

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА НЕФТЯНАЯ

*Методические указания к лабораторным работам
студентов бакалавриата направления 21.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных
и газовых месторождений

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА НЕФТЯНАЯ

*Методические указания к лабораторным работам
студентов бакалавриата направления 21.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020

УДК 622.276.031:532.5 (073)

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА НЕФТЯНАЯ: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *Г.Ю. Коробов, К.Ш. Хайбуллина*. СПб, 2020. 73 с.

Описываются лабораторные стенды, методика и порядок выполнения работ.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело» в соответствии с учебным планом и программой дисциплины «Подземная гидромеханика».

Научный редактор проф. *М.К. Розачев*

Рецензент канд. техн. наук *Р.Р. Гумеров* (ООО «Газпромнефть НТЦ»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

ПОДЗЕМНАЯ ГИДРОМЕХАНИКА НЕФТЯНАЯ

*Методические указания к лабораторным работам
студентов бакалавриата направления 21.03.01*

Сост.: *Г.Ю. Коробов, К.Ш. Хайбуллина*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

Ответственный за выпуск *Г.Ю. Коробов*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 11.06.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 4,2. Усл.кр.-отг. 4,2. Уч.-изд.л. 4,0. Тираж 75 экз. Заказ 345. С 34.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ВВЕДЕНИЕ

Одним из методов научного познания процессов фильтрации, изучаемых в курсе «Подземная гидромеханика», является метод исследования, связанный с моделированием, т.е. изучения процессов фильтрации при помощи моделей (физических, математических, аналоговых и др.).

Важным элементом изучения студентами курса «Подземная гидромеханика» является лабораторный практикум, цель которого заключается в экспериментальном изучении процессов фильтрации при приближенном моделировании фильтрационных процессов с помощью элементарных лабораторных моделей и обосновании возможности применения теоретических расчетных формул для распределения давления в моделях пласта и дебитов скважин и галерей в условиях лабораторных опытов.

Выполнение лабораторного практикума имеет целью углубление и закрепление теоретических знаний и направлено на решение следующих задач: привитие навыков проведения лабораторных исследований процессов фильтрации; выработку аналитического мышления при изучении и решении поставленных задач; выработку умения грамотно и сжато излагать суть вопросов лабораторной работы; привитие навыков выполнения расчетов по формулам с применением системы измерения СИ и других систем единиц измерения; привитие умения делать анализ полученных результатов лабораторных работ - комментировать и оценивать результаты, давать их физическую интерпретацию и связь с теоретическими исследованиями, формулировать выводы по проведенной работе; привитие навыков оформления лабораторных работ согласно требованиям, предъявляемым к инженерно-технической документации.

В настоящем лабораторном практикуме используются терминология и обозначения, принятые в теории и практике студентов бакалавриата направления 21.03.01 «Нефтегазовое дело», в предметных областях дисциплин и курсов «Подземная гидромеханика», «Физика нефтяного и газового пласта» и др. В приложении показан образец титульного листа отчета по лабораторным работам.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1.1. Порядок выполнения и оформления лабораторных работ

Перед началом выполнения лабораторной работы студенту необходимо уяснить ее содержание, цель, задачи и последовательность выполнения.

Каждая лабораторная работа может выполняться в двух вариантах:

- 1) экспериментальным путем - на экспериментальных установках, позволяющих моделировать фильтрационные процессы;
- 2) расчетным путем - в соответствии с индивидуальным вариантом расчетного задания, устанавливаемым преподавателем.

В начале описания каждой лабораторной работы приведено краткое изложение теории и расчетные формулы, а если работа носит экспериментальный характер - схема экспериментальной установки с ее основными элементами и размерами.

Более подробную информацию по теории вопроса студент может получить из учебников и лекционного курса «Подземная гидромеханика».

Ознакомившись и изучив содержание конкретной лабораторной работы, студент оформляет отчет (указывая цель, задачи, основные понятия и определения, необходимые расчетные формулы, по необходимости схему экспериментальной установки). Если работа носит экспериментальный характер, то под руководством преподавателя или лаборанта проводит первую серию измерений. Последующие измерения студент проводит самостоятельно.

При вычислениях необходимо внимательно следить за размерностями величин, подставляемых в формулы. Рекомендуется использовать размерности в системе СИ. Обработка результатов наблюдений и графический материал могут быть выполнены с применением ЭВМ.

Отчет по лабораторной работе начинается с титульного листа, форма которого приведена в приложении 1. Титульный лист и содержание отчета выполняется на белой бумаге формата А4 размером 297x210 мм. Текст выполняется обычно рукописным шрифтом

чернилами или пастой темного цвета (черного, синего, фиолетового). Высота букв должна быть не менее 2,5 мм, почерк должен быть четким, достаточно легко читаемым. Сокращение слов в тексте, кроме общепринятых, как правило, не допускается. Все формулы должны иметь сквозную нумерацию - в круглых скобках справа от формулы. Расчетные формулы должны даваться с пояснениями всех входящих в формулу физических величин и указанием их размерностей в системе СИ в той последовательности, в какой написаны в формуле буквы, обозначающие эти величины. Обозначения и размерность повторно не поясняются в тексте журнала. Допускается использование других систем единиц измерения, но окончательный результат должен быть приведен в системе СИ.

Иллюстрации (чертежи, схемы, графики) обозначаются словом «рис.» и нумеруются последовательно арабскими цифрами в пределах каждой лабораторной работы. Номер рисунка- иллюстрации помещают ниже поясняющей надписи. Рисунки должны выполняться черными чернилами или пастой темного цвета на белой непрозрачной бумаге. Иллюстрации должны иметь подрисовочный текст, который помещается под рисунком.

Цифровой материал оформляется в виде таблиц, которые должны иметь заголовки и нумеруются последовательно арабскими цифрами. В правом верхнем углу таблицы над соответствующим заголовком помещается надпись «Таблица» с указанием номера. Заголовки и слово «Таблица» начинают с прописной буквы, заголовки не подчеркивают. Для сокращения текста заголовков и подзаголовков отдельные величины (понятия) в таблицах заменяют их обозначениями, если они пояснены в тексте или приведены на иллюстрациях.

Защита и прием выполненных и оформленных лабораторных работ является завершающим этапом лабораторного практикума. При защите работ студент должен уметь кратко излагать: цель и задачи работ, их суть, проведенные наблюдения и измерения, расчеты, анализ полученных результатов и выводы. При сдаче работы студент должен знать теорию вопроса в объеме лекционного курса и уметь дать качественную оценку результатов работы.

1.2. Общие сведения о тематике лабораторного практикума

Настоящий лабораторный практикум посвящен экспериментальному изучению *установившихся (стационарных) одномерных фильтрационных потоков* жидкости и газа.

В подземной гидромеханике под *установившимся* фильтрационным потоком понимается такой поток, фильтрационные характеристики которого постоянны во времени, т.е. распределение давления, градиента давления, скорости фильтрации, массовый расход (дебит) и др. параметры не изменяются во времени:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P}{\partial t} &= 0; \quad P=P(x, y, z) \\ Q &= const \end{aligned} \quad (1.1)$$

Наиболее изученным и общим случаем *неустановившейся* фильтрации однородного сжимаемого флюида в деформируемой пористой среде по линейному закону Дарси является упругий режим фильтрации, математически описываемый уравнением

$$\nabla^2 P = \frac{1}{\chi} \frac{\delta P}{\delta t} \quad (1.2)$$

Установившиеся (стационарные) фильтрационные потоки по линейному закону Дарси как частные случаи неустановившихся потоков из уравнений (1.2) и (1.1) описываются уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 P = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial r^2} + \frac{j}{r} \frac{\partial P}{\partial r} = 0 \quad (1.3)$$

где $j = 0, 1$ и 2 для *одномерных* прямолинейно-параллельного, плоскорадиального и радиально-сферического потоков соответственно.

Под *одномерными* фильтрационными потоками в подземной гидромеханике понимаются такие потоки, в которых давление является функцией только одной координаты. В настоящем лабораторном практикуме изучаются первые два одномерных потока - прямолинейно-параллельный и плоскорадиальный. Сложные пространственные траектории реальных фильтрационных потоков могут быть приближенно представлены как состоящие из одномерных фильтрационных потоков. Кроме того, на отдельных участках реальных пла-

стов, в лабораторных установках могут существовать условия для проявления одномерных фильтрационных потоков.

Уравнение Лапласа (1.3) - линейное дифференциальное уравнение второго порядка относительно давления - для фильтрации жидкости и квадрата давления - для фильтрации идеального (совершенного) газа, т.к. функции Лейбензона с точностью постоянной пропорциональны квадрату давления.

Прямая задача подземной гидромеханики для нахождения распределения давления в пласте (модели пласта) заключается в интегрировании уравнения Лапласа при заданных граничных условиях на внутренней границе пласта (стенке скважины или галерее) и внешней (контуре питания), т.е. заданы геометрические размеры модели (границы) и условия на них. Эти решения уравнения Лапласа для различных типов одномерных фильтрационных потоков жидкости и газа рассматриваются в учебниках и лекционном курсе.

Схема экспериментального определения показателей процесса фильтрации заключается в последовательном нахождении закона распределения давления, градиента давления, скорости фильтрации, объемного (массового) расхода, закона движения частиц жидкости и др.

1.3. Основные правила техники безопасности в лаборатории

Лабораторные работы № 1-7 проводятся путем расчета характеристик процесса фильтрации жидкости и газа с использованием персональной электронно-вычислительной техники. Поэтому необходимо соблюдать меры безопасности, предусмотренные при работе на ЭВМ. При выполнении лабораторной работы № 8 необходимо соблюдать правила техники безопасности при работе с сосудами высокого давления.

При проведении лабораторных занятий следует строго выполнять следующие основные правила.

1. К выполнению лабораторных работ студенты допускаются только после прохождения инструктажа по технике безопасности, который проводит преподаватель или учебный мастер. О прохожде-

нии инструктажа студенты должны расписаться в контрольных листах инструктажа.

2. Лабораторная работа на экспериментальной установке проводится после изучения методики проведения опыта и получения разрешения преподавателя или учебного мастера (лаборанта).

3. На модели лабораторной работы № 8 с подводом электроэнергии после окончания опыта необходимо отключить компрессор от сети.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

2.1. Краткая теория вопроса

Прямолинейно-параллельным установившимся фильтрационным потоком считается такой поток, в котором траектории движения частиц жидкости совпадают с линиями токов, траектории параллельны, а скорости фильтрации во всех токах любого поперечного сечения (перпендикулярного линиям токов) равны друг другу. Законы движения вдоль всех траекторий такого фильтрационного потока одинаковы, и потому достаточно изучить движение вдоль одной из траекторий, которую можно принять за ось координат - ось X (рис.2.1). Такой поток называется *одномерным*.

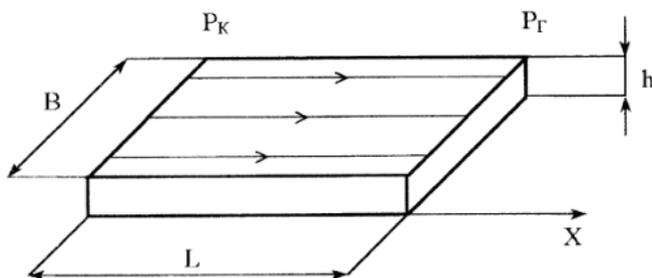


Рис.2.1. Схема прямолинейно-параллельного фильтрационного потока в пласте

В лабораторных условиях прямолинейно-параллельный одномерный поток имеет место при движении жидкости или газа через цилиндрический керн или через трубку постоянного диаметра, заполненную пористой средой. Пласт, в котором имеет место прямолинейно-параллельный поток, можно схематизировать в виде прямоугольного параллелепипеда длиной L_K , шириной B и высотой h (толщина пласта) - рис.2.1. Левая грань является контуром питания - здесь давление постоянное и равно P_K , правая грань является поверхностью стока (галерея) с давлением P_Γ . Все остальные грани непроницаемы. Подобная картина может наблюдаться на отдельных участках пластов залежей нефти и газа при движении жидкости от нагнетательных скважин к эксплуатационным. Такие пласты часто называются *полосообразными*.

Исследование задач одномерного потока относится к классу краевых задач математической физики. Так, дифференциальное уравнение одномерной прямолинейно-параллельной установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в однородной пористой среде имеет вид

$$\frac{d^2 P}{dx^2} \quad (2.1)$$

Это частный случай уравнения (1.3).

Интегрируя уравнение (2.1) при граничных условиях и параметрах пласта и флюида, получают закон *распределения давления при установившейся фильтрации жидкости в полосообразном пласте*:

$$P(x) = P_K - \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} x, \quad (2.2)$$

где $P(x)$ - давление в произвольной точке x пласта, Па ($1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$); P_K и P_Γ - заданное давление на контуре питания и галерее соответственно, Па; L_K - длина пласта, м; x - координата точки пласта, отсчитываемая от контура питания, м.

Уравнение (2.2) показывает, что теоретическое распределение давления в пласте при установившейся фильтрации несжимаемой жидкости графически представляется в виде прямолинейного графика. Эта прямая называется *пьезометрической линией*.

Градиент давления (в Па/м) в этом случае определяется выражением:

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dx} = \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (2.3)$$

Скорость фильтрации (в м/с), согласно закону, Дарси равна

$$v = -\frac{k}{\mu} \frac{dP}{dx} = \frac{k}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (2.4)$$

где k - коэффициент проницаемости пласта, м²; μ - коэффициент динамической вязкости жидкости. Па·с; ($\mu_{\text{воды}}^{20} = 1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$).

Дебит галереи (объемный расход жидкости в м³/с) равен

$$Q = vF = \frac{kF}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} = \frac{kF}{\mu L_K} \Delta P, \quad (2.5)$$

где $F = Bh$ - площадь поперечного сечения пласта (или площадь фильтрации), м²; B - ширина пласта, м; h - толщина пласта, м; $\Delta P = P_K - P_\Gamma$ — депрессия на пласт, равная разности давлений на контуре питания и галерее, Па.

Закон движения жидких частиц определяется как

$$t = \frac{m}{\frac{k}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}} \cdot x = \frac{m \cdot \mu \cdot L_K}{k \cdot (P_K - P_\Gamma)} \cdot x \quad (2.6)$$

Средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление определяется как среднее арифметическое между давлением на контуре питания и на галерее:

$$\tilde{P} = \frac{P_K + P_\Gamma}{2}, \quad (2.7)$$

Так как площадь фильтрации полосообразного пласта величина постоянная, то при установлении фильтрации несжимаемой жидкости расход жидкости одинаков через любое поперечное сечение пласта и скорость фильтрации также величина постоянная, не зависящая от координаты.

