять графоаналитические зависимости.

Квазистационарные и стационарные решения, которые участвуют в обработке опытных опробований способом прямой линии, даны в гл. 2 и 3 для каждой расчетной схемы.

Таблица П1

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
1. Схема Тейса			
Неограничен- ный в плане пласт 2. I ной св емкос	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны (Тейс)</li> </ol>	Т, а	2.1.1
	<ol> <li>Понижение в наблюдатель- ной скважине (решение Менча с емкостью опытной скважины)</li> </ol>	$T, a, r_c, *$ $k_{skin}, m_{skin}$	2.1.2

Список решений и определяемые параметры

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
Неограничен- ный в плане пласт	3. Понижение в опытной скважине (решение Менча)	$T, a, r_c,$ $k_{ m skin}, m_{ m skin}$	2.1.3
	<ol> <li>Понижение в наблюда- тельной скважине (решение Пападопулоса с емкостью опытной скважины)</li> </ol>	$T, a, r_c$	2.1.4
	5. Понижение в опытной скважине (решение Пападопу- лоса)	$T, a, r_c$	2.1.6
	<ol> <li>6. Планово-анизотропный водоносный пласт</li> </ol>	$T_x, T_y, S, \theta$	2.1.8
Полуограни- ченный в плане пласт: граница I рода	Функция влияния скважины (Тейс): суперпозиция	T, a	2.1.10
Полуограни- ченный в плане пласт: граница II рода	То же	T, a	2.1.12
Пласт-полоса: границы I рода	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны (Тейс): суперпозиция</li> </ol>	T, a	2.1.14
	2. Функция Грина	Т, а	2.1.15
	3. Функция Грина (из функ- ции Грина для пласта с перете- канием)	Т, а	2.1.16
Пласт-полоса: границы II	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны (Тейс): суперпозиция</li> </ol>	T, a	2.1.21
рода	2. Функция Грина	Т, а	2.1.22
	3. Функция Грина (из функ- ции Грина для пласта с перете- канием)	Т, а	2.1.23
Пласт-полоса: границы I и II	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны (Тейс): суперпозиция</li> </ol>	T, a	2.1.24
рода	2. Функция Грина	Т, а	2.1.25

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
2. Точечный ис	точник: напорный пласт		
Неограничен- ный в плане и разрезе пласт	Дополнительный интеграл вероятности	$k_r, k_z, a$	2.2.2
Полуограни- ченные в плане или разрезе пласты	То же	$k_r, k_z, a$	2.2.6 2.2.8
Ограниченные в плане или разрезе пласты	» »	$k_r, k_z, a$	2.2.11– 2.2.13
3. Линейный и	сточник: напорный пласт		
Неограничен- ный в плане и	<ol> <li>Понижение в пьезометре (упрощенное решение)</li> </ol>	$k_r, k_z, a$	2.3.4
разрезе пласт	2. Понижение в пьезометре (полное решение)	$k_r, k_z, a$	2.3.3
	<ol> <li>Понижение в наблюда- тельной скважине</li> </ol>	$k_r, k_z, a$	2.3.1
Ограниченный в разрезе пласт	1. Понижение в пьезометре: суперпозиция (2.3.4)	$k_r, k_z, a$	2.3.10
	2. Понижение в пьезометре (решение Хантуша)	$k_r, k_z, a$	2.3.11
	3. Понижение в наблюдатель- ной скважине (решение Хантуша)	$k_r, k_z, a$	2.3.12
	4. Понижение в наблюдатель- ной скважине (решение Менча)	$k_r, k_z, a$	2.3.13
	<ol> <li>Лонижение в пьезометре (решение Менча)</li> </ol>	$k_r, k_z, a$	2.3.13
	<ol> <li>Понижение в наблюдатель- ной скважине (решение Менча с емкостью опытной скважины)</li> </ol>	$k_r, k_z, a, *$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.3.14
	7. Понижение в пьезометре (решение Менча с емкостью опытной скважины)	$\frac{k_r, k_z, a,}{r_c, k_{\rm skin}, m_{\rm skin}} *$	2.3.14
	8. Понижение в опытной скважине (решение Менча)	$k_r, k_z, a,$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.3.15

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
Полуограни- ченные в раз- резе или плане пласты	Понижение в пьезометре: суперпозиция (2.3.4)	$k_r, k_z, a$	2.3.6, 2.3.8
Ограниченные в плане пласты	То же	$k_r, k_z, a$	2.3.16– 2.3.18
4. Безнапорны	й пласт		
Неограничен- ный в плане пласт	<ol> <li>Понижение в наблюда- тельной скважине (решение Ньюмана)</li> </ol>	$k_r, k_z, S, S_y$	2.4.1
	2. Понижение в пьезометре (решение Ньюмана)	$k_r, k_z, S, S_y$	2.4.1
	<ol> <li>Понижение в наблюда- тельной скважине (решение Болтона)</li> </ol>	$k_r, S, S_y$	2.4.10
	4. Понижение уровня грун- товых вод (решение Болтона)	$k_r, S_y$	2.4.17
	<ol> <li>Понижение в наблюда- тельной скважине (решение Менча)</li> </ol>	$k_r, k_z, S, S_y$	2.4.19
	<ol> <li>Понижение в пьезометре (решение Менча)</li> </ol>	$k_r, k_z, S, S_y$	2.4.19
	7. Понижение в наблюда- тельной скважине (решение-2 Болтона)	$k_r, S, S_y$	2.4.11
	<ol> <li>8. Понижение в наблюда- тельной скважине (решение Менча с емкостью опытной скважины)</li> </ol>	$k_r, k_z, S_s, S_y, *$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.4.20
	<ol> <li>9. Понижение в пьезометре (решение Менча с емкостью опытной скважины)</li> </ol>	$k_r, k_z, S_s, S_y, *$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.4.20
	10. Понижение в опытной скважине (решение Менча)	$k_r, k_z, \overline{S}_s, \overline{S}_y,$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.4.21
	<ol> <li>Понижение уровня грун- товых вод (решение Тейса)</li> </ol>	$k_r, a$	2.4.22

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
Неограничен- ный в плане пласт	12. Понижение уровня грун- товых вод (решение Хантуша, учет перетекания)	$k_r, a, B$	2.4.23
	13. Понижение в напорно- безнапорном пласте (решение Менч-Прикета)	$T, S, S_y$	2.4.25
Полуограни- ченные и огра- ниченные в плане пласты	Используется суперпозиция для первых семи решений не- ограниченного в плане пласта	См. параметры для соответствующих решений	2.4.1, 2.4.10, 2.4.11, 2.4.17, 2.4.19

## 5. Пласт с перетеканием: постоянный напор в смежном пласте

Неограничен- ный в плане пласт	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны с учетом перетекания (Хан- туш)</li> </ol>	<i>T</i> , <i>a</i> , <i>B</i>	2.5.1
	2. Понижение в наблюда- тельной скважине с учетом ем- кости опытной скважины	$T, a, B, r_c$	2.5.2
	<ol> <li>Понижение в опытной скважине большого диаметра</li> </ol>	$T, a, B, r_c$	2.5.4
	4. Планово-анизотропный водоносный пласт	$T_x, T_y, S, B, \theta$	2.5.6
Полуограничен ные в плане пласты	Функция влияния скважины с учетом перетекания (Хан- туш): суперпозиция (2.5.1)	<i>T</i> , <i>a</i> , <i>B</i>	2.5.9
Пласт-полоса: границы I рода	1. Функция влияния сква- жины с учетом перетекания (Хантуш): суперпозиция (2.5.1)	<i>T</i> , <i>a</i> , <i>B</i>	2.5.11
	2. Функция Грина	T, a, B	2.5.12
Пласт-полоса: границы II рода	<ol> <li>Функция влияния скважи- ны с учетом перетекания (Хан- туш): суперпозиция</li> </ol>	<i>T</i> , <i>a</i> , <i>B</i>	2.5.13
	2. Функция Грина	T, a, B	2.5.14
Пласт-полоса: границы I и II рода	Функция влияния скважины с учетом перетекания (Хантуш): суперпозиция	T , a, B	2.5.15