Скорость фильтрации связана с действительной средней скоростью движения жидкости W соотношением, м/с:

$$v = m \cdot W \quad (2.8)$$

где m - коэффициент пористости пласта; W - действительная средняя скорость движения жидкости, м/с.

Из (2.8) видно, что при прямолинейно-параллельной фильтрации несжимаемой жидкости скорость движения также не зависит от координаты. Скорость фильтрации, скорость движения и дебит галереи зависят от депрессии на пласт. Эта зависимость имеет линейный характер только при выполнении линейного закона фильтрации Дарси, когда потери давления при движении флюидов в пористой среде с небольшими скоростями обусловлены проявлениями сил вязкости (сил трения).

Линейный закон фильтрации Дарси применим только в определенном диапазоне режимов фильтрации, т.е. необходимо выделить верхнюю и нижнюю границы применимости закона Дарси и соответствующие им две группы причин. Верхняя граница применимости закона Дарси характеризуется некоторой **верхнекритической скоростью фильтрации** $v_{кр}^B$. При высоких скоростях фильтрации выше закон Дарси нарушается из-за проявления сил инерции.

Нижняя граница характеризуется проявлением не-newтоновских реологических свойств пластовых флюидов, их взаимодействием с твердым скелетом пористой среды при достаточно малых скоростях фильтрации, меньших некоторой **нижнекритической скорости фильтрации** $v_{кр}^H$ (рис.2.2).

Зависимость скорости фильтрации от градиента давления (рис.2.2) может использоваться для качественного установления вида закона фильтрации.

Нелинейные законы фильтрации при больших скоростях фильтрации, например, при фильтрации газа, наиболее часто описываются двучленной формулой, которая для прямолинейнопараллельного течения без учета сил тяжести имеет вид:

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{\mu}{k} v + \beta \frac{\rho}{\sqrt{K}} v^2, \quad (2.9)$$

где ρ - плотность жидкости или газа, кг/м³; β — константа пористой среды, связанная с микрошероховатостью и извилистостью поровых каналов, определяемая экспериментально, м.

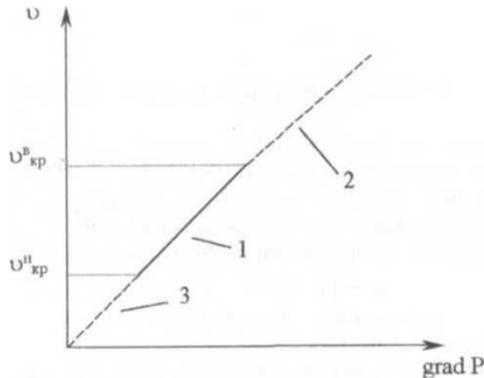


Рис. 2.2. Границы применимости закона Дарси:

- 1 - $v < v^H_{кр} < v < v^B_{кр}$ - линейный закон Дарси;
 2 - $v > v^B_{кр}$ - нелинейный закон, проявление сил инерции;
 3 - $v < v^H_{кр}$ - нелинейный закон, проявление неньютоновских реологических свойств жидкости

В уравнении (2.9) первое слагаемое в правой части учитывает потери давления из-за вязкости жидкости (трения), второе - за счет действия сил инерции, связанных с криволинейностью и извилистостью поровых каналов.

Закон Дарси является частным случаем двучленного закона фильтрации, когда вторым членом в (2.9) можно пренебречь.

Отметим, что нарушение линейного закона фильтрации еще не означает переход от ламинарного режима движения флюидов в пористой среде к турбулентному режиму.

В подземной гидромеханике для характеристики закона движения флюидов в пористой среде по аналогии с трубной гидравликой используют безразмерный параметр - число Рейнольдса, которое по физическому смыслу представляет собой отношение сил инерции к силам вязкостного трения:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu}, \quad (2.10)$$

где d - некоторый характерный линейный параметр пористой среды, м; v - характерная скорость, м/с; ρ - плотность жидкости, кг/м³; μ - коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с.

В.Н. Щелкачев в качестве характерной скорости взял скорость фильтрации, а линейный параметр принял равным:

$$d = 10 \cdot m^{-2,3} \sqrt{k}, \tag{2.11}$$

где k - проницаемость пористой среды; m - коэффициент пористости.

Таким образом, формула В.Н. Щелкачева для определения числа Рейнольдса имеет вид:

$$Re = \frac{10\nu\rho\sqrt{k}}{m^{2,3}\mu}, \tag{2.12}$$

причем верхнекритические значения числа Рейнольдса $Re_{кр}^B$, соответствующие верхнекритическим значениям скорости фильтрации $v_{кр}^B$, лежат в интервале:

$$0,032 \leq Re_{кр}^B \leq 14 \tag{2.13}$$

А для различных образцов пористых сред интервалы критических значений могут быть уменьшены и составляют:

- для однородной дроби13-14
- для однородного крупнозернистого песка.....3-10
- для неоднородного мелкозернистого песка.....0,34-0,54
- для цементированного песчаника0,05-1,4

По **М.Д. Миллиончикову** верхнекритическое значение числа Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re_{кр}^B = \frac{\nu\rho\sqrt{k}}{m^{1,5}\mu}, \tag{2.14}$$

а уточненные критические его значения лежат в пределах:

$$0,0015 \leq Re_{кр}^B \leq 0,6. \tag{2.15}$$

Для оценки закона фильтрации в данном фильтрационном потоке вычисляют значение Re , например, по формуле (2.10), и сравнивают с $Re_{кр}^B$ (2.11). Если вычисленное значение $Re > 14$, то закон Дарси нарушен, если $Re < 0,032$, то закон Дарси справедлив. Достаточно широкий диапазон изменения $Re_{кр}^B$ объясняется тем, что два параметра – пористость и проницаемость – неоднозначно характеризуют микроструктуру порового пространства.

Область существования закона Дарси может также характеризоваться безразмерным параметром DA (Дарси), определяемым равенством:

$$DA = \frac{v\mu L}{k\Delta P} \quad (2.16)$$

Закон Дарси справедлив для значений параметра Дарси:

$$DA = 1 \quad (2.17)$$

Нарушения линейного закона фильтрации Дарси при малых скоростях фильтрации характеризуются очень малыми значениями нижнекритических скоростей фильтрации $v_{кр}^H \approx 1,08 \cdot 10^{-6} \div 7,5 \cdot 10^{-6}$ м/с и нижнекритическими значениями числа Рейнольдса $Re_{кр}^H \approx 0,5 \cdot 10^{-6} \div 0,5 \cdot 10^{-5}$ (для фильтрации нефти в естественных породах), $Re_{кр}^H \approx 0,5 \cdot 10^{-4} \div 0,9 \cdot 10^{-4}$ (фильтрация воды в искусственных породах).

Нижняя граница справедливости закона Дарси связана с проявлением неньютоновских свойств пластовых флюидов, а также других физико-химических эффектов и определяется реологической моделью. Нарушения линейного закона фильтрации Дарси при малых пластового флюида (например, модель фильтрации с предельным градиентом и др.).

Определение закона фильтрации жидкостей и газов имеет важное практическое значение, т.к. позволяет правильно рассчитывать дебиты нефтяных и газовых скважин, характер изменения пластовых давлений, определять параметры пласта по данным промысловых гидродинамических исследований скважин и т.д.

2.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование прямолинейно-параллельного установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте.

Задачи лабораторной работы:

1) изучение распределения давления по длине линейного пласта при фильтрации несжимаемой жидкости;

2) изучение распределения градиента давления и скорости фильтрации по длине линейного пласта при фильтрации несжимаемой жидкости;

3) определение объемного расхода жидкости в потоке;

4) определение закона движения частиц жидкости и средневзвешенного по объему порового пространства пластового давления;

5) определение минимальной верхнекритической скорости фильтрации жидкости, при которой нарушается закон Дарси.

2.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 2.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемого фильтрационного потока получить формулы и изобразить графически распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации по длине линейного пласта при фильтрации несжимаемой жидкости (в соответствии с формулами (2.2-2.4)).

2. Объемный расход жидкости в потоке (дебит галереи), закон движения частиц жидкости и средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление определить по формулам (2.5-2.7). Дебит галереи выразить в $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{сут}$ и $\text{т}/\text{сут}$.

3. Определить минимальную верхнекритическую скорость фильтрации жидкости, при которой нарушается закон Дарси. Для этого воспользоваться формулой В.Н.Щелкачева (2.12). Критическое значение числа Рейнольдса принять равным единице (т.е. $Re_{кр}=1$). Сравнить полученное значение верхнекритической скорости фильтрации жидкости с полученным ранее значением скорости фильтрации.

4. Провести анализ и оценку полученных результатов и сделать выводы. В выводах следует отразить полученные результаты с точки зрения выполнения поставленных задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте характеристику установившихся фильтрационных потоков.
2. Напишите дифференциальные уравнения одномерных потоков для установившихся режимов фильтрации.
3. Охарактеризуйте понятия - распределение давления, градиент давления, скорость фильтрации и скорость движения, их размерности.
4. Напишите закон Дарси и другие законы фильтрации.
5. Напишите формулы распределения давления, градиента давления скорости фильтрации при установившейся фильтрации несжимаемой жидкости от контура питания к галерее.
6. Напишите формулы определения закона движения частиц жидкости и средневзвешенного по объему порового пространства пластового давления.
7. Каковы основные положения оценки границ применимости линейного закона Дарси?
8. Нелинейные законы фильтрации при больших скоростях фильтрационного потока.
9. Написать формулы В.Щелкачева и М. Миллионщикова.
10. Каковы практические аспекты применения теории одномерного потока?

Таблица 2.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	P_k , МПа	P_r , МПа	L_k , км	k , мкм ²	μ , МПа·с	B , м	h , м	ρ , кг/м ³	m , %
1	10,0	7,5	10,0	1,0	1,0	100	10	1000	20
2	9,8	7,3	9,5	0,9	1,5	120	9	995	19
3	9,6	7,1	9,0	0,8	2,0	140	8	990	18
4	9,4	6,9	8,5	0,7	2,5	160	7	985	17
5	9,2	6,7	8,0	0,6	3,0	180	6	980	16
6	9,0	6,5	7,5	0,5	3,5	200	5	975	15
7	8,8	6,3	7,0	0,4	4,0	180	4	970	16
8	8,6	6,1	6,5	0,3	4,5	160	3	965	17
9	8,4	5,9	6,0	0,2	5,0	140	2	960	18
10	8,2	5,7	5,5	0,1	5,5	120	1	955	19
11	8,5	6,0	6,0	1,0	5,0	100	2	950	20
12	8,7	6,2	6,5	0,9	4,5	150	3	945	21
13	8,9	6,4	7,0	0,8	4,0	200	4	940	22
14	9,1	6,6	7,5	0,7	3,5	180	5	935	23
15	9,3	6,8	8,0	0,6	3,0	160	6	930	24
16	9,5	7,0	8,5	0,5	2,5	140	7	925	25
17	9,7	7,2	9,0	0,4	2,0	120	8	920	24
18	9,9	7,4	9,5	0,3	1,5	100	9	915	23
19	10,0	7,5	10,0	0,2	1,0	120	10	910	22
20	9,8	7,3	10,0	0,1	2,0	140	12	905	21
21	9,6	7,1	9,5	1,0	3,0	160	14	900	20
22	9,4	6,9	9,0	0,9	4,0	180	16	895	19
23	9,2	6,7	8,5	0,8	5,0	200	18	890	18
24	9,0	6,5	8,0	0,7	6,0	150	20	885	17
25	8,8	6,3	7,5	0,6	7,0	100	18	880	16
26	8,6	6,1	7,0	0,5	8,0	120	16	875	15
27	8,4	5,9	6,5	0,4	9,0	140	14	870	16
28	8,2	5,7	6,0	0,3	8,0	160	12	865	17
29	8,5	6,0	5,5	0,2	7,0	180	10	860	18
30	8,7	6,2	6,0	0,1	6,0	200	8	855	19

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

3.1. Краткая теория вопроса

Представим установившуюся фильтрацию жидкости к гидродинамически совершенной скважине радиусом r_c , пробуренной в центре однородного по параметрам горизонтального кругового пласта с внешним радиусом R_K и постоянной толщиной h с непроницаемой кровлей и подошвой пласта, схематически представленного на рис. 3.1.

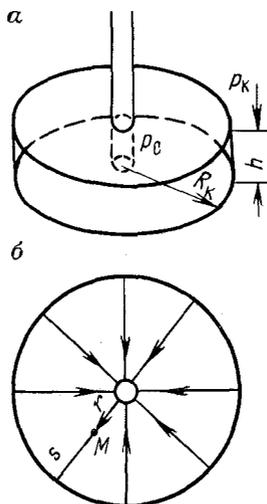


Рис. 3.1. Схема плоскорadiaльного потока

Характерными особенностями такого потока являются следующие:

- во-первых, частицы жидкости движутся параллельно в одной и той же плоскости, проходящей через ось скважины;
- во-вторых, прямолинейные траектории движения частиц жидкости в любой плоскости, перпендикулярной оси скважины радиально сходятся в одной точке на оси скважины;

- в-третьих, картины движения вдоль всех и любой траектории движения одинаковы, а, следовательно, для изучения такого потока достаточно изучить движение вдоль одной любой траектории, т.е. поток является одномерным по радиусу.

Такой установившийся фильтрационный поток называется одномерным *плоскорадиальным*, и фильтрация в нем несжимаемой жидкости по закону Дарси в наиболее общей форме описывается дифференциальным уравнением (3.1), которое в цилиндрических координатах имеет вид

$$\frac{d^2P}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP}{dr} = 0 \quad (3.1)$$

где $P = P(r)$ - давление на расстоянии r от оси скважины, Па; r - расстояние от оси скважины до рассматриваемой точки, м.

Если заданы граничные условия, например постоянное давление P_K на контуре питания радиуса R_K и забойное давление P_C на стенке скважины r_c , то, интегрируя уравнение (3.1), получают основные формулы, характеризующие установившееся плоскорадиальное движение.

1. Распределение давления в круговом пласте:

$$P(r) = P_K - \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \ln \frac{R_K}{r} = P_C + \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \ln \frac{r}{r_c}, \quad (3.2)$$

где $P(r)$ - установившееся давление на расстоянии r от скважины, Па; P_K - установившееся контурное (пластовое) давление на контуре питания R_K , Па; P_C - установившееся давление в скважине, Па; r - радиус скважины, м; R_K - радиус контура питания пласта, м.

Из формулы (3.2) видно, что распределение давления представляет собой логарифмическую зависимость давления от радиуса и графически представляется *логарифмической кривой*.

2. Градиент давления

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dr} = \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \frac{1}{r}, \quad (3.3)$$

3. Скорость фильтрации

$$\bar{v} = -\frac{k P_K - P_C}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.4)$$

4. Дебит (объемный расход) скважины (по формуле Дюпюи)

$$Q = \frac{2\pi kh P_K - P_C}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.5)$$

где Q - дебит скважины, м³/с; k - проницаемость пласта, м²; h - толщина пласта, м; μ - динамическая вязкость, Па·с, ($\mu_{\text{в}}^{20} \approx 0,001$ Па·с).

5. Закон движения частиц жидкости

$$t = \frac{m \cdot \mu \cdot \ln \frac{R_K}{r_C} \cdot (r_0^2 - r^2)}{2k(P_K - P_C)} = \frac{\pi \cdot m \cdot h \cdot (r_0^2 - r^2)}{Q}, \quad (3.6)$$

где r_0 - начальное положение частицы жидкости; r - текущее положение частицы жидкости.

6. Время движения частицы жидкости от контура питания радиуса R_K до забоя скважины радиуса

$$T = \frac{m \cdot \mu \cdot \ln \frac{R_K}{r_C} \cdot (R_K^2 - r_C^2)}{2k(P_K - P_C)} = \frac{\pi \cdot m \cdot h \cdot (R_K^2 - r_C^2)}{Q}, \quad (3.7)$$

7. Средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление:

$$\tilde{P} = P_K - \frac{P_K - P_C}{2 \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.8)$$

8. Дебит скважины можно выразить в виде уравнения притока:

$$Q = K \cdot \Delta P \quad (3.9)$$

$$K = \frac{2\pi kh}{\mu \cdot \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (3.10)$$

где K - коэффициент продуктивности скважины, $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{Па}$. В промышленных условиях часто используется размерность коэффициента продуктивности $[K] - \text{м}^3/(\text{сут}\cdot\text{МПа})$; $\Delta P = P_K - P_C$ - депрессия на пласт, Па.

Изучение особенностей плоскорадиальной фильтрации имеет большое практическое значение, т.к. приток нефти и газа к забоям эксплуатационных гидродинамически совершенных скважин подчиняется законам плоско-радиальной фильтрации.

Формулы (3.9-3.10) лежат в основе промыслового гидродинамического метода **исследования скважин на установившихся режимах - метода снятия индикаторных диаграмм**. Графическое изображение зависимостей «дебита Q от забойного давления P_C » и «дебита Q от депрессии на пласт ΔP » называются **индикаторными диаграммами**. Индикаторные диаграммы строятся по результатам фактических замеров дебитов и забойных давлений на нескольких установившихся режимах работы скважины.

С помощью этого метода исследования определяются (оцениваются) такие **фильтрационные характеристики пласта и скважины**, как:

- **коэффициент продуктивности добывающей (или приемистости нагнетательной) скважины;**
- **коэффициент гидропроводности пласта,**
- **коэффициент проницаемости пласта.**

Индикаторная диаграмма строится в координатах $[Q; \Delta p]$, если известно пластовое давление, или в координатах $[Q; P_C]$, если пластовое давление неизвестно (рис.3.2), и имеет обычно вид прямой линии. Во втором случае - экстраполяция прямолинейного графика до оси давления позволяет определить пластовое давление.

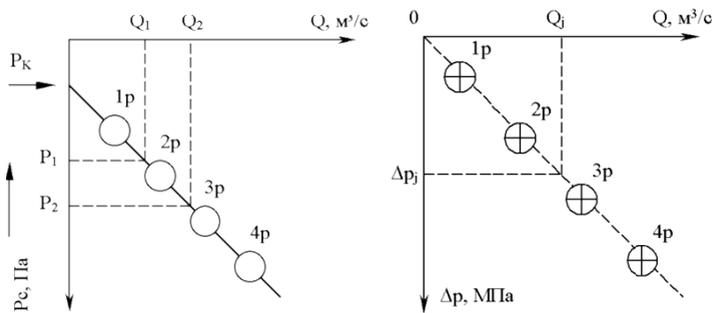


Рис. 3.2. Построение индикаторных диаграмм

Коэффициент продуктивности определяется графически по формуле:

$$K = \frac{Q_i}{\Delta p_i}, \quad (3.11)$$

где Q_i - значение произвольно выбранной точки на прямолинейном графике индикаторной линии $[Q; \Delta p]$, рис.3.2; Δp_i - соответствующее значение депрессии.

При неизвестном пластовом давлении $P_{пл} = P_k$ коэффициент продуктивности определяется по двум произвольным точкам на прямолинейном графике индикаторной линии $[Q; P_c]$ по формуле:

$$K = \frac{Q_2 - Q_1}{P_1 - P_2}, \quad (3.12)$$

Коэффициент продуктивности показывает дебит скважины, приходящийся на единичную депрессию, и характеризует ее добычные возможности.

Определив коэффициент продуктивности, представляется возможным оценить по формуле (3.10) **коэффициент гидропроводности пласта в призабойной зоне скважины**:

$$\varepsilon = \frac{kh}{\mu} = \frac{K \ln \frac{R_K}{r_C}}{2\pi}, \quad (3.13)$$

где R_k берется равным половине расстояния до соседней скважины; r_c - радиус долота, которым бурилась скважина, если она гидродинамически совершенная.

Если известны толщина пласта h и вязкость пластовой жидкости μ , то оценивается величина **проницаемости призабойной зоны скважины**:

$$k = \varepsilon \frac{\mu}{h}. \quad (3.14)$$

3.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование плоско-радиального установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте.

Задачи лабораторной работы:

1) изучение распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации в залежи круговой формы при установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси;

2) определение дебита скважины, средневзвешенного по объему морового пространства пластового давления и времени движения частицы от контура питания до забоя скважины;

3) изучение элементов гидродинамических исследований скважин на установившихся режимах фильтрации - построение индикаторных диаграмм и, на базе их обработки, определение и оценка фильтрационных свойства пласта (коэффициентов продуктивности, гидропроводности и проницаемости).

3.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 3.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемого фильтрационного потока получить формулы и изобразить графически распределение давления, градиента давления и скорости фильтрации по пласту в зависимости от текущего радиуса r (в соответствии с формулами (3.2-3.4)). Значения текущего радиуса r выбрать следующие: 10, 25, 50, 75, 100 м и далее через 200 метров.

2. Дебит скважины, средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление и время движения частицы от контура питания радиуса R_k до забоя скважины радиуса r_c необходимо определить по формулам (3.5-3.8). Дебит скважины выразить в $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{сут}$ и $\text{т}/\text{сут}$, а время движения частицы - в секундах и сутках.

3. В соответствии с исходными данными (табл. 3.2) построить индикаторные диаграммы - зависимости «дебита Q от забойного давления P_c » и «дебита Q от депрессии на пласт ΔP ». По индикаторной диаграмме «дебит Q от забойного давления P_c » определить давление на контуре питания R_k , а по диаграмме «дебит Q от депрессии на пласт ΔP » - определить коэффициент продуктивности скважины K (в $\text{т}/\text{сут}\cdot\text{МПа}$, в $\text{м}^3/\text{сут}\cdot\text{МПа}$ и в $\text{м}^3/\text{с}\cdot\text{Па}$)

4. Используя полученное значение коэффициента продуктивности K и формулу (3.9), написать уравнение притока жидкости к скважине, а по формулам (3.13-3.14) определить коэффициент гидропроводности пласта ϵ (в $\text{м}^3/\text{Па}\cdot\text{с}$ и в $\text{мкм}^2\cdot\text{м}/\text{МПа}\cdot\text{с}$) и коэффициент проницаемости пласта (в м^2 и в мкм^2).

5. Провести анализ и оценку полученных результатов, а также сделать необходимые пояснения, комментарии и выводы. В выводах рекомендуется сформулировать основные полученные результаты с акцентом на выполнение задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте характеристику плоскорадиального фильтрационного потока.

2. Напишите дифференциальные уравнения неустановившейся и установившейся плоскорадиальной фильтрации жидкости по линейному закону Дарси.

3. Напишите основные формулы, характеризующие плоскорадиальный установившийся приток к скважине в центре кругового пласта - закон распределения давления, градиент давления, дебит скважины и др.

4. Вспомните об обратных задачах подземной гидромеханики и теоретических основах гидродинамических исследований скважин на установившихся режимах.

5. Что такое индикаторная диаграмма?
6. Напишите формулу Дюпюи и уравнение притока жидкости к скважине по линейному закону Дарси.
7. Что понимается под коэффициентом продуктивности скважины, коэффициентом гидропроводности пласта, как они определяются?
8. Дайте физическую интерпретацию гидропроводности и проницаемости пласта, найденных по данным исследований скважин на установившихся режимах.

Таблица 3.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	P_k , МПа	P_c , МПа	R_k , м	r_c , м	μ , МПа·с	ρ , кг/м ³	h , м	k , мкм ²	m , %
1	10,0	7,5	1000	0,10	1,0	1000	10	0,2	20
2	9,8	7,3	1200	0,12	1,5	995	3	0,9	19
3	9,6	7,1	1400	0,14	2,0	990	4	0,6	18
4	9,4	6,9	1600	0,16	2,5	985	7	0,3	17
5	9,2	6,7	1800	0,18	3,0	980	5	0,5	16
6	9,0	6,5	2000	0,20	3,5	975	4	0,5	15
7	8,8	6,3	1800	0,18	4,0	970	4	0,4	16
8	8,6	6,1	1600	0,16	4,5	965	3	0,3	17
9	8,4	5,9	1400	0,14	5,0	960	2	0,2	18
10	8,2	5,7	1200	0,12	5,5	955	1	1,0	19
11	8,5	6,0	1000	0,10	5,0	950	2	1,0	20
12	8,7	6,2	1200	0,12	4,5	945	3	0,9	21
13	8,9	6,4	1400	0,14	4,0	940	4	0,5	22
14	9,1	6,6	1600	0,16	3,5	935	3	0,7	23
15	9,3	6,8	1800	0,18	3,0	930	4	0,6	24
16	9,5	7,0	2000	0,20	2,5	925	5	0,3	25
17	9,7	7,2	1800	0,18	2,0	920	5	0,4	24
18	9,9	7,4	1600	0,16	1,5	915	6	0,3	23
19	10,0	7,5	1400	0,14	1,0	910	8	0,2	22
20	9,8	7,3	1200	0,12	2,0	905	12	0,1	21
21	9,6	7,1	1000	0,10	3,0	900	14	0,1	20
22	9,4	6,9	1200	0,12	4,0	895	16	0,1	19
23	9,2	6,7	1400	0,14	5,0	890	18	0,1	18
24	9,0	6,5	1600	0,16	6,0	885	20	0,1	17
25	8,8	6,3	1800	0,18	7,0	880	18	0,1	16
26	8,6	6,1	2000	0,20	8,0	875	16	0,1	15
27	8,4	5,9	1800	0,18	9,0	870	14	0,1	16
28	8,2	5,7	1600	0,16	8,0	865	12	0,1	17
29	8,5	6,0	1400	0,14	7,0	860	10	0,2	18
30	8,7	6,2	1200	0,12	6,0	855	8	0,1	19

Таблица 3.2

Показатели работы скважины на различных режимах

№	P _{с1} , МПа	Q ₁ , т/сут	P _{с2} , МПа	Q ₂ , т/сут	P _{с3} , МПа	Q ₃ , т/сут	P _{с4} , МПа	Q ₄ , т/сут	P _{с5} , МПа	Q ₅ , т/сут
1	7,5	1474	8	1179	8,5	884	9	589	9,5	295
2	7,3	792	7,8	633	8,3	475	8,8	317	9,3	158
3	7,1	467	7,6	373	8,1	280	8,6	187	9,1	93,4
4	6,9	284	7,4	228	7,9	171	8,4	114	8,9	56,9
5	6,7	173	7,2	139	7,7	104	8,2	69,3	8,7	34,7
6	6,5	103	7	82,1	7,5	61,6	8	41	8,5	20,5
7	6,3	57,2	6,8	45,7	7,3	34,3	7,8	22,9	8,3	11,4
8	6,1	28,4	6,6	22,8	7,1	17,1	7,6	11,4	8,1	5,69
9	5,9	11,3	6,4	9,05	6,9	6,79	7,4	4,53	7,9	2,26
10	5,7	2,56	6,2	2,05	6,7	1,54	7,2	1,02	7,7	0,51
11	6,0	56	6,5	44,8	7	33,6	7,5	22,4	8	11,2
12	6,2	83,5	6,7	66,8	7,2	50,1	7,7	33,4	8,2	16,7
13	6,4	111	6,9	88,6	7,4	66,5	7,9	44,3	8,4	22,2
14	6,6	138	7,1	110	7,6	82,7	8,1	55,1	8,6	27,6
15	6,8	164	7,3	132	7,8	98,7	8,3	65,8	8,8	32,9
16	7,0	191	7,5	153	8	114	8,5	76,3	9	38,2
17	7,2	217	7,7	174	8,2	130	8,7	86,8	9,2	43,4
18	7,4	243	7,9	194	8,4	146	8,9	97,1	9,4	48,5
19	7,5	268	8	215	8,5	161	9	107	9,5	53,6
20	7,3	80	7,8	64	8,3	48	8,8	32	9,3	16
21	7,1	619	7,6	495	8,1	371	8,6	248	9,1	124
22	6,9	475	7,4	380	7,9	285	8,4	190	8,9	95
23	6,7	378	7,2	302	7,7	227	8,2	151	8,7	75,5
24	6,5	304	7	243	7,5	183	8	122	8,5	60,9
25	6,3	200	6,8	160	7,3	120	7,8	80	8,3	40
26	6,1	129	6,6	103	7,1	77,4	7,6	51,6	8,1	25,8
27	5,9	79,8	6,4	63,8	6,9	47,9	7,4	31,9	7,9	16
28	5,7	57,4	6,2	45,9	6,7	34,4	7,2	22,9	7,7	11,5
29	6,0	36,2	6,5	29	7	21,7	7,5	14,5	8	7,24
30	6,2	16,8	6,7	13,4	7,2	10,1	7,7	6,72	8,2	3,36

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЛЬНО-СФЕРИЧЕСКОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

4.1 Краткая теория вопроса

Представим установившуюся фильтрацию жидкости к скважине, вскрывшей однородный пласт весьма большой (теоретически бесконечной) толщины, через полусферический забой, радиус которого равен радиусу скважины r_c , пробуренной в однородном по параметрам горизонтальном круговом пласте с внешним радиусом R_k с непроницаемой кровлей пласта, схематически представленного на рис. 4.1.