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
6. Пласт с пере	теканием: переменный напор в	смежном пласте	
	<ol> <li>Понижение в пласте №1 (пласт с опытной скважиной)</li> </ol>	$T_1, a_1, B_1, T_2, a_2, B_2$	2.5.22
	<ol> <li>Понижение в пласте №2 (пласт без опытной скважины)</li> </ol>	$T_1, a_1, B_1, T_2, a_2, B_2$	2.5.23
7. Пласт с пере	теканием: учет емкости разделя	ющего слоя	
	<ol> <li>Понижение в пласте №1 (напор в пласте №2 постоянный)</li> </ol>	$T_1, S_1, B_1, S'$	2.5.36
	<ol> <li>Понижение в пласте №1 (напор в пласте №2 переменный)</li> </ol>	$T_1, S_1, B_1, S_2, B_2, S'$	2.5.42
	<ol> <li>Понижение в пласте №2 (пласт без опытной скважины)</li> </ol>	$T_1, S_1, B_1, S_2, B_2, S'$	2.5.43
	4. Понижение в разделяю- щем слое (напор в пласте №2 постоянный)	$T_1, S_1, B_1, S'$	2.5.37
	<ol> <li>5. Понижение в разделяю- щем слое (напор в пласте №2 переменный)</li> </ol>	$T_1, S_1, B_1, S_2, B_2, S'$	2.5.44
	<ol> <li>Понижение в полуограни- ченном слабопроницаемом слое</li> </ol>	$T, S, k', S'_s$	2.5.54
	7. Понижение в разделяю- щем слое (незначительное пе- ретекание)	T, a, a'	2.5.39
	8. Понижение в разделяю- щем слое (незначительное пе- ретекание): аппроксимация для больших замеров	Т, а	2.5.41
	<ol> <li>9. Понижение в полуограни- ченном слабопроницаемом слое (незначительное перетекание)</li> </ol>	T, a, a'	2.5.56
	10. Понижение в полуогра- ниченном слабопроницаемом слое (незначительное перетека- ние): аппроксимация для боль- ших замеров	T, a	2.5.59

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
8. Пласт с пере	теканием: линейный источник		
	Решение Хантуша	$k_r, k_z, S, B$	2.5.60
9. Двухслойный	й пласт		
Решение 2 дано для изменения	1. Понижение в основном пласте (Мироненко–Сердюков, 1968)	$T, S, S'_y, k'$	2.6.1
уровня на ма- лые и большие моменты вре-	2. Понижение в основном пласте (Cooley–Case, 1973)	$T, S, S', S'_y, k'$	2.6.3, 2.6.4
мени	3. Понижение для гравита- ционного режима (Cooley– Case, 1973)	$T, S'_y, k'$	2.6.12
10. Слоистые с	истемы: решения Хантуша		
Решения даны для изменения уровня на ма-	1. Трехслойные системы (+ два смежных пласта с постоян- ным уровнем)	$T, S, B_1, B_2, S', S''$	2.7.1, 2.7.4
лые и большие моменты вре- мени	2. Трехслойные системы (смежные пласты отсутствуют)	$T, S, B_1, B_2, S', S''$	2.7.1, 2.7.5
	<ol> <li>Трехслойные системы (+ один смежный пласт с посто- янным уровнем)</li> </ol>	$T, S, B_1, B_2, S', S''$	2.7.1, 2.7.6
	4. Двухслойные системы (+ смежный пласт с постоянным уровнем)	T, S, B, S'	2.7.11, 2.7.12
	5. Двухслойные системы (смежные пласты отсутствуют)	T, S, B, S'	2.7.11, 2.7.13
	<ol> <li>Водоносный пласт и по- луограниченный слабопрони- цаемый слой</li> </ol>	$T, S, k', S'_s$	2.7.14
11. Слоистые с	истемы: решения Менча		
Решения для изменения	1. Трехслойные системы (+ лва смежных пласта с постоян-	$T, S, B_1, B_2, S', S'',$	2.7.8-

Решения для изменения уровня в водо-	<ol> <li>Трехслойные системы (+ два смежных пласта с постоян- ным уровнем)</li> </ol>	$T, S, B_1, B_2, S', S'',$ $r_c, k_{\text{skin}}, m_{\text{skin}}$	2.7.8– 2.7.10
носном пласте и слабопрони- цаемом слое	2. Трехслойные системы (смежные пласты отсутствуют)	$T, S, B_1, B_2, S', S'',$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.7.8– 2.7.10

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
	<ol> <li>Трехслойные системы (+ один смежный пласт с посто- янным уровнем)</li> </ol>	$T, S, B_1, B_2, S', S'',$ $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.7.8– 2.7.10
	<ol> <li>Двухслойные системы (+ смежный пласт с постоянным уровнем)</li> </ol>	T, S, B, S', $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.7.15, 2.7.16
	5. Двухслойные системы (смежные пласты отсутствуют)	T, S, B, S', $r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.7.15, 2.7.16

#### 12. Планово-неоднородный пласт

(p	<ol> <li>Понижение в зоне №1 ешение Максимова)</li> </ol>	$T_1, a_1, T_2, a_2$	2.8.2
(p	<ol> <li>Понижение в зоне №2 ешение Максимова)</li> </ol>	$T_1, a_1, T_2, a_2$	2.8.5
(p	<ol> <li>Понижение в зоне №1</li> <li>ешение Фенске)</li> </ol>	$T_1, a_1, T_2, a_2$	2.8.8
(p	4. Понижение в зоне №2 ешение Фенске)	$T_1, a_1, T_2, a_2$	2.8.10

#### 13. Откачка около реки

1. Решение Шестакова	$T, a, \Delta L$	2.9.1
2. Решение Хантуша	$k, a, \Delta L$	2.9.5

## 14. Наклонный пласт

Решения для изменения уровня вниз и вверх по потоку	<ol> <li>Понижение в пласте пере- менной мощности</li> </ol>	$k, S, m_p$	2.10.4
	2. Понижение в наклонном безнапорном пласте	$k, a, \theta_S$	2.10.5
	3. Понижение в наклонном безнапорном пласте с перете- канием	$k, a, B, \theta_S$	2.10.7

#### 15. Трещиновато-пористая среда

Первые два ре- шения – для изменения	1. Слоистые блоки (решение Менча)	$k_f, S_{sf}, k_b, S_{sb}, m_b,$ $r_c, k_{skin}, m_{skin},$	2.11.1,
уровня в тре- щине и блоке	2. Сферические блоки (ре- шение Менча)	$k_{ m fskin}, m_{ m fskin}$	2.11.2

Таблица П1 (продолжение)

Схема	Решение	Параметры	Уравнение
	3. Схема Warren–Root (ре- шение Менча)	$k_f, S_{sf}, k_b, S_{sb},$ $m_b, r_c, k_{skin}, m_{skin}$	2.11.3
	4. Вертикальная трещина (Gringarten–Ramey–Raghavan, 1974)	$T, a, L_f$	2.11.4
	5. Вертикальная трещина: параллельный поток (Jenkins– Prentice, 1982)	$T, a, L_f$	2.11.7
	6. Горизонтальная трещина (Gringarten–Ramey, 1974)	$k_r, k_z, S_s,$ $L_f, z_f, m_f$	2.11.8
	7. Горизонтальная трещина с нулевой толщиной (Gringarten–Ramey, 1974)	$k_r, k_z, S_s, L_f, z_f$	2.11.10
16. Откачка с п	остоянным понижением		
	<ol> <li>Функция A(u, beta) для напорного пласта</li> </ol>	а	3.1.1
	2. Решение Стернберга для напорного пласта	а	3.1.3
	3. Функция Z(u, beta1, beta2) для пласта с перетеканием	<i>a</i> , <i>B</i>	3.1.4
	4. Решение Стернберга для пласта с перетеканием	<i>a</i> , <i>B</i>	3.1.6
17. Экспресс-опробование			
	1. Решение Cooper	$T, a, r_c$	3.2.1
	2. Решение Picking	$T, a, r_c$	3.2.3

 $\Pi$ р и м е ч а н и е. Звездочкой отмечены решения, учитывающие емкость наблюдательной скважины или пьезометра.