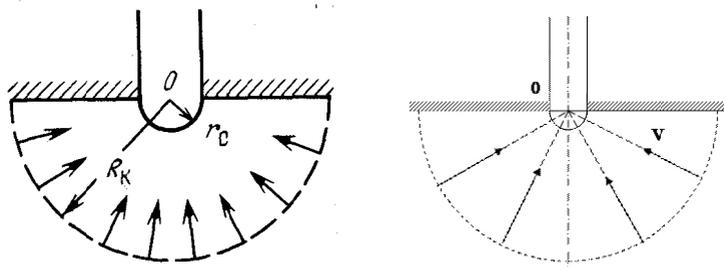


Рис. 4.1. Схема радиально-сферического фильтрационного потока

Характерными особенностями такого потока являются:

– во-первых, частицы жидкости движутся прямолинейно и их траектории радиально сходятся в центре полусферического забоя, в точке O .

– во-вторых, в таком установившемся потоке напор и скорость фильтрации в любой его точке будут функцией только расстояния этой точки от центра забоя скважины, и следовательно поток является одномерным.

Такой установившийся фильтрационный поток называется **радиально-сферическим**.

Уравнение Лапласа для установившейся радиально-сферической фильтрации несжимаемой жидкости в сферических координатах имеет вид:

$$r^2 \frac{d^2 P^*}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dP^*}{dr} = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2 P^*}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{dP^*}{dr} = 0 \quad (4.1)$$

где $P^* = P + \rho \cdot g \cdot z = P^*(r)$ - приведенное давление на расстоянии r от точки O , Па; P - истинное давление в точке пласта, Па; ρ - плотность фильтрующей жидкости, кг/м³; g - ускорение свободного падения, м/с²; z - расстояние от уровня приведения до рассматриваемой точки пласта, м; r - расстояние от точки O скважины до рассматриваемой точки, м.

Если заданы граничные условия, например постоянное приведенное давление P_K на контуре питания радиуса R_K и приведенное давление на забое скважины P_C радиуса r_c , то, интегрируя уравнение (4.1), получают основные формулы, характеризующие установившееся радиально-сферическое движение.

1. Распределение приведенного давления в радиально-сферическом фильтрационном потоке несжимаемой жидкости:

$$P^* = P_K - \frac{P_K - P_C}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K}} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R_K} \right) = P_C + \frac{P_K - P_C}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K}} \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{r} \right) \quad (4.2)$$

где P^* - приведенное давление на расстоянии r от точки O скважины, Па; P_K - приведенное давление на контуре питания, Па; P_C - приведенное давление на забое скважины, Па; r_c - радиус скважины, м; R_K - радиус контура питания, м; r - текущий радиус, м.

Из формулы (4.2) следует, что приведенное давление в любой точке пласта обратно пропорционально координате r этой точки. Значит, зависимость приведенного пластового давления от r гиперболическая. Поверхности равного приведенного давления (равного напора) представляют собой **концентричные полусферы**. Понятно, что в разных точках одной и той же поверхности равного напора истинные давления будут различны. Но, зная высотную отметку точки пласта, плотность пластовой жидкости, распределение приведенных пластовых давлений, легко найти истинное давление в любой точке пласта.

2. Градиент приведенного давления

$$\text{grad } P^* = \frac{dP^*}{dr} = \frac{P_K^* - P_C^*}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K}} \frac{1}{r^2}. \quad (4.3)$$

3. Скорость фильтрации

$$\bar{v} = \frac{k P_K^* - P_C^*}{\mu} \frac{1}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K}} \frac{1}{r^2}. \quad (4.4)$$

Формулы (4.3) и (4.4) свидетельствуют о том, что градиент приведенного давления и скорость фильтрации в любой точке пласта обратно пропорциональны квадрату расстояния этой точки от забоя скважины. Следовательно, если построить для радиально-сферического потока графики зависимости градиента приведенного давления и скорости фильтрации от текущего радиуса r , то крутизна соответствующей кривой у стенки скважины (при малых значениях r) в радиально-сферическом потоке будет еще больше, чем в плоскорадиальном.

4. Дебит (объемный расход) добывающей скважины радиусом r_c

$$Q = \frac{2\pi k P_K^* - P_C^*}{\mu} \frac{1}{\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K}}, \quad (4.5)$$

где Q - дебит скважины, м³/с; k - проницаемость пласта, м²; μ - динамическая вязкость, Па·с.

Как следует из формулы (4.5), зависимость дебита от перепада приведенного давления в радиально-сферическом потоке такая же, как и в плоскорадиальном потоке, следовательно, и форма **индикаторной линии** здесь будет тоже **прямой** (см. рис. 3.2).

5. Закон движения частиц жидкости вдоль их траекторий g :

$$t = \frac{m \cdot \mu \left(\frac{1}{r_c} - \frac{1}{R_K} \right) R_0^3 - r^3}{k \cdot (P_K^* - P_C^*)} = \frac{2\pi \cdot m R_0^3 - r^3}{Q} \frac{1}{3}, \quad (4.6)$$

где R_0 - начальное положение частицы жидкости; r - текущее положение частицы жидкости.

6. Время движения частицы жидкости от контура питания радиуса R_K до центра забоя скважины радиуса r_c :

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{3Q} R_0^3, \quad (4.7)$$

величиной r_c^3 пренебрегаем вследствие её малости.

7. Средневзвешенное по объему порового пространства приведенное пластовое давление:

$$\tilde{P}^* = P_K^* - \frac{P_K^* - P_c^*}{2 \cdot \frac{R_K}{r_c}}. \quad (4.8)$$

4.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование радиально-сферического установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте.

Задачи лабораторной работы:

1) изучение распределения приведенного давления, градиента приведенного давления и скорости фильтрации в залежи круговой формы при установившейся фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси;

2) определение дебита скважины, средневзвешенного по объему порового пространства приведенного пластового давления и времени движения частицы от контура питания до центра забоя скважины радиуса r_c .

4.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 4.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемого фильтрационного потока получить формулы и изобразить графически распределение *приведенного давления, градиента приведенного давления и скорости фильтрации* по пласту в зависимости от текущего радиуса r (в соответствии с формулами (4.2-4.4)). Значения текущего радиуса r выбрать следующие: 10, 25, 50, 75, 100 м и далее через 200 метров.

2. Дебит скважины, средневзвешенное по объему порового пространства приведенное пластовое давление и время движения частицы от контура питания радиуса R_K до центра забоя скважины радиуса r_c необходимо определить по формулам (4.5-4.8). Дебит скважины выразить в $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{сут}$ и $\text{т}/\text{сут}$, а время движения частицы - в секундах и сутках.

3. Провести анализ и оценку полученных результатов, а также сделать необходимые пояснения, комментарии и выводы. В выводах рекомендуется сформулировать основные полученные результаты с акцентом на выполнение задач лабораторной работы.

Перечень вопросов к самоподготовке

1. Дайте характеристику радиально-сферического фильтрационного потока.

2. Напишите дифференциальные уравнения неустановившейся и установившейся радиально-сферической фильтрации жидкости по линейному закону Дарси.

3. Напишите формулы распределения приведенного давления, градиента приведенного давления и скорости фильтрации для радиально-сферического установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости по закону Дарси.

4. Напишите формулу для определения дебита добывающей скважины, вскрывшей в кровле пласт бесконечной толщины. Сравните ее с формулой Дюпюи.

5. Напишите формулу для определения закона движения частиц жидкости вдоль их траекторий.

6. Напишите формулу для определения времени движения частицы жидкости от контура питания радиуса R_K до центра забоя скважины радиуса r_c .

7. Напишите формулу для средневзвешенного по объему порового пространства приведенного пластового давления.

Таблица 4.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	P^*_K МПа	P^*_C МПа	R_K , м	r_c , м	μ , МПа·с	ρ , кг/м ³	k , мкм ²	m , %
1	10,0	7,5	1000	0,10	1,0	1000	1,0	20
2	9,8	7,3	1200	0,12	1,5	995	0,9	19
3	9,6	7,1	1400	0,14	2,0	990	0,8	18
4	9,4	6,9	1600	0,16	2,5	985	0,7	17
5	9,2	6,7	1800	0,18	3,0	980	0,6	16
6	9,0	6,5	2000	0,20	3,5	975	0,5	15
7	8,8	6,3	1800	0,18	4,0	970	0,4	16
8	8,6	6,1	1600	0,16	4,5	965	0,3	17
9	8,4	5,9	1400	0,14	5,0	960	0,2	18
10	8,2	5,7	1200	0,12	5,5	955	0,1	19
11	8,5	6,0	1000	0,10	5,0	950	1,0	20
12	8,7	6,2	1200	0,12	4,5	945	0,9	21
13	8,9	6,4	1400	0,14	4,0	940	0,8	22
14	9,1	6,6	1600	0,16	3,5	935	0,7	23
15	9,3	6,8	1800	0,18	3,0	930	0,6	24
16	9,5	7,0	2000	0,20	2,5	925	0,5	25
17	9,7	7,2	1800	0,18	2,0	920	0,4	24
18	9,9	7,4	1600	0,16	1,5	915	0,3	23
19	10,0	7,5	1400	0,14	1,0	910	0,2	22
20	9,8	7,3	1200	0,12	2,0	905	0,1	21
21	9,6	7,1	1000	0,10	3,0	900	1,0	20
22	9,4	6,9	1200	0,12	4,0	895	0,9	19
23	9,2	6,7	1400	0,14	5,0	890	0,8	18
24	9,0	6,5	1600	0,16	6,0	885	0,7	17
25	8,8	6,3	1800	0,18	7,0	880	0,6	16
26	8,6	6,1	2000	0,20	8,0	875	0,5	15
27	8,4	5,9	1800	0,18	9,0	870	0,4	16
28	8,2	5,7	1600	0,16	8,0	865	0,3	17
29	8,5	6,0	1400	0,14	7,0	860	0,2	18
30	8,7	6,2	1200	0,12	6,0	855	0,1	19

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ПРЯМОЛИНЕЙНОПАРАЛЛЕЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

5.1 Краткая теория вопроса

Реальные продуктивные пласты нефтяных и газовых месторождений имеют неоднородное строение по фильтрационным параметрам пластов, в частности неоднородность по проницаемости. Различают *слоистую неоднородность* (по толщине пласта - сложен пропластками различной проницаемости) и *зональную неоднородность* (по площади, по простиранию пласта, неоднородный пласт с закономерным изменением в каком-либо направлении и др.).

В данной лабораторной работе изучаются особенности фильтрации в слоисто-неоднородном полосообразном пласте, состоящем из двух пропластков с различной проницаемостью (рис 5.1, а) и зонально-неоднородном полосообразном пласте, состоящем из двух зон с различной проницаемостью (рис 5.1, б)

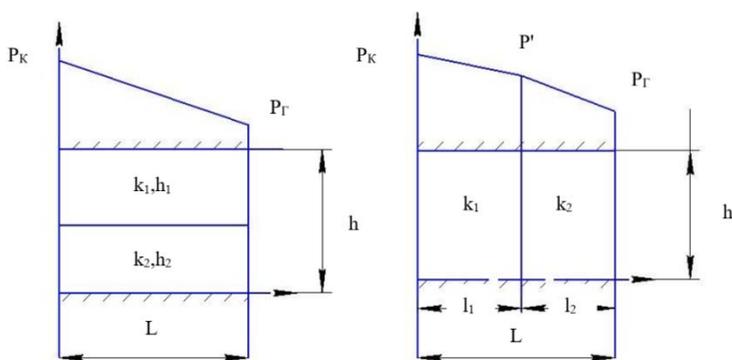


Рис. 5.1. Прямолинейно-параллельный поток в слоисто-неоднородном (а) и зонально-неоднородном (б) пластах

Рассмотрим особенности фильтрации в слоисто- и зонально-неоднородных полосообразных пластах.

1. Случай слоисто-неоднородного пласта

При стационарной одномерной прямолинейно-параллельной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в слоисто-неоднородном пласте, состоящем из 2-х пропластков с различной проницаемостью K_1 и K_2 (рис 5.1, а), распределение давления в каждом из пропластков линейное и определяется выражением:

$$P = P_K - \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} \cdot x, \quad (5.1)$$

где P_K - контурное давление, Па; P_Γ - давление на галерее, Па; L_K - длина пласта, м.

Градиенты давления в каждом пропластке постоянны и равны между собой, поскольку

$$\text{grad } P = -\frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} = \text{const}, \quad (5.2)$$

т.е. $\text{grad } P_1 = \text{grad } P_2$.

Скорости фильтрации по пропласткам:

$$V_1 = -\frac{K_1}{\mu} \text{grad } P_1 = \frac{K_1}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (5.3)$$

$$V_2 = -\frac{K_2}{\mu} \text{grad } P_2 = \frac{K_2}{\mu} \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K}, \quad (5.4)$$

где μ - динамическая вязкость, Па·с.

При равенстве градиентов давления в каждом пропластке из уравнений (5.3) - (5.4) следует справедливость следующего соотношения:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{K_1}{K_2}, \quad (5.5)$$

т.е. для слоисто-неоднородного пласта скорости фильтрации по пропласткам прямо пропорциональны проницаемостям.

Различие скоростей фильтрации V по пропласткам крайне нежелательно. Стремятся к тому, чтобы нефть двигалась в пропла-

стках с одинаковой скоростью. Для этого регулируют продвижение фронта нагнетания воды.

Объемные расходы жидкости по пропласткам Q_1 и Q_2 и общий объемный расход полосообразной залежи Q :

$$\begin{array}{l}
 Q_1 = V_1 \cdot F_1 = \frac{K_1 P_K - P_\Gamma}{\mu L_K} B h_1 \\
 Q_2 = V_2 \cdot F_2 = \frac{K_2 P_K - P_\Gamma}{\mu L_K} B h_2
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 Q = Q_1 + Q_2 = \frac{B(P_K - P_\Gamma)}{\mu L_K} (K_1 h_1 + K_2 h_2)
 \end{array} \right.
 \quad (5.6)$$

где B - ширина полосообразной залежи, м; h_1 и h_2 - толщина первого и второго пропластков, м.

Если выразить Q галереи через K_{CP} , то можно записать

$$Q = \frac{K_{CP}}{\mu} \cdot \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} B (h_1 + h_2) \quad (5.7)$$

Приравнявая (5.6) и (7.7), после преобразований получим

$$K_{CP} \cdot (h_1 + h_2) = K_1 h_1 + K_2 h_2 \quad (5.8)$$

тогда средняя проницаемость полосообразной залежи K_{CP} :

$$K_{CP} = \frac{K_1 h_1 + K_2 h_2}{h_1 + h_2} \quad (5.9)$$

или в общем случае

$$K_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i \square_i}{\sum_{i=1}^n \square_i} \quad (5.10)$$

где n - количество пропластков; h_i - толщина i -го пропластка с проницаемостью K_i .