#### Функциональные зависимости

В Приложении приведен список широко известных и специальных функций, используемых в программном комплексе ANSDIMAT, для аналитических расчетов изменения уровня в водоносных пластах при опытно-фильтрационных опробованиях. Графики этих функций, их аппроксимации и табличные значения см. в работе автора (Синдаловский, 2006).

$$\begin{split} A(u,\beta) &- \text{специальная функция (3.1.2);} \\ \text{еrf } u &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{u} \exp(-\tau^{2}) d\tau - \text{интеграл вероятностей;} \\ \text{еrfc } u &= \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{u}^{\infty} \exp(-\tau^{2}) d\tau - \text{дополнительный интеграл вероятностей;} \\ F(u,\beta) &- \phi \text{ункция для скважин большого диаметра (2.1.7);} \\ F(u,\beta_{1},\beta_{2}) &- \phi \text{ункция для линейного источника (2.3.2);} \\ F_{b}(u,\beta) &- \phi \text{ункция для понижения в наблюдательной скважине при откачке из скважины большого диаметра (2.1.5);} \\ F_{L}(u,\beta_{1},\beta_{2},\beta_{3}) &- \phi \text{ункция для понижения в наблюдательной скважине при откачке из скважины большого диаметра (2.1.5);} \\ F_{L}(u,\beta_{1},\beta_{2},\beta_{3}) &- \phi \text{ункция для понижения в наблюдательной скважине при откачке из скважины большого диаметра в водоносном комплексе с перетеканием (2.5.3). \\ F_{Lw}(u,\beta_{2},\beta_{3}) &- \phi \text{ункция для скважин большого диаметра для водоносного комплекса с перетеканием (2.5.5);} \\ F_{s}(u,\beta) &- \phi \text{ункция для экспресс-опробований (3.2.2).} \\ i \text{erfc } u &= -u \operatorname{erfc} u + \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-u^{2}) - \text{кратный интеграл вероятностей;} \end{split}$$

$$J_{0}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \cos(u \sin \tau) d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 1-го рода 0-го порядка;  

$$J_{1}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \cos(u \sin \tau - \tau) d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 1-го рода 1-го  
порядка;  

$$J^{*}(u, \beta_{1}, \beta_{2}) - \text{специальная } \phi$$
ункция (2.9.5);  

$$H(u, \beta) = \int_{u}^{\infty} \frac{e^{-\tau}}{\tau} \operatorname{erfc}\left(\frac{\beta\sqrt{u}}{\sqrt{\tau(\tau-u)}}\right) d\tau - \operatorname{специальная } \phi$$
ункция;  

$$I_{0}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \exp(u \cos \tau) d\tau - \operatorname{моди} \phi$$
ицированная  $\phi$ ункция Бесселя  
1-го рода 0-го порядка;  

$$K_{0}(u) = \int_{0}^{\infty} \exp(-u \cosh \tau) d\tau - \operatorname{моди} \phi$$
ицированная  $\phi$ ункция Бесселя  
2-го рода 0-го порядка;  

$$K_{1}(u) = \int_{0}^{\infty} \exp(-u \cosh \tau) d\tau - \operatorname{моди} \phi$$
ицированная  $\phi$ ункция Бесселя  
2-го рода 1-го порядка;  

$$M(u, \beta) = \int_{u}^{\infty} \frac{\exp(-\tau)}{\tau} \operatorname{erf}(\beta\sqrt{\tau}) d\tau - \operatorname{специальная } \phi$$
ункция;  

$$W(u) = \int_{u}^{\infty} \frac{\exp(-\tau)}{\tau} d\tau - \phi$$
ункция влияния скважины;  

$$W(u, \beta) = \int_{u}^{\infty} \frac{\exp(-\tau)}{\tau} d\tau - \phi$$
ункция влияния скважины с  
учетом перетекания;  

$$Y_{0}(u) = \frac{4}{\pi^{2}} \int_{0}^{\pi} \cos(u \cos \tau) [\gamma + \ln(2u \sin^{2} \tau)] d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 2-го  
рода 0-го порядка;  

$$Y_{1}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \sin(u \sin \tau - \tau) d\tau - \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} (e^{\tau} + e^{-\tau} \cos \pi) \exp(-u \sinh \tau) d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 2-го  
рода 0-го порядка;  

$$Y_{1}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \sin(u \sin \tau - \tau) d\tau - \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} (e^{\tau} + e^{-\tau} \cos \pi) \exp(-u \sinh \tau) d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 2-го  
рода 0-го порядка;  

$$Y_{1}(u) = \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\pi} \sin(u \sin \tau - \tau) d\tau - \frac{1}{\pi} \int_{0}^{\infty} (e^{\tau} + e^{-\tau} \cos \pi) \exp(-u \sinh \tau) d\tau - \phi$$
ункция Бесселя 2-го рода 1-го порядка;  

$$Z(u, \beta_{1}, \beta_{2}) - \operatorname{специальная } \phi$$
ункция (3.1.5).  

$$u, \beta, \beta_{1}, \beta_{2}, \beta_{3}$$
 - аргументы  $\phi$ инсци;  

$$\gamma = 0.5772156649 - постоянная Эйлера.$$

# Алгоритмы ввода данных для распространенных схем и условий опробования

Часть алгоритмов по вводу данных и работе с программным комплексом ANSDIMAT находится в соответствующих разделах книги (см. Алгоритмы). В Приложение вошли рекомендации по созданию проектов для конкретных схем и условий проведения опробования.

### Ввод данных для обработки кустовой откачки с учетом несовершенства и емкости скважин

Необходимо, например, при использовании решений Менча (см. гл. 2) для схемы линейного источника в ограниченном в разрезе пласте или схемы безнапорного пласта).

1. Создайте новый проект (см. 1.1.2).

2. Нажмите кнопку «Добавить». Количество скважин в списке должно соответствовать количеству наблюдательных скважин, принимавших участие в опробовании.

Внимание! Опытная скважина, в которой проводятся замеры за изменением уровня, также является и наблюдательной.

3. В поле «Мощность пласта» задайте мощность водоносного пласта.

4. Нажмите кнопку «Схема»: появится диалоговое окно «Выбор расчетной схемы».

5. В списке «Схема» выберите необходимую схему.

6. Нажмите кнопку «*OK*» для закрытия диалогового окна «*Выбор расчетной схемы*» и возврата к окну «*Pedakmop...*».

7. Выберите закладку «Данные»: введите время замеров понижения уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы.

8. Нажмите кнопку «Понижение»: введите данные понижения уровня по всем имеющимся наблюдательным скважинам.

9. Нажмите кнопку «*Pacxod*»: введите значение постоянного расхода в опытной скважине в колонку «*Pacxod*» открывшейся таблицы.

10. Нажмите кнопку «*Расстояние*»: введите расстояние до опытной скважины.

11. Нажмите кнопку «*Смещение*»: укажите вертикальное расстояние между центрами фильтров каждой опытной скважиной и каждой наблюдательной скважиной (см. *z* на рис. 2.16).

12. Нажмите кнопку «*Скважина*»: в открывшейся таблице введите в колонку «*Верх/Низ*» расстояние от центра фильтра каждой скважины до кровли пласта (или до уровня грунтовых вод для безнапорного пласта), в колонку «*Фильтр*» – длину фильтра скважин, а в колонку «*Радиус*» – радиус фильтра скважин.

13. Нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

## Ввод данных для обработки откачки с постоянным понижением

1. Создайте новый проект (см. 1.1.2).

2. Нажмите кнопку «Добавить», если в опробовании принимают участие более одной наблюдательной скважины. Количество скважин в списке должно соответствовать количеству наблюдательных скважин, принимавших участие в опробовании.

3. В поле «Мощность пласта» задайте мощность водоносного пласта.

4. Нажмите кнопку «Схема»: появится диалоговое окно «Выбор расчетной схемы».

5. В списке «*Схема*» выберите «Откачка с постоянным понижением».

6. Нажмите кнопку «*OK*» для закрытия диалогового окна «*Выбор расчетной схемы*» и возврата к окну «*Редактор*...».

7. Выберите закладку «Данные»: введите время замеров понижения уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов таблицы. 8. Нажмите кнопку «Понижение»: введите данные понижения уровня по всем имеющимся наблюдательным скважинам.

9. Нажмите кнопку «*Pacxod*»: введите значение постоянного понижения в опытной скважине в колонку «*Понижение*» открывшейся таблицы.

10. Нажмите кнопку «*Расстояние*»: введите расстояние до опытной скважины.

11. Нажмите кнопку «*Скважина*»: в первой строчке открывшейся таблицы введите в колонку «*Радиус*» радиус фильтра опытной скважины.

12. Нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

## Ввод данных для обработки экспресс-опробования

1. Создайте новый проект (см. 1.1.2).

2. В поле «Мощность пласта» задайте мощность водоносного пласта.

Внимание! Если для обработки предполагается использовать решение Пикинга (см. 3.2.1), которое учитывает не мгновенное изменение уровня в опытной скважине при экспрессопробовании, то в поле «Длительность откачки» укажите длительность изменения уровня в опытной скважине в сутках.

3. Нажмите кнопку «Схема»: появится диалоговое окно «Выбор расчетной схемы».

4. В списке «Схема» выберите «Экспресс-опробование».

5. Нажмите кнопку «*OK*» для закрытия диалогового окна «*Выбор расчетной схемы*» и возврата к окну «*Pedakmop...*».

6. Выберите закладку «Данные».

7. Нажмите кнопку «*Расстояние*»: введите радиус фильтра опытной скважины.