2. Случай зонально-неоднородного пласта

При стационарной одномерной прямолинейно-параллельной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в зонально-неоднородном пласте, состоящем из 2-х однородных зон с различ-

ной проницаемостью K_1 и K_2 (рис. 5.1, б), распределение давления в каждом из пропластков линейное, но определяется следующими выражениями:

$$P_1(x) = P_K - \frac{P_K - P'}{l_1} \cdot x \quad 0 \leq x \leq l_1 \quad (5.11)$$

$$P_2(x) = P' - \frac{P' - P_\Gamma}{l_2} \cdot x \quad 0 \leq x \leq l_2 \quad (5.12)$$

где P' - давления на границе 1 и 2 зон; l_1 и l_2 - протяженности 1 и 2 зон, м;

Градиенты давления в каждой зоне постоянны, но не равны между собой, поскольку:

$$\text{grad } P_1 = -\frac{P_K - P'}{l_1}, \quad (5.13)$$

$$\text{grad } P_2 = -\frac{P' - P_\Gamma}{l_2}. \quad (5.14)$$

Скорости фильтрации по пропласткам:

$$V_1 = -\frac{K_1}{\mu} \text{grad } P_1 = \frac{K_1}{\mu} \frac{P_K - P'}{l_1}, \quad (5.15)$$

$$V_2 = -\frac{K_2}{\mu} \text{grad } P_2 = \frac{K_2}{\mu} \frac{P' - P_\Gamma}{l_2}, \quad (5.16)$$

Из *уравнения неразрывности фильтрационного потока* следует, что объемные расходы по зонам и по всей полосообразной залежи одинаковы, т.е. $Q = V_1 F_1 = V_2 F_2$. Это означает, что $V_1 = V_2$, т.к. $F_1 = F_2 = Bh$.

При равенстве скоростей фильтрации в каждой зоне полосообразной залежи из уравнений (5.15-5.16) следует справедливость следующего соотношения

$$\frac{\text{grad } P_1}{\text{grad } P_2} = \frac{K_2}{K_1}, \quad (5.17)$$

т.е. градиенты давления обратно пропорциональны коэффициентам проницаемости зон пласта. Из условия неразрывности потока следу-

ет, что объемные расходы жидкости по зонам Q_1 и Q_2 и общий объемный расход полосообразной залежи Q равны:

$$\left. \begin{aligned} Q_1 &= \frac{K_1}{\mu} \cdot \frac{P_K - P'}{l_1} B h \\ Q_2 &= \frac{K_2}{\mu} \cdot \frac{P' - P_\Gamma}{l_2} B h \end{aligned} \right\} Q = Q_1 = Q_2 . \quad (5.18)$$

Из системы уравнений (5.18) можно определить неизвестное давление на границе двух зон P' :

$$P' = \frac{K_1 l_2 P_K + K_2 l_1 P_\Gamma}{K_1 l_2 + K_2 l_1} . \quad (5.19)$$

Подставим полученное выражение для P' в любое уравнение системы (5.18) и выразим объемные расходы Q_1 и Q_2 . Из условия неразрывности потока они равны общему объемному расходу Q , который можно выразить через $K_{\text{ср}}$:

$$Q_1 = \frac{K_{\text{ср}}}{\mu} \cdot \frac{P_K - P_\Gamma}{L} B \cdot h \quad (5.20)$$

Отсюда можно получить выражение для определения $K_{\text{ср}}$:

$$K_{\text{ср}} = \frac{L}{\frac{l_1}{K_1} + \frac{l_2}{K_2}} \quad (5.21)$$

или в общем случае

$$K_{\text{ср}} = \frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{K_i}} \quad (5.21)$$

где n - количество зон; x_i - протяженность i -й зоны с проницаемостью K_i .

5.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование одномерного прямолинейно-параллельного установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в неоднородных пластах.

Задачи лабораторной работы:

1) изучение влияния изменения проницаемости на распределение давления в слоисто- и зонально-неоднородных полосообразных пластах при установившейся фильтрации в них несжимаемой жидкости;

2) изучение характера распределения градиента давления и скорости фильтрации по длине слоисто- и зонально-неоднородных пластов при установившейся фильтрации в них несжимаемой жидкости;

3) определение средней проницаемости слоисто- и зонально-неоднородного пласта.

5.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 5.1. 1.

При изучении характеристик рассматриваемых (слоисто- и зонально-неоднородного) фильтрационных потоков несжимаемой жидкости получить формулы и изобразить графически распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации по длине полосообразной залежи (в соответствии с формулами (5.2-5.4)).

2. Для слоисто-неоднородного пласта убедиться в правильности соотношения (5.5). Для зонально-неоднородного пласта показать справедливость соотношения (5.17).

3. Для слоисто-неоднородного полосообразного пласта определить *объемные расходы по пропласткам* (5.6) и по всему пласту в целом (5.7). Выразить объемные расходы в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$. Определить средний коэффициент проницаемости для слоисто-неоднородного пласта (5.9).

4. Для зонально-неоднородного полосообразного пласта определить давление на границе зон P' (5.19), *объемные расходы по зонам* (5.18) и по всему пласту в целом (5.20). Выразить объемные расходы в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$. Определить средний коэффициент проницаемости для зонально-неоднородного пласта (5.21).

5. Провести анализ и оценку полученных результатов, сделать необходимые пояснения и выводы. В выводах сформулировать полученные результаты с акцентом на выполнение задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте характеристику различных типов неоднородности пластов.
2. Каковы особенности фильтрации жидкости в неоднородных пластах?
3. Напишите основные формулы распределения давления, средней проницаемости и соотношения градиентов давления в зонах для неоднородных по проницаемости пластов.
4. Перечислите основные задачи лабораторной работы.
5. Каково практическое значение изучения фильтрации в неоднородных пластах?

Таблица 5.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	Р _к , МПа	Р _с , МПа	L _к , км	В, м	ц, мПа·с	k ₁ , мкм ²	k ₂ , мкм ²	Слоисто-		Зональ-			
								неоднородный				но-	
								h ₁ , м	h ₂ , м	l ₁ , км	l ₂ , км		
1	10,0	7,5	10,0	100	1,0	1,0	0,5	5	5	5,0	5,0		
2	9,8	7,3	9,5	120	1,5	0,9	0,4	4	5	5,0	4,5		
3	9,6	7,1	9,0	140	2,0	0,8	0,3	5	4	4,5	4,5		
4	9,4	6,9	8,5	160	2,5	0,7	0,2	4	4	4,5	4,0		
5	9,2	6,7	8,0	180	3,0	0,6	0,5	4	3	4,0	4,0		
6	9,0	6,5	7,5	200	3,5	0,5	0,6	3	4	4,0	3,5		
7	8,8	6,3	7,0	180	4,0	0,4	0,7	3	3	3,5	3,5		
8	8,6	6,1	6,5	160	4,5	0,3	0,8	4	3	3,5	3,0		
9	8,4	5,9	6,0	140	5,0	0,2	0,9	3	4	3,0	3		
10	8,2	5,7	5,5	120	5,5	0,1	1,0	4	4	3,0	2,5		
11	8,5	6,0	6,0	100	5,0	0,5	1,0	4	5	3,0	3		
12	8,7	6,2	6,5	150	4,5	0,4	0,9	5	4	3,5	3,0		
13	8,9	6,4	7,0	200	4,0	0,3	0,8	5	5	3,5	3,5		
14	9,1	6,6	7,5	180	3,5	0,2	0,7	4	5	4,0	3,5		
15	9,3	6,8	8,0	160	3,0	0,5	0,6	5	4	4,0	4,0		
16	9,5	7,0	8,5	140	2,5	0,6	0,5	4	4	4,5	4,0		
17	9,7	7,2	9,0	120	2,0	0,7	0,4	4	3	4,5	4,5		
18	9,9	7,4	9,5	100	1,5	0,8	0,3	3	4	5,0	4,5		
19	10,0	7,5	10	120	1,0	0,9	0,2	3	3	5,0	5		
20	9,8	7,3	10	140	2,0	1,0	0,1	4	3	5,0	5,0		
21	9,6	7,1	9,5	160	3,0	1,0	1,5	3	4	4,5	5,0		
22	9,4	6,9	9,0	180	4,0	0,9	1,4	4	4	4,5	4,5		
23	9,2	6,7	8,5	200	5,0	0,8	1,3	4	5	4,0	4,5		
24	9,0	6,5	8,0	150	6,0	0,7	1,2	5	4	4,0	4		
25	8,8	6,3	7,5	100	7,0	0,6	1,1	5	5	3,5	4,0		
26	8,6	6,1	7,0	120	8,0	0,5	1	6	5	3,5	3,5		
27	8,4	5,9	6,5	140	9,0	0,4	0,9	5	6	3,0	3,5		
28	8,2	5,7	6,0	160	8,0	0,3	1,8	6	6	3,0	3,0		
29	8,5	6,0	5,5	180	7,0	0,2	0,7	6	8	2,5	3,0		
30	8,7	6,2	6,0	200	6,0	0,1	0,6	8	6	3,0	3,0		

6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОМЕРНОГО ПЛОСКОРАДИАЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В НЕОДНОРОДНЫХ ПЛАСТАХ

6.1. Краткая теория вопроса

В данной лабораторной работе изучаются особенности фильтрации в слоисто-неоднородном круговом пласте, состоящем из двух пропластков с различной проницаемостью (рис. 6.1, а) и зонально-неоднородном круговом пласте, состоящем из двух зон с различной проницаемостью (рис. 6.1, б).

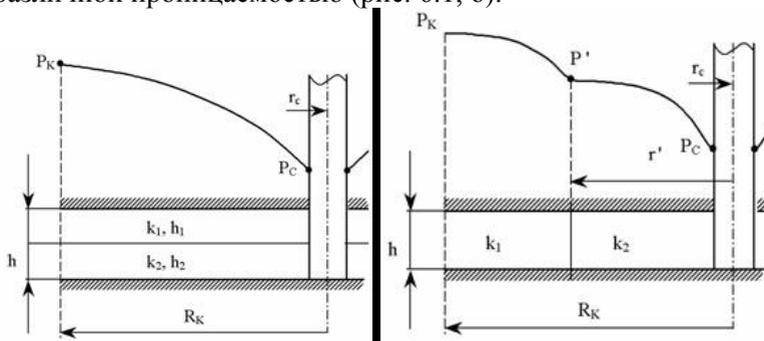


Рис.6.1. Плоскорадиальный поток в слоисто-неоднородном (а) и в зонально-неоднородном (б) пластах

Рассмотрим особенности фильтрации в слоисто- и зонально-неоднородных круговых пластах.

1. Случай слоисто-неоднородного пласта

1. При стационарной одномерной плоскорадиальной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в слоисто-неоднородном пласте, состоящем из 2-х пропластков с различной проницаемостью K_1 и K_2 (рис. 6.1, а), распределение давления в каждом из пропластков носит логарифмический характер и определяется выражением

$$P_{(r)} = P_K - \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{R_K}{r} = P_C + \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{r}{r_C}, \quad (6.1)$$

где $P(r)$ - установившееся давление на расстоянии r от скважины, Па; r - текущий радиус, м; P_K - установившееся пластовое давление на контуре питания R_K , Па; R_K - радиус контура питания пласта, м; P_C - установившееся давление в скважине, Па; r_C - радиус скважины, м.

2. Градиенты давления в каждом пропластке одинаковы и определяются следующим выражением:

$$\text{grad } P = \frac{dP}{dr} = \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \frac{1}{r}, \quad (6.2)$$

3. Скорости фильтрации по пропласткам:

$$V_1 = \frac{k_1}{\mu_1} \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \cdot \frac{1}{r} \quad (6.3)$$

$$V_2 = \frac{k_2}{\mu_2} \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \cdot \frac{1}{r} \quad (6.4)$$

где μ - динамическая вязкость, Па с.

При равенстве градиентов давления в каждом пропластке из уравнений (6.3-6.4) следует справедливость следующего соотношения:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{K_1}{K_2}, \quad (6.5)$$

т. е. для слоисто-неоднородного кругового пласта скорости фильтрации по пропласткам прямо пропорциональны проницаемостям.

Таким образом, жидкость будет двигаться с опережением по более высокопроницаемому пропластку. Необходимо принимать меры по выравниванию фронтов движения жидкостей в пропластках с различной проницаемостью.

4. Выразим дебит скважины Q для случая слоисто-неоднородного пласта через K_{CP} :

$$Q = \frac{2\pi k_{cp}(\square_1 + \square_2)}{\mu} \cdot \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (6.6)$$

но можно выразить и через сумму:

$$Q = Q_1 + Q_2 = \frac{2\pi(k_1 h_1 + k_2 h_2) \cdot (P_K - P_C)}{\mu \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (6.7)$$

Приравнивая правые части уравнений, получим

$$K_{CP} = \frac{k_1 \square_1 + k_2 \square_2}{\square_1 + \square_2} \quad (6.8)$$

или в общем виде

$$K_{CP} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i \square_i}{\sum_{i=1}^n \square_i} \quad (6.9)$$

где n - количество пропластков; h_i - толщина i -го пропластка с проницаемостью k_i ;

2. Случай зонально-неоднородного пласта

В практике разработки нефтяных и газовых месторождений значительный интерес представляет задача о притоке жидкости к скважине при наличии вокруг забоя скважины кольцевой зоны с проницаемостью, отличной от проницаемости остальной части пласта, т. е. пласт состоит из двух зон различной проницаемости. Такая задача возникает в следующих случаях: при торпедировании или кислотной обработке призабойной зоны, установке гравийного фильтра, глинизации или парафинизации призабойной зоны, выносе мелких фракций породы из этой зоны и т.д.

Очень важной при этом бывает необходимость установления влияния различия проницаемостей кольцевой призабойной зоны и остальной части пласта на продуктивность скважины.