Внимание! Если при обработке предполагается использовать решения Бауэра–Райса (см. 3.2.2) или Хворслева (см. 3.2.3) для несовершенных опытных скважин, то нажмите кнопку «*Скважина*»: в открывшейся таблице введите в колонку «*Верх/Низ*» расстояние от центра фильтра опытной скважины до уровня грунтовых вод (или до кровли напорного пласта), а в колонку «Фильтр» – длину фильтра опытной скважины.

8. Нажмите кнопку «*Время восстан*.»: введите время замеров восстановления уровня, начиная с первого (ненулевого) замера, в любой из четырех столбцов.

9. Нажмите кнопку «Восстановление»: введите данные восстановления уровня, значения отсчитываются от уровня после его изменения.

10. Нажмите кнопку «Окончание»: введите величину начального скачка уровня.

11. Нажмите кнопку «Создать» и «ОК».

#### Подготовка к обработке откачки с переменным расходом

При создании нового проекта (см. 1.1.2) введите данные изменения расхода по всем имеющимся опытным скважинам в таблицу «*Pacxod dQ*» (см. 1.3.2).

Если программа не найдет данные изменения расхода во входных файлах, то пункты меню и опции, отвечающие за переменный расход, будут заблокированы и обработка опробования с переменным расходом станет недоступной. Для корректной обработки такого полевого эксперимента необходимо пройти несколько шагов.

1. Откройте проект для обработки (см. 1.1.3).

2. Откройте меню «Выбор > Опробование». Появится диалоговое окно «Условия проведения опробования» (см. рис. 1.24).

3. Включите опцию «Переменный».

4. Нажмите кнопку «*ОК*» для сохранения изменений и закрытия диалогового окна.

5. Откройте меню «Выбор > График». Появится диалоговое окно «Выбор графика» (см. рис. 1.28).

6. Выберите график «Q - t» (см. кнопку с соответствующим названием).

7. Нажмите кнопку «*OK*» для закрытия диалогового окна и построения графика расхода по всем имеющимся опытным скважинам.

8. Откройте меню «Инструменты > Ступени расхода». Появится диалоговое окно «Ступени переменного расхода» (см. рис. 1.39).

9. Разбейте расход на ступени (см. описание и алгоритмы разбивки в 1.6.4.1).

Последующая обработка опытных данных будет осуществляться с учетом переменного во времени расхода. При повторном открытии проекта сделанные настройки будут учитываться.

#### Подготовка к обработке периода восстановления уровня

При создании нового проекта (см. 1.1.2) введите данные о восстановлении уровня в наблюдательных скважинах в таблицу «Время восстан.» и «Восстановление» (см. 1.3.2). Помните, что 1) за начало отсчета времени восстановления считается момент остановки откачки; 2) первое время замера должно быть больше нуля и находиться в первой строчке таблицы; 3) данные восстановления вводятся от минимального значения, т.е. максимальное понижение в наблюдательной скважине равно нулевому значению восстановления.

Выполните следующие пункты.

1. Откройте проект для обработки (см. 1.1.3).

2. Откройте меню «Выбор > Опробование». Появится диалоговое окно «Условия проведения опробования» (рис. 1.24).

3. Включите одну из опций в рамке «Обработать». Подробные комментарии для опций см. в разд. 1.5.

4. Нажмите кнопку «*ОК*» для сохранения изменений и закрытия диалогового окна.

Последующая обработка опытных данных будет осуществляться с учетом выбранной опции. От этого же зависят предлагаемые программным комплексом графики и способы обработки. Подробнее об обработке данных восстановления уровня см. в разд. 3.5.

# Особенности ввода данных для сложных расчетных схем, условий или решений

Обработка данных изменения уровня в сложных расчетных схемах или использование решений для понижения в слабопроницаемых пластах иногда требует ввода в редактор дополнительных параметров. Некоторые параметры имеют разное значение, но в редакторе вводятся в одни и те же поля (например, понижение на конец откачки и мгновенное изменение уровня при экспресс-опробовании).

Все эти нюансы объясняются в разд. 1.3 при описании полей ввода редактора. В табл. П2 приведен список параметров для выборочных схем и условий, на которые пользователь должен обратить особое внимание при создании проекта и вводе данных опытного опробования. Их игнорирование или неправильная трактовка может в дальнейшем привести к серьезным ошибкам в определении фильтрационных параметров.

#### Таблица П2

## Особенности ввода параметров для выборочных схем и условий

Схема, условие	Параметр	Поле для ввода в редакторе
Безнапорный пласт	<ul> <li><i>m</i> – начальная обводненная</li> <li>мощность безнапорного пласта</li> <li>(рис. 2.18)</li> </ul>	Поле «Мощность пласта» (рис. 1.10; табл. 1.2)
Безнапорный пласт, решение для напор- но-безнапорного пласта	Η – начальный напор (рис. 2.19, <i>б</i> )	Поле <i>«Начальный напор»</i> (рис. 1.10; табл. 1.2)
Пласт с перетека- нием: учет емкости разделяющего слоя	z <sub>p</sub> – расстояние от точки на- блюдения в разделяющем слое до кровли (или подошвы) основ- ного пласта (рис. 2.25)	Таблица « <i>Смеще- ние</i> » (рис. 1.18; табл. 1.9)
Двухслойный водо- носный комплекс	<ul> <li>m' – начальная обводненная</li> <li>мощность безнапорного</li> <li>слабопроницаемого пласта</li> <li>(рис. 2.28)</li> </ul>	Поле «Мощность разд. слоя» (рис. 1.10; табл. 1.2)
Слоистые системы	z <sub>p</sub> – расстояние от точки на- блюдения в разделяющем слое до кровли (или подошвы) основ- ного пласта (рис. 2.30, 2.33)	Таблица « <i>Смеще- ние»</i> (рис. 1.18; табл. 1.9)
Слоистые системы, решения Менча	<i>m</i> ', <i>m</i> " – мощности слабопро- ницаемых слоев (рис. 2.30, 2.33)	Поле «Мощность разд. слоя» и «Мощ- ность разд. слоя №2» (рис. 1.10; табл. 1.2)
Наклонный водонос- ный пласт, решение для пласта перемен- ной мощности	<i>m<sub>w</sub></i> – мощность пласта в рай- оне опытной скважины (рис. 2.38)	Поле «Мощность пласта» (рис. 1.10; табл. 1.2)
Наклонный водоносный пласт	$L'_p$ – расстояние от наблюда- тельной скважины до горизон- тальной линии, на которой нахо- дится опытная скважина (рис. 2.40)	Таблица « <i>Скважина</i> », колон- ка « <i>Расстояние 2</i> » (рис. 1.19; табл. 1.10)
Трещиновато- пористая среда, решения Менча	<i>z<sub>p</sub></i> – расстояние от центра блока до точки в блоке, где опре- деляется понижение (рис. 2.41)	Таблица «Смещение» (рис. 1.18; табл. 1.9)

Таблица П2 (продолжение)

Схема, условие	Параметр	Поле для ввода в редакторе
Трещиновато- пористая среда, скважина в верти- кальной трещине	$L_p$ – расстояние от наблюда- тельной скважины до трещины (рис. 2.42, $e$ )	Таблица «Сква- жина», колонка «Расстояние» (рис. 1.19; табл. 1.10)
Откачка с постоян- ным понижением	<i>s<sub>w</sub></i> – постоянное понижение в опытной скважине (рис. 3.1)	Таблица « <i>Pacxod</i> », колонка « <i>Пониже-</i> <i>ние</i> » (рис. 1.15; табл. 1.6)
Экспресс-опробова- ние	$s^0$ – начальное изменение уровня в опытной скважине (рис. 3.2, 3.3)	Таблица « <i>Оконча- ние»</i> (рис. 1.20; табл. 1.11)
	<i>r<sub>w</sub></i> – радиус опытной скважины (рис. 3.2, 3.3, 3.5)	Достаточно ввес- ти только один раз в таблице « <i>Расстоя-</i> <i>ние</i> » (рис. 1.17; табл. 1.8)
Групповая откачка с постоянным расхо- дом и с асинхрон- ным возмущением	t <sub>i</sub> – время начала работы i-й опытной скважины, отсчитанное от начала опытного опробования	Таблица « <i>Pacxod</i> », колонка « <i>Старт</i> » (рис. 1.15; табл. 1.6)

## Сообщения об ошибках

В табл. ПЗ перечислены наиболее значимые ошибки, сообщения о которых выдает программный комплекс ANSDIMAT. Кроме этого, приводятся возможные причины их возникновения и способы устранения. Часть ошибок являются критическими, т.е. работа с программой (или с его отдельным модулем) невозможна до их исправления. Другие служат только в качестве предупреждения. В таблице нет информации о многочисленных ошибках, сообщениях и предупреждениях, которые могут возникать в ходе работы пользователя, так как из их наименования будут понятны способы их устранения или последствия при их игнорировании.

Таблица ПЗ

Ошибки и сообщения	Причина	Вариант исправления
«Недостаточно данных»	При создании про- екта программа не наш- ла данных о времени за- меров. Проект должен содержать хотя бы один замер в таблице редактора «Время» или «Время восстан.»	Ввести данные замеров времени, если их нет. В таблице не должно быть пропусков, первое время замеров должно находиться в первой строке таблицы (рис. 1.13; табл. 1.4)
«Мощность водоносного пласта должна быть больше 0»	Не задана мощность напорного водоносного пласта или начальная обводненная мощность безнапорного пласта.	Ввести значение в по- ле «Мощность пласта» (рис. 1.10; табл. 1.2)

Сообщения об ошибках, выдаваемых программным комплексом

Таблица ПЗ (продолжение)

Ошибки и сообщения	Причина	Вариант исправления
«t8 должно быть больше t7 (номер замера для от- качки)» После t стоит номер замера	В таблице редактора «Время» номер следую- щего замера меньше или равен предыдущему	Найти указанный за- мер в таблице <i>«Время»</i> и исправить его
«t8 должно быть больше t7 (номер замера для вос- становления)» После t стоит номер замера	В таблице редактора «Время восстан.» номер следующего замера меньше или равен предыдущему	Найти указанный за- мер в таблице «Время восстан.» и исправить его
«t8 должно быть больше t7 (номер замера для от- качки и восстановления)» После t стоит номер замера	1. В таблице редак- тора «Время» или «Время восстан.» номер следующего замера меньше или равен пре- дыдущему 2. Длительность от- качки указана меньше, чем последнее время за- мера в таблице «Время»	Найти указанный за- мер и исправить его: нумерация замеров при одновременной обработ- ке откачки и восстанов- ления суммируется Проверить значение в поле «Длительность откачки» (рис. 1.10, табл. 1.2)
«Расстояние от наблюда- тельной скважины 1р до опытной 1w должно быть больше 0» 1p, 1w – имена скважин, за- данные пользователем	Не задано расстояние от наблюдательной скважины до опытной скважины	В таблице « <i>Paccmoя</i> - ние» исправить расстоя- ние между указанными скважинами (рис. 1.17; табл. 1.8)
«Не заданы понижения на конец откачки»	Введены данные о восстановлении уровня и не заданы понижения на конец откачки	Ввести данные в таблицу « <i>Окончание»</i> (рис. 1.20; табл. 1.11)
«Расстояние между дву- мя границами (ширина пласта-полосы) должно быть больше 0»	Выбрана схема огра- ниченного в плане пла- ста. Программа не нашла значение для ширины пласта-полосы	Ввести значение в поле «Ширина пласта- полосы» (рис. 1.10; табл. 1.2)
«Мощность слабопрони- цаемого слоя должна быть больше 0»	Не задана мощность слабопроницаемого слоя для схемы двухслойного пласта, схемы с перете- канием с учетом емко- сти разделяющего слоя или при выборе решения Менча для понижения в слабопроницаемом слое	Ввести значение в поле «Мощность разд. слоя» (рис. 1.10; табл. 1.2)

Таблица ПЗ (продолжение)

Ошибки и сообщения	Причина	Вариант исправления
«Мощность верхнего слабопроницаемого слоя (1) должна быть больше 0» «Мощность нижнего слабопроницаемого слоя (2) должна быть больше 0»	Не задана мощность верхнего (нижнего) сла- бопроницаемого слоя при выборе решения Менча для понижения в верхнем (нижнем) сла- бопроницаемом слое (слоистые системы: решения Меша)	Ввести значение в поле «Мощность разд. слоя» (рис. 1.10, табл. 1.2) Ввести значение в поле «Мощность разд. слоя №2» (рис. 1.10, табл. 1.2)
«Для выбора экспресс- опробования используйте редактор»	Не допускается вре- менный выбор схемы экспресс-опробования	Зайти в редактор, выбрать схему «Экс- пресс-опробование», создать проект заново, открыть проект для обработки
«Для замены схемы ис- пользуйте редактор»	При обработке схемы экспресс-опробования не допускается времен- ный выбор другой схе- мы	Зайти в редактор, вы- брать требуемую схему, создать проект заново, открыть проект для об- работки
«Измените параметры подбора»	Возникла ошибка при решении задачи методом наименьших квадратов	Попробовать изме- нить значения в полях «Начальное <i>значение</i> » и «Шаг подбора» (рис. 1.63; табл. 1.43)
«Номер колонки должен быть меньше или равен 2» Число – количество колонок в загружаемом файле	При загрузке данных в редактор из внешнего файла указана несущест- вующая в файле колон- ка. Программа опреде- лила, что колонок в вы- бранном файле меньше	Изменить номер ко- лонки в поле «Загрузить колонку», номер должен быть меньше или равен числа указанного в со- общении об ошибке (рис. 1.22; табл. 1.13)
«Количество опытных скважин в файле меньше 3» Число – номер скважины заданный в поле « <i>Номер</i> <i>скважины для загрузки</i> »	Количество скважин с разбивкой расхода на ступени в выбранном файле меньше, чем задано	Изменить номер сква- жины для загрузки в поле <i>«Номер скважины для</i> <i>загрузки»</i> (рис. 1.39; табл. 1.27)
«Данные должны нахо- диться в отдельном ката- логе»	Попытка создания нового проекта в ката- логе программного ком- плекса	Предварительно соз- дать каталог. Каждый проект должен находить- ся в отдельном каталоге
Таблица ПЗ (продолжение)

Ошибки и сообщения	Причина	Вариант исправления
«Файлы уже существуют. Удалить их?»	Попытка создания нового проекта в катало- ге с уже имеющимся проектом	Отказаться от удале- ния и заменить каталог. В противном случае файлы предыдущего про- екта будут удалены
«Заполните таблицы и нажмите "Создать"»	При открытии проек- та не были найдены не- обходимые для работы файлы	Зайти в редактор и попытаться создать проект для обработки заново (рис. 1.10; табл. 1.1)

## Алгоритмы работы с модулями программного комплекса

Первые шаги к созданию нового проекта, 9 Алгоритм пошагового ввода данных, 11 Создание нового проекта (универсальный алгоритм), 13 Открытие проекта для обработки, 19 Редактирование ранее созданного проекта, 20 Разбивка переменного расхода на ступени, 79 Определение параметров способом подбора параметров, 90 Определение параметров способом прямой линии, 105, 106 Определение параметров способом эталонной кривой, 112, 113 Определение параметров способом биссектрисы, 117 Определение параметров с помощью метода наименьших квадратов, 120 Определение параметров с помощью программы UCODE, 125 Сохранение фактических и расчетных данных, 127 Вывод на экран и сохранение фильтрационных параметров, 128 Ввод данных для обработки кустовой откачки с учетом несовершенства и емкости скважин, 316 Ввод данных для обработки откачки с постоянным понижением, 317 Ввод данных для обработки экспресс-опробования, 318 Подготовка к обработке откачки с переменным расходом, 319 Подготовка к обработке периода восстановления уровня, 320

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- А величина, которую отсекает прямая линия на оси ординат;
- *а* пьезопроводность (уровнепроводность) водоносного пласта, м<sup>2</sup>/сут;
- В параметр перетекания, м;
- $\boldsymbol{B}_p, \boldsymbol{B}_w$  вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной и
- опытной скважин до кровли или подошвы пласта, м;
- С угловой коэффициент прямой линии;
- *D* сдвиг графиков фактической и эталонной кривых по вертикали;
- *d* расстояние между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин (2.2.3), м;
- Е сдвиг графиков фактической и эталонной кривых по горизонтали;
- Н начальный напор, м;
- *k* коэффициент фильтрации водоносного пласта, м/сут;
- *k<sub>r</sub>* горизонтальный коэффициент фильтрации, м/сут;
- *k*<sub>skin</sub> коэффициент фильтрации скина, м/сут;
- $k_{\rm skin}^f$  коэффициент фильтрации скина трещины, м;
- *k<sub>z</sub>* вертикальный коэффициент фильтрации, м/сут;
- *L* ширина пласта-полосы, м;
- *L*<sub>*Bp*</sub>, *L*<sub>*Bw*</sub> вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной и опытной скважин до подошвы пласта, м;
- $L_f$  длина или диаметр трещины, м;
- L<sub>p</sub> горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до плановой границы, для трещиновато-пористой среды расстояние от наблюдательной скважины до трещины (рис. 2.42, в), м;
- *L<sub>Tp</sub>*, *L<sub>Tw</sub>* вертикальное расстояние от кровли водоносного пласта (или уровня грунтовых вод для безнапорного пласта) до середины фильтра наблюдательной и опытной скважин, м;
- L<sub>w</sub> горизонтальное расстояние от опытной скважины до плановой границы, м;
- $L'_{p} = L L_{p}$ ,  $L'_{w} = L L_{w}$  горизонтальное расстояние от наблюдательной и опытной скважин до второй границы пласта-полосы, м;