1. При стационарной одномерной плоскорадиальной фильтрации несжимаемой жидкости по закону Дарси в зональнонеоднородном пласте, состоящем из 2-х зон с различной проницаемостью k_1 и k_2 (рис. 6.1, б), распределение давления в каждой зоне подчи-

няется логарифмическому закону, но характер распространения пьезометрической линии зависит от давления P' на границе этих зон:

$$P_{(r)_1} = P_K - \frac{P_K - P'}{\ln \frac{R_K}{r}} \ln \frac{R_K}{r}, \quad \text{где } r' \leq r \leq R_K \quad (6.10)$$

$$P_{(r)_2} = P' - \frac{P' - P_C}{\ln \frac{r'}{r_C}} \ln \frac{r'}{r}, \quad \text{где } r_C \leq r \leq r' \quad (6.11)$$

где $P_{(r)_1}$ и $P_{(r)_2}$ - установившееся давление на расстоянии r от скважины в первой и второй зонах соответственно, Па; r - текущий радиус, м; r' - радиус границы между первой и второй зоной, м; P' - давление на границе этих зон, Па; R_K - радиус контура питания пласта, м; P_K - установившееся пластовое давление на контуре питания R_K , Па; r_C - радиус скважины, м; P_C - установившееся давление в скважине, Па.

2. Распределение градиентов давления в каждой зоне подчиняется гиперболическому закону, но характер их распространения также зависит от давления P' на границе этих зон;

$$\text{grad } P = \frac{P_K - P'}{\ln \frac{R_K}{r}} \frac{1}{r}, \quad \text{где } r' \leq r \leq R_K \quad (6.12)$$

$$\text{grad } P = \frac{P' - P_C}{\ln \frac{r'}{r_C}} \frac{1}{r}, \quad \text{где } r_C \leq r \leq r' \quad (6.13)$$

где $\text{grad } P_{(r)_1}$ и $\text{grad } P_{(r)_2}$ - градиенты давления в первой и второй зоне соответственно, Па/м.

3. Скорости фильтрации по зонам прямо пропорциональны градиентам давления в зонах:

$$v_1 = \frac{k_1}{\mu} \frac{P_K - P'}{\ln \frac{R_K}{r}} \cdot \frac{1}{r}, \quad \text{где } r' \leq r \leq R_K \quad (6.14)$$

$$v_2 = \frac{k_2}{\mu} \frac{P' - P_C}{\ln \frac{r'}{r_C}} \cdot \frac{1}{r}, \quad \text{где } r_C \leq r \leq r' \quad (6.15)$$

4. Дебит потока в силу установившегося движения несжимаемой жидкости будет постоянен через любую цилиндрическую поверхность, соосную скважине:

$$Q_1 = \frac{2\pi k_1 h}{\mu} \cdot \frac{P_K - P'}{\ln \frac{R_K}{r'}} \quad (6.16)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi k_2 h}{\mu} \cdot \frac{P' - P_C}{\ln \frac{r'}{r_C}} \quad (6.17)$$

При наличии в пласте двух кольцевых зон ($n=2$) с различной проницаемостью давление P' на границе этих зон можно найти из равенства скоростей фильтрации на этой границе:

$$v_1 = v_2, \quad \text{или} \quad \frac{k_1}{\mu} \frac{P_K - P'}{\ln \frac{R_K}{r'}} \cdot \frac{1}{r'} = \frac{k_2}{\mu} \frac{P' - P_C}{\ln \frac{r'}{r_C}} \cdot \frac{1}{r'}, \quad (6.18)$$

откуда

$$P' = \frac{P_K k_1 \ln \frac{r'}{r_C} + P_C k_2 \ln \frac{R_K}{r'}}{k_1 \ln \frac{r'}{r_C} + k_2 \ln \frac{R_K}{r'}}. \quad (6.19)$$

Подставив найденное значение давления P' на границе зон в уравнения (6.10-6.11), находим

$$P_{(r)_1} = P_K - \frac{P_K - P_C}{k_2 \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r'}{r_C} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R_K}{r'} \right)} \ln \frac{R_K}{r'}, \quad \text{где} \quad r' \leq r \leq R_K \quad (6.20)$$

$$P_{(r)_2} = P_C + \frac{P_K - P_C}{k_1 \left(\frac{1}{k_1} \ln \frac{r'}{r_C} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R_K}{r'} \right)} \ln \frac{r}{r_C}, \quad \text{где} \quad r_C \leq r \leq r' \quad (6.21)$$

Аналогичным образом могут быть определены остальные характеристики рассматриваемого фильтрационного потока (градиенты давления, скорости фильтрации, объемные расходы жидкости по зонам).

Дебит скважины в таком двухзональном пласте определится

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{P_K - P_C}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{r'}{r_C} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{R_K}{r}} = \frac{2\pi k_2 h}{\mu} \frac{P_K - P_C}{k_2 \ln \frac{r'}{r_C} + \ln \frac{R_K}{r}} \quad (6.22)$$

Среднее значение проницаемости зонально-неоднородного пласта можно определить из равенства дебитов аналогичных потоков в неоднородном и однородном пластах:

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{P_K - P_C}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \ln \frac{r_i}{r_{i-1}}} = \frac{2\pi k_{cp} h}{\mu} \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (6.23)$$

откуда

$$k_{cp} = \frac{\ln \frac{R_K}{r_C}}{\frac{1}{k_1} \ln \frac{R_K}{r'} + \frac{1}{k_2} \ln \frac{r'}{r_C}} \quad (6.24)$$

6.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование плоско-радиального установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в неоднородных пластах.

Задачи лабораторной работы:

- 1) изучение влияния изменения проницаемости на распределение давления в слоисто- и зонально-неоднородных круговых пластах при установившейся фильтрации в них несжимаемой жидкости;
- 2) изучение характера изменения градиента давления и скорости фильтрации по радиусу слоисто- и зонально-неоднородных круговых пластов при установившейся фильтрации в них несжимаемой жидкости;
- 3) определение средней проницаемости слоисто- и зонально-неоднородных круговых пластов.

6.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 6.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемых (слоисто- и зонально-неоднородного) фильтрационных потоков несжимаемой жидкости получить формулы и изобразить графически распределе-

ния давления, градиента давления и скорости фильтрации в зависимости от текущего радиуса r (в соответствии с формулами (6.1-6.4)) и (6.10-6.15)). Значения текущего радиуса r выбрать следующие: 10, 25, 50, 75, 100 м и далее через 200 метров.

2. Для слоисто-неоднородного кругового пласта убедиться в правильности соотношения (6.5). Определить объемные расходы по пропласткам и по всему пласту в целом (6.7). Выразить объемные расходы в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$. Определить средний коэффициент проницаемости для слоисто-неоднородного пласта (6.8).

3. Для зонально-неоднородного кругового пласта определить давление на границе зон P' (6.19), объемные расходы по зонам (6.16-6.17) и по всему пласту в целом (6.23). Выразить объемные расходы в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$. Определить средний коэффициент проницаемости для зонально-неоднородного пласта (6.24).

4. Провести анализ и оценку полученных результатов, сделать необходимые пояснения и выводы. В выводах сформулировать полученные результаты с акцентом на выполнение задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте характеристику различных типов неоднородности пластов.

2. Каковы особенности фильтрации жидкости в неоднородных пластах?

3. Напишите основные формулы распределения давления, градиента давления, скорости фильтрации, средней проницаемости для слоисто-неоднородных по проницаемости пластов.

4. Напишите основные формулы распределения давления, градиента давления, скорости фильтрации, средней проницаемости для зонально-неоднородных по проницаемости пластов.

5. Перечислите основные задачи лабораторной работы.

6. Каково практическое значение изучения фильтрации в неоднородных пластах?

Таблица 6.1

Исходные данные для расчетов

Номер вари- анта	P _к , МПа	P _с , МПа	R _к , М	r _с , М	μ, МПа·с	K ₁ , МКМ ²	K ₂ , МКМ ²	Слои- сто -		Зо- наль но-
								неоднородный		
								h ₁ , М	h ₂ , М	г' М
1	10,0	7,5	1000	0,10	1,0	1,0	0,5	5	5	500
2	9,8	7,3	1200	0,12	1,5	0,9	0,4	4	5	600
3	9,6	7,1	1400	0,14	2,0	0,8	0,3	5	4	700
4	9,4	6,9	1600	0,16	2,5	0,7	0,2	4	4	800
5	9,2	6,7	1800	0,18	3,0	0,6	0,5	4	3	900
6	9,0	6,5	2000	0,20	3,5	0,5	0,6	3	4	1000
7	8,8	6,3	1800	0,18	4,0	0,4	0,7	3	3	900
8	8,6	6,1	1600	0,16	4,5	0,3	0,8	4	3	800
9	8,4	5,9	1400	0,14	5,0	0,2	0,9	3	4	700
10	8,2	5,7	1200	0,12	5,5	0,1	1,0	4	4	600
11	8,5	6,0	1000	0,10	5,0	0,5	1,0	4	5	500
12	8,7	6,2	1200	0,12	4,5	0,4	0,9	5	4	600
13	8,9	6,4	1400	0,14	4,0	0,3	0,8	5	5	700
14	9,1	6,6	1600	0,16	3,5	0,2	0,7	4	5	800
15	9,3	6,8	1800	0,18	3,0	0,5	0,6	5	4	900
16	9,5	7,0	2000	0,20	2,5	0,6	0,5	4	4	1000
17	9,7	7,2	1800	0,18	2,0	0,7	0,4	4	3	900
18	9,9	7,4	1600	0,16	1,5	0,8	0,3	3	4	800
19	10,0	7,5	1400	0,14	1,0	0,9	0,2	3	3	700
20	9,8	7,3	1200	0,12	2,0	1,0	0,1	4	3	600
21	9,6	7,1	1000	0,10	3,0	1,0	1,5	3	4	500
22	9,4	6,9	1200	0,12	4,0	0,9	1,4	4	4	700
23	9,2	6,7	1400	0,14	5,0	0,8	1,3	4	5	800
24	9,0	6,5	1600	0,16	6,0	0,7	1,2	5	4	900
25	8,8	6,3	1800	0,18	7,0	0,6	1,1	5	5	1000
26	8,6	6,1	2000	0,20	8,0	0,5	1	6	5	1100
27	8,4	5,9	1800	0,18	9,0	0,4	0,9	5	6	800
28	8,2	5,7	1600	0,16	8,0	0,3	1,8	6	6	600
29	8,5	6,0	1400	0,14	7,0	0,2	0,7	6	8	400
30	8,7	6,2	1200	0,12	6,0	0,1	0,6	8	6	600

7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

7.1. Краткая теория вопроса

Исследуем установившийся прямолинейно-параллельный фильтрационный поток идеального газа. Природные газы можно считать идеальными (совершенными), если пластовые давления газовых месторождений невелики (6-9 МПа) и газ отбирается при депрессии до 1 МПа.

Как было отмечено ранее, в лабораторных условиях прямолинейно-параллельный одномерный поток имеет место при движении жидкости или газа через цилиндрический керн или через трубку постоянного диаметра, заполненную пористой средой.

Газовый пласт, в котором имеет место прямолинейно-параллельный поток, можно схематизировать в виде прямоугольного параллелепипеда длиной L_k , шириной B и высотой h (толщина пласта), рис. 7.1.

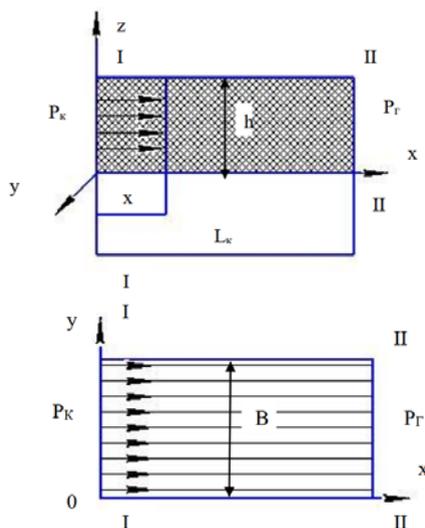


Рис.7.1 Вертикальное и горизонтальное сечение прямолинейно-параллельного фильтрационного потока идеального газа

Левая грань является контуром питания - здесь давление постоянное и равно P_K , правая грань является поверхностью стока (галерея) с давлением P_Γ . Все остальные грани непроницаемы.

Основные характеристик фильтрационного потока газа можно получить, используя *аналогию* между течением несжимаемой жидкости и течением газа. Для этого вводится *функция Лейбензона для идеального газа*:

$$J = \int \rho dP + C = \int \frac{\rho_{ат}}{P_{ат}} P dP + C = \frac{\rho_{ат}}{2P_{ат}} P^2 + C \quad (7.1)$$

1. Распределение давления в прямолинейном фильтрационном потоке несжимаемой жидкости и идеального газа имеет вид:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$P = P_K - \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} x \quad (7.2)$	$P = \sqrt{P_K^2 - \frac{P_K^2 - P_\Gamma^2}{L_K} x} \quad (7.3)$

где $P(x)$ - давление в произвольной точке x пласта, Па; P_K и P_Γ - заданное давление на контуре питания и галереи соответственно, Па; L_K - длина пласта, м; x - переменная координата точки пласта, отсчитываемая от контура питания, м.

Следовательно, давление по длине пласта при фильтрации несжимаемой жидкости изменяется по линейному закону, а при фильтрации идеального газа - изменяется по параболическому закону (рис. 7.2, кривая 1). Зависимость $P^2 = f(x)$ - прямолинейная.

2. Градиент давления в потоке несжимаемой жидкости и идеального газа имеет вид:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$\frac{dP}{dx} = - \frac{P_K - P_\Gamma}{L_K} \frac{1}{r} \quad (7.4)$	$\frac{dP}{dx} = - \frac{P_K^2 - P_\Gamma^2}{2L_K} \frac{1}{P} \quad (7.5)$

График распределения градиента давления в фильтрационном потоке изображен на рис. 7.2, кривая 2. Градиент давления не остается постоянным, как в случае несжимаемой жидкости, а возрастает при приближении к галерее.

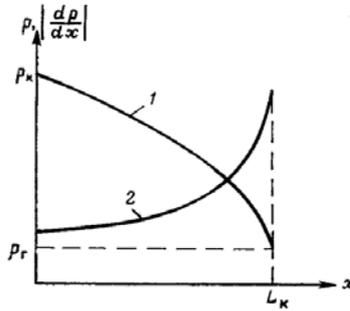


Рис. 7.2. Кривые распределения давления (1) и градиента давления (2) в прямолинейно-параллельном потоке газа

3. Скорости фильтрации при установившемся движении несжимаемой жидкости и идеального газа выражаются зависимостями следующего вида:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$v = \frac{k}{\mu_{\text{ж}}} \frac{P_{\text{К}} - P_{\Gamma}}{L_{\text{К}}} \quad (7.6)$	$v = \frac{k}{2\mu_{\Gamma}} \frac{P_{\text{К}}^2 - P_{\Gamma}^2}{L_{\text{К}}} \frac{1}{P} \quad (7.7)$

где k - коэффициент проницаемости пласта, м^2 ; $\mu_{\text{ж}}$ и μ_{Γ} - коэффициенты динамической вязкости жидкости и газа соответственно, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Так как скорость фильтрации пропорциональна градиенту давления (7.5), то ее график аналогичен графику градиента давления (см. рис. 7.2, кривая 2). Физически возрастание скорости фильтрации вдоль газового пласта происходит за счет расширения газа при снижении давления. 4. Объемный расход несжимаемой жидкости и расход идеального газа, приведенный к атмосферному давлению в рассматриваемом одномерном потоке имеют вид:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$Q = \frac{k}{\mu} \frac{P_{\text{К}} - P_{\Gamma}}{L_{\text{К}}} B h \quad (7.8)$	$Q_{\text{ат}} = \frac{Q_{\Gamma}}{\rho_{\text{ат}}} = \frac{k}{\mu \rho_{\text{ат}}} \frac{\rho_{\text{ат}} (P_{\text{К}}^2 - P_{\Gamma}^2)}{2 P_{\text{ат}} L_{\text{К}}} B h \quad (7.9)$

где B - ширина потока, м ; h - толщина пласта, м ; $\rho_{\text{ат}}$ - плотность газа при атмосферном давлении, $\text{кг}/\text{м}^3$, ($\rho_{\text{ат}}=0,650 \text{ кг}/\text{м}^3$); $P_{\text{ат}}$ - атмосферное давление, Па ($P_{\text{ат}}=0,98 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

5. Средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление для нефтяного и газового пласта: Несжимаемая жидкость Идеальный газ

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$\bar{P} = \frac{P_K + P_\Gamma}{2}, \quad (7.10)$	$\bar{P} = \frac{2 P_K^3 - P_\Gamma^3}{3 P_K^2 - P_\Gamma^2}, \quad (7.11)$

7.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование прямолинейно-параллельного установившегося фильтрационного потока идеального газа в однородном пласте.

Задачи лабораторной работы:

- 1) изучение распределения давления по длине полоскообразного пласта при фильтрации идеального газа;
- 2) изучение распределения градиента давления и скорости фильтрации по длине полоскообразного пласта при фильтрации идеального газа;
- 3) определение объемного расхода идеального газа в потоке.

7.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 7.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемого фильтрационного потока получить формулы и изобразить графически распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации по длине линейного пласта при фильтрации жидкости и идеального газа (в соответствии с формулами (7.2-7.7)).

2. Объемные расходы жидкости и газа и средневзвешенные по объему порового пространства пластовые давления определить по формулам (7.8)-(7.11). Объемные расходы выразить в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$.

3. Провести анализ и оценку полученных результатов и сделать выводы. В выводах следует отразить полученные результаты с точки зрения выполнения поставленных задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте понятие идеального газа.
2. Обоснуйте необходимость введения функции Лейбензона при изучении фильтрации сжимаемых флюидов.
3. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при изучении фильтрации сжимаемых флюидов.
4. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при установившейся фильтрации упругой жидкости.
5. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при установившейся фильтрации идеального газа.
6. Напишите формулы закономерностей распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации для прямолинейно-параллельного потока несжимаемой жидкости.
7. Напишите формулы закономерностей распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации для прямолинейно-параллельного потока идеального газа.
8. Напишите формулы для определения дебита галереи и средневзвешенного по объему порового пространства, занятого газом, пластового давления.

Таблица 7.1

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	P_k , МПа	P_r , МПа	L_k , км	k , мкм ²	$\mu_{жк}$, МПа·с	B , м	h , м	$\rho_{жк}$, кг/м ³	μ_r , МПа·с
1	10,0	7,5	10,0	1,0	1,0	100	10	1000	0,019
2	9,8	7,3	9,5	0,9	1,5	120	9	995	0,018
3	9,6	7,1	9,0	0,8	2,0	140	8	990	0,017
4	9,4	6,9	8,5	0,7	2,5	160	7	985	0,016
5	9,2	6,7	8,0	0,6	3,0	180	6	980	0,015
6	9,0	6,5	7,5	0,5	3,5	200	5	975	0,014
7	8,8	6,3	7,0	0,4	4,0	180	4	970	0,013
8	8,6	6,1	6,5	0,3	4,5	160	3	965	0,012
9	8,4	5,9	6,0	0,2	5,0	140	2	960	0,011
10	8,2	5,7	5,5	0,1	5,5	120	1	955	0,010
11	8,5	6,0	6,0	1,0	5,0	100	2	950	0,019
12	8,7	6,2	6,5	0,9	4,5	150	3	945	0,018
13	8,9	6,4	7,0	0,8	4,0	200	4	940	0,017
14	9,1	6,6	7,5	0,7	3,5	180	5	935	0,016
15	9,3	6,8	8,0	0,6	3,0	160	6	930	0,015
16	9,5	7,0	8,5	0,5	2,5	140	7	925	0,014
17	9,7	7,2	9,0	0,4	2,0	120	8	920	0,013
18	9,9	7,4	9,5	0,3	1,5	100	9	915	0,012
19	10,0	7,5	10,0	0,2	1,0	120	10	910	0,011
20	9,8	7,3	10,0	0,1	2,0	140	12	905	0,010
21	9,6	7,1	9,5	1,0	3,0	160	14	900	0,019
22	9,4	6,9	9,0	0,9	4,0	180	16	895	0,018
23	9,2	6,7	8,5	0,8	5,0	200	18	890	0,017
24	9,0	6,5	8,0	0,7	6,0	150	20	885	0,016
25	8,8	6,3	7,5	0,6	7,0	100	18	880	0,015
26	8,6	6,1	7,0	0,5	8,0	120	16	875	0,014
27	8,4	5,9	6,5	0,4	9,0	140	14	870	0,013
28	8,2	5,7	6,0	0,3	8,0	160	12	865	0,012
29	8,5	6,0	5,5	0,2	7,0	180	10	860	0,011
30	8,7	6,2	6,0	0,1	6,0	200	8	855	0,010

8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

8.1. Краткая теория вопроса

Плоскорadiaльный фильтрационный поток идеального газа имеет место в круговом пласте постоянной толщиной h с непроницаемой кровлей и подошвой пласта, радиусом R_K , в центре которого имеется гидродинамически совершенная скважина радиусом r_c (рис. 8.1).

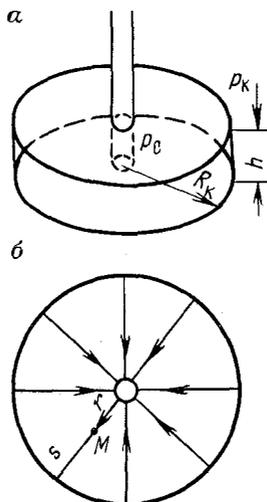


Рис. 8.1. Схема плоскорadiaльного потока

Характерными особенностями такого потока являются:

- частицы газа движутся параллельно в одной и той же плоскости, проходящей через ось скважины;
- прямолинейные траектории движения частиц газа в любой плоскости, перпендикулярной оси скважины, радиально сходятся в одной точке на оси скважины;
- картины движения вдоль всех и любой траектории движения одинаковы, а следовательно, для изучения такого потока достаточно изучить движение вдоль одной любой траектории, т.е. поток является одномерным по радиусу.

Основные характеристики такого фильтрационного потока газа можно получить, используя **аналогию** между течением несжимаемой жидкости и течением газа. Для этого аналогично с лабораторной работой №6 вводится **функция Лейбнсона для идеального газа**:

$$J = \int \rho dP + C = \int \frac{\rho_{\text{ат}}}{P_{\text{ат}}} P dP + C = \frac{\rho_{\text{ат}}}{2P_{\text{ат}}} P^2 + C \quad (8.1)$$

1. Распределение давления в плоскорадиальном фильтрационном потоке несжимаемой жидкости и идеального газа:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$P = P_K - \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \ln \frac{R_K}{r}$	$P = \sqrt{P_K^2 - \frac{P_K^2 - P_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \ln \frac{R_K}{r}}$
(8.2)	(8.3)

где P - установившееся давление на расстоянии r от скважины, Па; P_K - установившееся пластовое давление на контуре питания R_K , Па; P_C - установившееся давление в скважине, Па; r_c - радиус скважины, м; R_K - радиус контура питания пласта, м; r - текущий радиус, м.

Из формулы (8.3) для идеального газа видно, что распределение давления представляет собой квадратную логарифмическую зависимость давления от радиуса и графически представляется **квадратно-логарифмической кривой**.

Сравнение кривых распределения давления в пласте в случаях установившейся плоскорадиальной фильтрации газа и несжимаемой жидкости при одинаковых граничных условиях показывает, что в газовом потоке имеет место резкое падение давления вблизи скважины и весьма малое вдали от нее (рис.8.2).

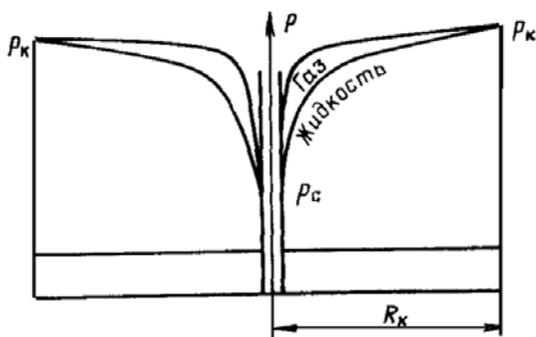


Рис.8.2. Распределение давления в плоскорадиальном потоке несжимаемой жидкости и газа

2. Изменения градиента давления в зависимости от координаты r при плоскорадиальной фильтрации несжимаемой жидкости и идеального газа имеют вид:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$\text{grad } P = \frac{dP}{dr} = \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \frac{1}{r} \quad (8.4)$	$\frac{dP}{dr} = \frac{P_K^2 - P_C^2}{2 \ln \frac{R_K}{r_c}} \frac{1}{r P} \quad (8.5)$

Из формулы (8.5) следует, что градиент давления вблизи забоя резко возрастает как за счет уменьшения r , так и за счет падения давления P .

3. Скорости фильтрации при установившемся плоскорадиальном движении несжимаемой жидкости и идеального газа выражаются зависимостями следующего вида:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$v = \frac{k}{\mu_{\text{ж}}} \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_c}} \cdot \frac{1}{r} \quad (8.6)$	$v = \frac{k}{\mu_{\text{г}}} \frac{P_K^2 - P_C^2}{2 \ln \frac{R_K}{r_c}} \frac{1}{r P} \quad (8.7)$

где k - коэффициент проницаемости пласта, м^2 ; $\mu_{\text{ж}}$ и $\mu_{\text{г}}$ - коэффициенты динамической вязкости жидкости и газа соответственно, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Так как скорость фильтрации пропорциональна градиенту давления (8.5), то ее график аналогичен графику градиента давления. Физически возрастание скорости фильтрации при приближении

к забою скважины происходит за счет расширения газа при снижении давления. При больших депрессиях на пласт большие скорости движения газа могут привести к разрушению пород призабойной зоны пласта. Это является причиной ограничений отборов из газовых скважин.

4. Объемный расход несжимаемой жидкости и расход идеального газа, приведенный к атмосферному давлению в рассматриваемом одномерном потоке, имеют вид:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{P_K - P_C}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (8.8)$	$Q_{ат} = \frac{\pi kh}{\mu_{г} P_{ат}} \frac{P_K^2 - P_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (8.9)$

где $Q_{ат}$ - дебит скважины, м³/с; Q_m - массовый расход газа; $\rho_{ат}$ - плотность газа при атмосферном давлении, кг/м³ ($\rho_{ат}=0,650$ кг/м³); $P_{ат}$ - атмосферное давление, Па ($P_{ат}=0,98-105$ Па); k - проницаемость пласта, м²; h - толщина пласта, м; $\mu_{ж}$ и $\mu_{г}$ - динамическая вязкость жидкости и газа соответственно, Па·с.

Индикаторная линия при фильтрации газа строится в координатах $Q_{ат} - (P_K^2 - P_C^2)$ и, очевидно, в установившемся плоскорадиальном потоке имеет прямолинейный характер (рис. 8.3).

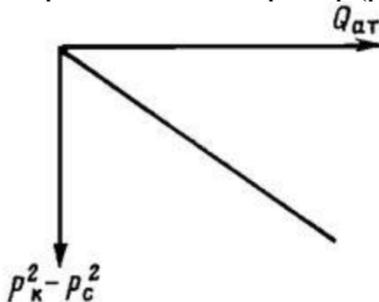


Рис. 8.3. Индикаторная линия при фильтрации газа по закону Дарси

5. Средневзвешенное по объему порового пространства пластовое давление для нефтяного и газового пласта:

Несжимаемая жидкость	Идеальный газ
$\tilde{P} = P_K - \frac{P_K - P_C}{2 \ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (8.10)$	$\tilde{P} = P_K \left[1 - \frac{1 - \left(\frac{P_C}{P_K}\right)^2}{4 \ln \frac{R_K}{r_C}} \right] \quad (8.11)$

Если по формуле (8.11) провести расчеты для различных значений P_K, P_C, R_K, R_C , то можно убедиться средневзвешенное пластовое давление газа в круговом пласте близко к контурному, т.е. $\tilde{P} \approx P_K$. Физически это объясняется значительной крутизной воронки депрессии при притоке газа к скважине. Средневзвешенное давление используется при определении запасов газа в пласте, а также для приближенного расчета гидродинамических характеристик; замена его контурным давлением значительно упрощает расчеты.

8.2 Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование плоско-радиального установившегося фильтрационного потока идеального газа в однородном круговом пласте.

Задачи лабораторной работы:

- 1) изучение распределения давления в залежи круговой формы пласта при фильтрации идеального газа;
- 2) изучение распределения градиента давления и скорости фильтрации по радиусу кругового пласта при плоскорадиальной фильтрации идеального газа;
- 3) определение дебита газовой скважины при плоскорадиальном притоке идеального газа.

8.3. Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы осуществляется в соответствии с индивидуальным вариантом задания, устанавливаемым преподавателем. Варианты заданий приведены в табл. 8.1.

1. При изучении характеристик рассматриваемого фильтрационного потока получить формулы и изобразить графически распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации по пласту в зависимости от текущего радиуса r (в соответствии с формулами (8.2-8.7)). Значения текущего радиуса r выбрать следующие: 10, 25, 50, 75, 100 м и далее через 200 метров.

2. Дебиты скважин по жидкости и по газу и средневзвешенные по объему порового пространства пластовые давления определить по формулам (8.8-8.11). Дебиты выразить в $\text{м}^3/\text{с}$ и $\text{м}^3/\text{сут}$.

3. Провести анализ и оценку полученных результатов и сделать выводы. В выводах следует отразить полученные результаты с точки зрения выполнения поставленных задач лабораторной работы.

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Дайте понятие идеального газа.