- L'<sub>p</sub> для наклонного пласта расстояние от наблюдательной скважины до горизонтальной линии, на которой находится опытная скважина (рис. 2.40), м;
- $l_{p}, l_{w}$  длина фильтра наблюдательной и опытной скважин, м;
- *m* мощность напорного пласта, или начальная обводненная мощность безнапорного пласта м;
- *m*<sub>b</sub> размер блока, м;
- *m<sub>f</sub>* раскрытие трещины, м;
- *m*<sub>skin</sub> толщина скина опытной скважины, м/сут;
- $m_{\rm skin}^{f}$  толщина скина трещины, м;
- *N* количество опытных скважин;
- *n* номер суммы или количество отражений от одной границы;
- $n_i^j$  количество скачков *i*-й опытной скважины на момент времени  $t_i^j$ ;
- Q расход опытной скважины, м<sup>3</sup>/сут;
- $Q_i^j$  расход *j*-го скачка *i*-й опытной скважины, м<sup>3</sup>/сут;
- *r* расстояние от опытной скважины до наблюдательной скважины, м;
- *г*<sub>с</sub> радиус обсадной трубы, м;
- *r<sub>p</sub>* радиус наблюдательной скважины или пьезометра, м;
- $r_w$  радиус опытной скважины, м;
- *S* водоотдача водоносного пласта;
- S<sub>s</sub> удельная водоотдача водоносного пласта, 1/м;
- S<sub>v</sub> гравитационная водоотдача водоносного пласта;
- S' водоотдача водоносного пласта при восстановлении уровня;
- *s* понижение в наблюдательной скважине, м;
- *s*<sub>0</sub> понижение уровня в наблюдательной скважине на момент остановки откачки, м;
- s<sup>0</sup> начальное (мгновенное) изменение уровня в опытной скважине при экспресс-опробовании, м;
- $s_m$  понижение в наблюдательной скважине на период стационара, м;
- $s_r = s_0 s$  восстановление уровня в наблюдательной скважине, отсчитанное от уровня на конец откачки, м;
- *s<sub>w</sub>* понижение в опытной скважине (постоянная величина при откачке с постоянным понижением), м;
- $s^{(1)}, s^{(2)}$  понижение в основном пласте (зоне) и в смежном пласте (зоне), м;
- *s'*, *s"* понижение в слабопроницаемых слоях, или понижение в блоке для трещиновато-пористой среды, м;
- *Т* проводимость водоносного пласта, м<sup>2</sup>/сут;
- $T_x, T_y$  проводимость пласта в направлении оси абсцисс и ординат для планово-анизотропных пластов, м<sup>2</sup>/сут;
- *t* время от начала откачки, сут;

- *t*<sub>0</sub> длительность откачки, сут;
- *t<sub>i</sub>* время начала работы *i*-й опытной скважины, отсчитанное от начала опытного опробования, сут;
- *t<sub>r</sub>* время от начала восстановления, сут;
- $t_i^j$  время начала *j*-го скачка *i*-й опытной скважины, сут;
- у проекция расстояния от наблюдательной скважины до опытной скважины на линию границы (П2.2), м;
- расстояние по вертикали между центрами фильтров опытной и наблюдательной скважин (рис. 2.16), м;
- *z*<sub>f</sub> вертикальное расстояние от кровли пласта до трещины (рис. 2.44), м;
- *z<sub>p</sub>* вертикальное расстояние до точки наблюдения в разделяющем слое от кровли основного пласта (рис. 2.25, *a*) или от подошвы основного пласта (рис. 2.25, *b*); для трещиновато-пористой среды – расстояние от центра блока до трещины (точка, где определяется изменение уровня в блоке (рис. 2.41)), м;
- $z_{p1} = L_{Tp} + l_p / 2$ ,  $z_{p2} = L_{Tp} l_p / 2$  вертикальные расстояния от кровли водоносного пласта до низа и верха фильтра наблюдательной скважины, м;
- $z_{w1} = L_{Tw} + l_w/2$ ,  $z_{w2} = L_{Tw} l_w/2$  вертикальные расстояния от кровли водоносного пласта до низа и верха фильтра опытной скважины, м;
- z<sub>i</sub><sup>j</sup> вертикальное расстояние от середины фильтра наблюдательной скважины или открытой части пьезометра до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от верхней (*i* = 1) или нижней (*i* = 2) границы, в ограниченном в разрезе пласте (см. Приложение 2), м;
- *α* эмпирический параметр для безнапорных пластов (разд. 2.4), 1/сут;
- ΔL дополнительное фильтрационное сопротивление русла реки: определяется по формуле (2.9.4) или (2.9.10), м;
- ρ расстояние от наблюдательной скважины до фиктивной скважины (см. Приложение 2), м;
- *ρ<sub>i</sub><sup>j</sup>* горизонтальное расстояние от наблюдательной скважины до *j*-й фиктивной скважины, отраженной от левой (*i* = 1) или правой (*i* = 2) границы, в ограниченных в плане или разрезе пластах (см. Приложение 2), м;
- θ для планово-анизотропного пласта угол между координатной осью и лучом, направленным от опытной до наблюдательной скважины (рис. 2.2, б), когда направление анизотропии совпадает с осью абсцисс; для пласта переменной мощности и наклонного пласта – угол между осью x и линией, соединяющей опытную и наблюдательную скважины (рис. 2.40), град.;
- *θ<sub>s</sub>* для наклонного пласта наклон подошвы опробуемого водоносного пласта (рис. 2.39), град;
- $\chi = \sqrt{k_z / k_r}$  коэффициент профильной анизотропии.

Верхние и нижние символы:

- *b* относится к блоку в трещиновато-пористой среде;
- I = 1, 2 показывает положение фиктивной скважины в ограниченных пластах со стороны левой или правой границы, используется для групповой откачки с постоянным расходом в ограниченных пластах;
- *i* = 1, 2 показывает положение фиктивной скважины в ограниченных пластах: со стороны левой (верхней) или правой (нижней) границы, *i* номер опытной скважины для групповой откачки;
- f относится к трещине;
- j для откачки с постоянным расходом в ограниченных пластах: номер фиктивной скважины, полученной в результате отражения от одной границы, для откачки с переменным расходом: номер скачка изменения расхода;
- *p* относится к наблюдательной скважине или пьезометру;
- *w* относится к опытной скважине;
- 2 относится к первой и второй наблюдательным скважинам или основному и смежному пласту (зоне).
- Символы со штрихами, как правило, указывают на слабопроницаемый пласт, блок или приведенный параметр.

## ЛИТЕРАТУРА

Аравин В.И., Нумеров С.Н. Теория движения жидкостей и газов в пористой среде. М.: Гос. изд-во техн.-теорет. лит., 1953.

Бабушкин В.Д. Определение водопроницаемости анизотропных пород методом опытных откачек // Разведка и охрана недр. 1954. № 6. С. 50–53.

*Боревский Б.В., Самсонов Б.Г., Язвин Л.С.* Методика определения параметров водоносных горизонтов по данным откачек. М.: Недра, 1973.

*Бочевер* Ф.М. Неустановившийся во времени приток грунтовых вод к скважине в долинах рек // Изв. АН СССР. ОТН. 1959. № 5. С. 115–118.

Гавич И.К. Гидрогеодинамика. М.: Недра, 1988.

*Гиринский Н.К.* Определение коэффициента фильтрации по данным откачек при неустановившихся дебите и понижениях. М.: Госгеолиздат, 1950.

Зеегофер Ю.О., Шестаков В.М. Методика обработки данных опытных откачек вблизи реки // Разведка и охрана недр. 1968. № 9. С. 38–44.

Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964.

*Максимов В.А.* О неустановившемся притоке упругой жидкости к скважинам в неоднородной среде // ПМТФ. 1962. № 3. С. 109–112.

Мироненко В.А. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1996.

Мироненко В.А., Сердюков Л.И. Обработка результатов опытных откачек, прове-

денных в условиях двухслойной толщи // Разведка и охрана недр. 1968. № 10. С. 34–38. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-

фильтрационных работ. М.: Недра, 1978.

Пыхачев Г.Б., Исаев Р.Г. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1973.

Синдаловский Л.Н. Справочник аналитических решений для интерпретации опытно-фильтрационных опробований. СПб.: Изд-во СПбГУ, 2006.

Форхгеймер Ф. Гидравлика. М.; Л.: ОНТИ, 1930.

Шестаков В.М. Динамика подземных вод. М.: Изд-во МГУ, 1973.

Шестаков В.М. Гидрогеодинамика. М.: Изд-во МГУ, 1995.

Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1949.

*Boulton N.S.* The drawdown of the water-table under non-steady conditions near a pumped well in an unconfined formation // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1954. Vol. 3, N 3. P. 564–579.

*Boulton N.S.* Analysis of data from non-equilibrium pumping tests allowing for delayed yield from storage // Proceedings of the Institution of Civil Engineers. 1963. Vol. 26. P. 469–482.

*Bouwer H.* The Bouwer and Rice slug test – an update // Ground Water. 1989. Vol. 27, N 3. P. 304–309.

*Bouwer H., Rice R.C.* A slug test for determining conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells // Water Resources Research. 1976. Vol. 12, N 3. P. 423–428.

*Cooley R.L., Case C.M.* Effect of a water table aquitard on drawdown in an underlying pumped aquifer // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 2. P. 434–447.

*Cooper H.H., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S.* Response of a finite diameter well to an instantaneous charge of water // Water Resources Research. 1967. Vol. 3, N 1. P. 263–269.

*Cooper H.H., Jacob C.E.* A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing well-field history // Transactions, American Geophysical Union. 1946. Vol. 27, N 4. P. 526–534.

Darcy H. Les fontaines publiques de la ville Dijon. Paris, 1856.

*Fenske P.R.* Unsteady drawdown in the presence of a linear discontinuity // Groundwater Hydraulics. 1984. N 9. P. 125–145.

*Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr.* Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single horizontal fracture, partial penetration, or restricted entry // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974. Vol. 14, N 4. P. 413–426.

*Gringarten A.C., Ramey H.J., Jr., Raghavan R.* Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974. Vol. 14, N 4. P. 347–360.

Hantush M.S. Nonsteady flow to flowing wells of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64, N 8. P. 1043–1052.

*Hantush M.S.* Modification of the theory of leaky aquifers // Journal of Geophysical Research. 1960. Vol. 65, N 11. P. 3713–3725. Русск. изд.: *Хантуш М.С.* Новое в теории перетекания // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 43–60.

*Hantush M.S.* Aquifer tests on partially penetrating wells // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1961a. Vol. 87, N HY5, P. 171–195. Русск. изд.: *Хантуш М.С.* Неустановивший-ся приток подземных вод к скважине, несовершенной по степени вскрытия // Вопросы гидрогеологических расчетов. М.: Мир, 1964. С. 61–85.

*Hantush M.S.* Drawdown around a partially penetrating well // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1961b. Vol. 87, N HY4. P. 83–98.

Hantush M.S. Flow of ground water in sands of nonuniform thickness. Part 3. Flow to wells // Journal of Geophysical Research. 1962a. Vol. 67, N 4. P. 1527–1534.

*Hantush M.S.* Hydraulics of gravity wells in sloping sands // Journal of the Hydraulics Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1962b. Vol. 88, N HY4. P. 1–15.

*Hantush M.S.* Hydraulics of wells // Advances in Hydroscience / Edited by Ven Te Chow. New York; London: Academic Press, 1964. Vol. 1. P. 281–432.

*Hantush M.S.* Wells near streams with semipervious beds // Journal of Geophysical Research. 1965. Vol. 70, N 12. P. 2829–2838. Русск. изд.: *Хантуш М.С.* Скважины вблизи рек со слабопроницаемым ложем // Переводы статей по гидрогеологии и инженерной геологии. Динамика подземных вод. М.: Изд-во ВСЕГИНГЕО, 1968. Вып. 8. С. 43–62.

Hantush M.S. Analysis of data from pumping tests in anisotropic aquifers // Journal of Geophysical Research. 1966a. Vol. 71, N 2. P. 421–426.

*Hantush M.S.* Flow to wells in aquifers separated by a semipervious layer // Journal of Geophysical Research. 1967b. Vol. 72, N 6. P. 1709–1720.

Hantush M.S., Jacob C.E. Plane potential flow of ground water with linear leakage // Transactions, American Geophysical Union. 1954. Vol. 35, N 6. P. 917–936.

*Hantush M.S., Jacob C.E.* Non-steady Green's functions for an infinite strip of leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955a. Vol. 36, N 1. P. 101–112.

Hantush M.S., Jacob C.E. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1955b. Vol. 36, N 1. P. 95–100.

Hantush M.S., Thomas R.G. A method for analyzing a drawdown test in anisotropic aquifers // Water Resources Research. 1966. Vol. 2, N 2. P. 281–285.

*Hvorslev M.J.* Time lag and soil permeability in groundwater observations // U.S. Army Corps Eng, Waterways Station. Vicksburg, MS. 1951. Bull. 36.

Jacob C.E. Effective radius of drawdown test to determine artesian well // Proceedings of the American Society of Civil Engineers. 1946a. Vol. 72, N 5. P. 629–646.

*Jacob C.E.* Radial flow in a leaky artesian aquifer // Transactions, American Geophysical Union. 1946b. Vol. 27, N 2. P. 198–205. *Don Kirkham*. Discussion. P. 206–208.

*Jacob C.E.* The recovery method for determining the coefficient of transmissibility // Methods of determining permeability, transmissibility and drawdown / Compiled by R. Bentall. 1963. P. 283–292. U.S. Geological Survey Water-Supply. Paper 1536-I.

*Jaeger J.C.* The analysis of aquifer test data or thermal conductivity measurements which use a line source // Journal of Geophysical Research. 1959. Vol. 64, N 5. P. 561–564.

*Jenkins D.N., Prentice J.K.* Theory for aquifer test analysis in fractured rocks under linear (nonradial) flow conditions // Ground Water. 1982. Vol. 20, N 1. P. 12–21.

Johnson G.S., Cosgrove D.M. RADFLOW: a numerical model for pumping test analysis. Users manual // Idaho Water Resources Research Institute. University of Idaho. 2001.

Lai R.Y.S., Chen-Wu Su. Nonsteady flow to a large well in a leaky aquifer // Journal of Hydrology. 1974. Vol. 22, N 3/4. P. 333–345.

*Moench A.F.* Double-porosity models for a fissured groundwater reservoir with fracture skin // Water Resources Research. 1984. Vol. 20, N 7. P. 831–846.

Moench A.F. Transient flow to a large-diameter well in an aquifer with storative semiconfining layers // Water Resources Research. 1985. Vol. 21, N 8. P. 1121–1131.

*Moench A.F.* Computation of type curves for flow to partially penetrating wells in water-table aquifers // Ground Water. 1993. Vol. 31, N 6. P. 966–971.

*Moench A.F.* Flow to a well in a water-table aquifer: an improved Laplace transform solution // Ground Water. 1996. Vol. 34, N 4. P. 593–596.

*Moench A.F.* Flow to a well of finite diameter in a homogeneous, anisotropic water table aquifer // Water Resources Research. 1997. Vol. 33, N 6. P. 1397–1407.

*Moench A.F.*, *Prickett T.A.* Radial flow in an infinite aquifer undergoing conversion from artesian to water table conditions // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 2. P. 494–499.

*Muskat M.* The flow of homogeneous fluids in porous media. New York; London: McGraw-Hill Book Co., 1937. Русск. изд.: *Маскет М.* Течение однородных жидкостей в пористой среде. М.: Гостоптехнадзор, 1949. *Neuman S.P.* Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // Water Resources Research. 1972. Vol. 8, N 4. P. 1031–1045.

*Neuman S.P.* Supplementary comments on «Theory of flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response» // Water Resources Research. 1973. Vol. 9, N 4. P. 1102–1103.

*Neuman S.P.* Effect of partial penetration on flow in unconfined aquifers considering delayed gravity response // Water Resources Research. 1974. Vol. 10, N 2. P. 303–312.

*Neuman S.P.* Analysis of pumping test data from anisotropic unconfined aquifers // Water Resources Research. 1975. Vol. 11, N 2. P. 329–345.

*Neuman S.P.* Perspective on «Delayed yield» // Water Resources Research. 1979. Vol. 15, N 4. P. 899–908.

*Neuman S.P.*, *Witherspoon P.A.* Theory of flow in aquicludes adjacent to slightly leaky aquifers // Water Resources Research. 1968. Vol. 4, N 1. P. 103–112.

*Neuman S.P.*, *Witherspoon P.A.* Applicability of current theories of flow in leaky aquifers // Water Resources Research. 1969a. Vol. 5, N 4. P. 817–829.

Neuman S.P., Witherspoon P.A. Theory of flow in a confined two aquifer system // Water Resources Research. 1969b. Vol. 5, N 4. P. 803–816.

Papadopulos I.S., Cooper H.H. Drawdown in a well of large diameter // Water Resources Research. 1967. Vol. 3, N 1. P. 241–244.

*Picking L.W.* Analyzing the recovery of a finite-diameter well after purging at an unknown rate – A substitute for slug-testing // Ground Water. 1994. Vol. 32, N 1. P. 91–95.

*Poeter E.P., Hill M.C.* Documentation of UCODE, a computer code for universal inverse modeling // U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations. 1998. Report 98-4080.

Sternberg Y.M. Some approximate solutions of radial flow problems // Journal of Hydrology. 1969. Vol. 33, N 2. P. 158–166.

*Sunjoto S.* Infiltration well and urban drainage concept // Future groundwater at risk. Proceedings of the Helsinki Conference. 1994. P. 527–532.

*Theis C.V.* The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage // Transactions, American Geophysical Union. 1935. Vol. 35, pt. 2. P. 519–524.

*Tokar L.J.* A modular finite-element model (MODFE) for areal and axisymmetric ground-water-flow problems, part I: model description and user's manual // Techniques of water-resources investigations of the U.S. Geological Survey. 1993. Book 6. Chapter A3.

*Warren J.E., Root P.J.* The behavior of naturally fractured reservoirs // Society of Petroleum Engineers Journal. 1963. Vol. 3, N 3. P. 245–255.

# оглавление

Вве	цение		3
Гла	ва 1. (	Описание программного комплекса ANSDIMAT	7
1.1.	Начал	о работы с программным комплексом	8
	1.1.1.	Запуск программного комплекса	8
	1.1.2.	Создание нового проекта	9
	1.1.3.	Открытие проекта для обработки	. 19
	1.1.4.	Редактирование ранее созданного проекта	. 20
	1.1.5.	Работа с диалоговыми окнами	. 21
1.2.	Главн	ое меню программы ANSDIMAT	. 22
1.3.	Ввод (	данных ОФО: диалоговое окно «Редактор для ввода данных	
	опыт	но-фильтрационного опробования»	. 29
	1.3.1.	Общая информации по опытному опробованию: вкладка	20
	122	«Опрооование»	. 30
	1.3.2.	вод таоличных данных по опытному опросованию:	22
	122	Вкладка «Данные»	. 33
	1.3.3.	вспомогательные деиствия для ввода данных: вкладка «Опции»	. 48
1.4.	Выбор	о расчетной схемы: диалоговое окно «Выбор расчетной	
	схемы	»	. 50
1.5.	Выбоі	у условий провеления опробования: лиалоговое окно	
	«Усло	вия проведения опробования»	. 52
16	Графи		54
1.0.	161	Выбор графика, скважин и замеров, лиалоговое окно	
	1.0.11	«Выбор графика»	. 60
	1.6.2.	Вид графика	. 64
	1.6.3.	Просмотровые графики	. 71
	1.6.4.	График расхода	. 74
	1.6.5.	Режим просмотра данных	. 82
	1.6.6.	Настройки	. 85
1.7.	Обраб	ботка ОФО	. 87
	1.7.1.	Аналитический способ обработки: подбор параметров	. 87

	1.7.2. Графоанали	тическая обработка	103
	1.7.3. Способ бисс	сектрисы	114
	1.7.4. Решение обр	ратной задачи	117
1.8.	Сохранение данны	х	127
1.9.	Численный блок		129
Гла	ва 2. Аналитичес	кие зависимости: откачка с постоянным	
	расходом из одно	й опытной скважины	134
2.1.	Изолированный на	порный водоносный пласт	135
	2.1.1. Неограниче	нный в плане водоносный пласт (схема Тейса)	135
	2.1.2. Полуограни	ченный в плане водоносный пласт	139
	2.1.3. Ограниченн	ый в плане водоносный пласт (пласт-полоса)	142
2.2.	Точечный источни	к: несовершенная скважина в напорном	
	водоносном пласте	3	149
	2.2.1. Неограниче	нный водоносный пласт в плане и разрезе	151
	2.2.2. Полуограни	ченный пласт для точечного источника	152
	2.2.3. Ограниченн	ый пласт для точечного источника	156
2.3.	Линейный источни	к: несовершенная скважина в напорном	
	водоносном пласте		159
	2.3.1. Неограниче 2.2.2. Потистраниче	нныи водоносныи пласт в плане и разрезе	159
	2.3.2. Полуограни 2.2.2. Отполности	ченный пласт для линейного источника	162
	2.5.5. Ограниченн	ыи пласт для линеиного источника	107
2.4.	Безнапорный водо	носный пласт	173
	2.4.1. Неограниче 2.4.2. Потистраниче	нныи в плане водоносный пласт	1/4
	2.4.2. Полуограни	пласты	183
25	Водоносные		102
2.3.	251 Поротоконии	лекс с перетеканием	103
	2.5.1. Перетекани 2.5.2. Перетекани	на водоносного пласта с настоянным напором	104
	напором	с из водоносного пласта с изменяющимся	193
	2.5.3. Перетекани	с учетом емкости разлеляющего слоя	195
	2.5.4. Профильно-	анизотропный водоносный пласт	201
2.6.	Двухслойный водс	носный комплекс	203
2.7.	Слоистые системы		206
	2.7.1. Трехслойны	е системы	207
	2.7.2. Двухслойны	е системы	211
2.8.	Планово-неодноро	дный пласт	215
2.9.	Откачка около рек	и	218
2.10	). Наклонный водоно	осный пласт	223
2.11	. Трещиновато-пори	стая среда	226
	2.11.1. Решения Me	енча	227
	2.11.2. Скважина в	вертикальной трещине	229
	2.11.3. Скважина в	горизонтальной трещине	231

Гла	ва 3. Аналитические зависимости для различных условий	
	проведения опытных опробований	234
3.1.	Откачка с постоянным понижением	234
3.2.	Экспресс-опробование	236
	3.2.1. Решения Купера и Пикинга	236
	3.2.2. Решение Бауэра–Райса	238
	3.2.3. Решения Хворслева	240
3.3.	Групповая откачка с постоянным расходом	242
	3.3.1. Изолированный напорный водоносный пласт	
	(совершенная скважина)	243
	3.3.2. Точечный источник в неограниченном в плане и разрезе	
	напорном водоносном пласте	252
3.4.	Откачка с переменным расходом	253
	3.4.1. Одна опытная скважина с переменным расходом	255
	3.4.2. Несколько опытных скважин с переменным расходом	256
3.5.	Восстановление уровня	257
	3.5.1. Одна опытная скважина с постоянным расходом	260
	3.5.2. Несколько опытных скважин с постоянным расходом	273
	3.5.3. Переменный расход	275
Гла	ва 4. Способы обработки данных опытно-фильтрационных	
	опробований	278
4.1.	- Графоаналитические способы	279
	4.1.1. Способ прямой линии	279
	4.1.2. Способ горизонтальной прямой линии	281
	4.1.3. Способ эталонной кривой	282
4.2.	Способ биссектрисы	284
4.3.	Аналитические способы	286
	4.3.1. Решение прямой задачи: способ «ручного» подбора	
	параметров	286
	4.3.2. Решение обратной задачи: способ «автоматического»	
	подбора параметров	289
При	ложение 1. Фильтрационные параметры	293
При	ложение 2. Границы фильтрационного потока	297
При	ложение 3. Список решений	303
При	ложение 4. Функциональные зависимости	312
При	ложение 5. Алгоритмы ввода данных для распространенных схем	
	и условий опробования	314
При	ложение б. Сообщения об ошибках	321
Алг	оритмы работы с модулями программного комплекса	324
Усл	овные обозначения	325
Лит	ература	329

#### Научное издание

### Леонид Наумович Синдаловский

## ANSDIMAT — программный комплекс для определения параметров водоносных пластов

Утверждено к печати Научно-техническим советом Санкт-Петербургского отделения Института геоэкологии им. Е. М. Сергеева РАН (Санкт-Петербургское отделение ИГЭ РАН)

Редактор издательства Т. П. Жукова Художник Л. А. Яценко Технический редактор И. М. Кашеварова

Лицензия ИД № 02980 от 06 октября 2000 г. Подписано к печати 23.05.13. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 21. Уч.-изд. л. 19.5. Доп. тираж 50 экз. Тип. зак. № 3638. С 93

Санкт-Петербургская издательская фирма «Наука» 199034, Санкт-Петербург, Менделеевская линия, 1 E-mail: main@nauka.nw.ru Internet: www.naukaspb.com

Первая Академическая типография «Наука» 199034, Санкт-Петербург, 9 линия, 12