2. Обоснуйте необходимость введения функции Лейбензона при изучении фильтрации сжимаемых флюидов.

3. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при изучении фильтрации сжимаемых флюидов.

4. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при установившейся фильтрации упругой жидкости.

5. Напишите формулу для определения функции Лейбензона при установившейся фильтрации идеального газа.

6. Напишите формулы закономерностей распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации несжимаемой жидкости для плоскорадиального потока.

7. Напишите формулы закономерностей распределения давления, градиента давления и скорости фильтрации идеального газа для плоскорадиального потока.

8. Напишите формулы для определения дебита скважины и средневзвешенного по объему порового пространства, занятого газом, пластового давления.

Таблица 8.1

Исходные данные для расчетов

Номер вариан- та	$P_{к}$, МПа	$P_{с}$, МПа	$R_{к}$, М	$r_{с}$, М	h , М	$P_{кк}$, МПа·с	$P_{кк3}$, кг/м ³	$H_{г}$, МПа·с	k , мкм ²
1	10,0	7,5	1000	0,10	10	1,0	1000	0,019	0,2
2	9,8	7,3	1200	0,12	3	1,5	995	0,018	0,9
3	9,6	7,1	1400	0,14	4	2,0	990	0,017	0,6
4	9,4	6,9	1600	0,16	7	2,5	985	0,016	0,3
5	9,2	6,7	1800	0,18	5	3,0	980	0,015	0,5
6	9,0	6,5	2000	0,20	4	3,5	975	0,014	0,5
7	8,8	6,3	1800	0,18	4	4,0	970	0,013	0,4
8	8,6	6,1	1600	0,16	3	4,5	965	0,012	0,3
9	8,4	5,9	1400	0,14	2	5,0	960	0,011	0,2
10	8,2	5,7	1200	0,12	1	5,5	955	0,010	1,0
11	8,5	6,0	1000	0,10	2	5,0	950	0,019	1,0
12	8,7	6,2	1200	0,12	3	4,5	945	0,018	0,9
13	8,9	6,4	1400	0,14	4	4,0	940	0,017	0,5
14	9,1	6,6	1600	0,16	3	3,5	935	0,016	0,7
15	9,3	6,8	1800	0,18	4	3,0	930	0,015	0,6
16	9,5	7,0	2000	0,20	5	2,5	925	0,014	0,3
17	9,7	7,2	1800	0,18	5	2,0	920	0,013	0,4
18	9,9	7,4	1600	0,16	6	1,5	915	0,012	0,3
19	10,0	7,5	1400	0,14	8	1,0	910	0,011	0,2
20	9,8	7,3	1200	0,12	12	2,0	905	0,010	0,1
21	9,6	7,1	1000	0,10	14	3,0	900	0,019	0,1
22	9,4	6,9	1200	0,12	16	4,0	895	0,018	0,1
23	9,2	6,7	1400	0,14	18	5,0	890	0,017	0,1
24	9,0	6,5	1600	0,16	20	6,0	885	0,016	0,1
25	8,8	6,3	1800	0,18	18	7,0	880	0,015	0,1
26	8,6	6,1	2000	0,20	16	8,0	875	0,014	0,1
27	8,4	5,9	1800	0,18	14	9,0	870	0,013	0,1
28	8,2	5,7	1600	0,16	12	8,0	865	0,012	0,1
29	8,5	6,0	1400	0,14	10	7,0	860	0,011	0,2
30	8,7	6,2	1200	0,12	8	6,0	855	0,010	0,1

9. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТА- НОВИВШЕЙСЯ ПЛОСКОРАДИАЛЬНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА НА ПАРАБОЛИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЛАСТА

9.1 Краткая теория вопроса

Фильтрация жидкости и газа в однородном круговом пласте к скважине (плоскорадиальная фильтрация) может изучаться и на элементе этого пласта, имеющего форму сектора. Однако и круговая и секториальная модели пластов при физическом моделировании процессов фильтрации используются редко, т.к. даже при небольших давлениях в таких моделях нагрузки на плоские поверхности модели оказываются настолько большими, что приводят к значительной их деформации даже в случае использования толстостенных металлических моделей.

Поэтому для исследования плоскорадиальной фильтрации жидкостей и газов применяют модели пласта в форме параболоида вращения (см. рис. 9.1). Возможность использования такой модели впервые обоснована Л.С. Юреном.

Рассмотрим фильтрацию жидкости или газа в параболическом пласте, заполненном песком, с радиусом контура питания R_K и скважине радиусом r_c . Уравнение параболы запишем в виде:

$$y = \sqrt{\alpha r} \quad (9.1)$$

где r - расстояние по оси вращения, м; $r_c \leq r \leq R_K$; y - радиус поперечного сечения параболоида вращения, м; α - параметр параболоида, м.

Площадь поперечного сечения параболического пласта с координатой r равна

$$F_{\Pi} = \pi y^2 = \pi \alpha r. \quad (9.2)$$

Площадь поперечного сечения кругового пласта, заменяемого параболическим, равна

$$F_{кр} = 2\pi r h, \quad (9.3)$$

где h - толщина кругового пласта, м.

Одним из условий равенства фильтрационных сопротивлений кругового и параболического пластов является равенство

$$2\pi r h = \pi \alpha r, \quad (9.4)$$

откуда

$$\alpha = 2h \quad (9.5)$$

Таким образом, на любом расстоянии r от оси скважины при $\alpha = 2h$ площади поперечных сечений (площади фильтрации) кругового и параболического пластов равны. Однако это условие не является единственным критерием подобия процессов фильтрации в круговом и параболическом пластах. Необходимо также, чтобы скорости фильтрации по образующей параболоида v_s и по оси параболоида v_r отличались незначительно для всего диапазона изменения $r_c \leq r \leq R_K$ (см. рис.9.1).

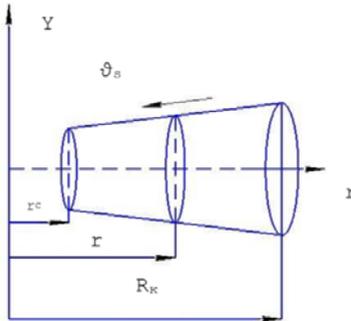


Рис.9.1. Схема параболического пласта

Введем в рассмотрение величину отклонения течения в параболоиде от плоскорадиального течения:

$$\beta = \frac{v_s}{v_r} \quad (9.6)$$

Как видно из рис. 9.1, при фиксированном значении параметра параболоида α величина отклонения β принимает наименьшее значение на контуре питания при $r = R_K$, а наибольшее - на забое скважины при $r = r_c$. Кроме того, для одинаковых r при уменьшении параметра параболоида α , характеризующего величину раствора параболы, отклонение β снижается. Вместе с тем, в параболических

моделях пластов с очень низким значением параметра α существенно уменьшается площадь поперечного сечения. Это ведет к значительному увеличению фильтрационного сопротивления и возможности нарушения линейного закона фильтрации. Поэтому подобие течений в параболическом и круговом пластах с достаточной для практики точностью обеспечивается путем надлежащего выбора параметра параболоида α .

В нефтяном или газовом пласте (особенно в газовом) основные потери давления приходятся на призабойную зону пласта, в которой сходятся линии тока. Учитывая это, диаметр выходного отверстия параболической модели необходимо делать, возможно, меньшим. Таким образом, на параболической модели пласта моделируется плоскорадиальная фильтрация жидкости или газа.

Распределение давления при установившемся плоскорадиальном течении идеального газа в однородном пласте по закону Дарси имеет вид:

$$P = \sqrt{P_C^2 + \frac{P_K^2 - P_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \ln \frac{r}{r_C}}, \quad (9.7)$$

а дебит газовой скважины, приведенный к атмосферному давлению $P_{ат}$, для кругового пласта

$$Q_{ат} = \frac{\pi k h}{\mu_{\Gamma} P_{ат}} \frac{P_K^2 - P_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (9.8)$$

где μ_{Γ} - коэффициент динамической вязкости газа в пластовых условиях, Па·с; $P_{ат}$ - барометрическое давление, Па; $Q_{ат}$ - расход газа при барометрическом (атмосферном) давлении и комнатной температуре.

Выражение (9.8) можно переписать в виде уравнения притока

$$P_K^2 - P_C^2 = A Q_{ат}, \quad (9.9)$$

где $A = \frac{\mu_{\Gamma} P_{ат}}{\pi k h} \ln \frac{R_K}{r_C}$ — коэффициент фильтрационного сопротивления, учитывающий линейные потери давления, $(\text{Па}^2 \cdot \text{с})/\text{м}$.

Уравнение (9.9) называется **уравнением притока газа** к совершенной скважине при линейном законе фильтрации. Следует отметить, что на практике дебиты газовых, скважин изменяются в широком диапазоне (20-1000 тыс. м³/сут и более), а т.к. скорости фильтрации в окрестности скважин возрастают обратно пропорционально уменьшению радиуса r , то при указанных значениях дебита газа линейный закон фильтрации имеет место только в удаленных от скважин зонах. В призабойной же зоне пласта справедлив двучленный закон фильтрации (см. формулу (2.9)). Соответствующее ему уравнение притока газа к скважине имеет вид

$$P_K^2 - P_C^2 = A Q_{ат} + B Q_{ат}^2 \quad (9.10)$$

где B - коэффициент фильтрационного сопротивления, учитывающий инерционные потери давления, (Па²·с)/м.

Распределение давления в параболическом пласте, заменяющем круговой пласт, также имеет вид (9.7), а дебит скважины из (9.8) с учетом соотношения (9.5) равен

$$Q_{ат} = \frac{\pi k \alpha}{2 \mu \gamma P_{ат}} \frac{P_K^2 - P_C^2}{\ln \frac{R_K}{r_C}} \quad (9.11)$$

Как видно из (9.9), зависимость между $Q_{ат}$ и $P_K^2 - P_C^2$ имеет линейный характер. По отклонению ее от прямолинейной зависимости можно судить о нарушении закона Дарси. При этом экспериментальную зависимость разности квадратов давлений $P_K^2 - P_C^2$ от дебита газа $Q_{ат}$, как это следует из (9.10), можно аппроксимировать параболой, проходящей через начало координат. Однако в настоящей лабораторной работе установка позволяет развивать невысокие скорости фильтрации, обеспечивающие выполнение закона Дарси.

При изучении фильтрации газа на параболической модели пласта уравнение притока согласно (9.11) имеет вид

$$P_K^2 - P_C^2 = A' Q_{ат}, \quad (9.12)$$

где $A' = \frac{2 \mu \gamma P_{ат}}{\pi k \alpha} \ln \frac{R_K}{r_C}$, причем при $\alpha = 2h$, $A' = A$; P_K - давление на входе в параболическую модель (контурное давление), Па; P_C - давление на

выходе параболической модели (давление на забое скважины), Па; R_K и r_c - радиусы контура питания и скважины соответственно, м.

Определяя из экспериментов значение A' , нетрудно рассчитать коэффициент проницаемости:

$$K = \frac{2\mu_{г}P_{ат}}{\pi A' \alpha} \ln \frac{R_K}{r_c}, \quad (9.13)$$

Величина A' может быть найдена как из условий отдельного опыта по формуле

$$A' = \frac{P_{K1}^2 - P_{C1}^2}{Q_{ат}}, \quad (9.14)$$

так и в результате построения графической зависимости $P_K^2 - P_C^2 = \int Q_{ат}$ - индикаторной диаграммы для нескольких режимов. На практике пользуются последним способом, т.к. он позволяет снизить влияние случайных погрешностей измеряемых величин.

9.2. Цель и задачи лабораторной работы

Целью лабораторной работы является исследование плоско-радиальной фильтрации газа на параболической модели.

Задачи лабораторной работы:

1) экспериментально установить закон распределения давления в пласте при плоско-радиальной установившейся фильтрации газа; сравнить экспериментальное и теоретическое распределения давления;

2) проверить выполнение линейного закона фильтрации газа в опытах;

3) определить коэффициент фильтрационного сопротивления и коэффициент проницаемости параболической модели пласта и ее участков; проверить однородность пористой среды модели пласта.

9.2 Порядок выполнения работы

Схема установки по изучению фильтрации газа на параболической модели пласта приведена на рис.9.2.

1. Сначала устанавливают редуктором небольшое давление на входе в модель пласта (0,2-0,5 МПа). Открывают входной и выходной вентили на модели и устанавливают режим фильтрации. Об

установлении режима фильтрации судят по стабилизации во времени показаний манометров. Смену режима производят изменением давления на входе в модель с помощью редуктора. Опыт проводят на 3 - 4 режимах.

2. Снимают показания манометров со всех отводных линий.

3. Расход газа на установившемся режиме определяется по разности показаний газовых часов ΔN за определенный промежуток времени, $\text{м}^5/\text{с}$:

$$Q_{\text{ат}} = \frac{\Delta N \cdot 10^{-3}}{\Delta t}. \quad (9.15)$$

4. По барометру регистрируется барометрическое (атмосферное) давление. Полученные результаты заносят в табл. 9.1.

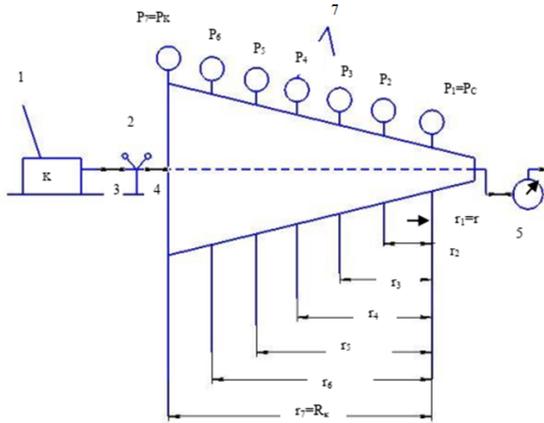


Рис. 9.2. Схема модели параболического пласта по изучению фильтрации газа:

1 - компрессор или баллон с газом; 2 - редуктор; 3, 4, 5 - вентили; 6 - параболическая модель с песком; 7 - манометры; 8 - газовые часы, $r_1 = r_c = 0,010$ м; $r_2 = 0,640$ м; $r_3 = 1,120$ м; $r_4 = 1,705$ м; $r_5 = 2,305$ м; $r_6 = 3,2$ м; $r_7 = R_k = 4,140$ м; параметр параболоида $\alpha = 0,1$ м

5. Теоретические значения давления по длине модели рассчитываются по формуле (9.7).

6. Для каждого режима строятся графики экспериментального и теоретического распределений давления и квадрата давления по пласту в координатах $[P-r]$ и $[P^2-r]$ соответственно.

7. Рассчитывается для каждого режима разность квадратов контурного и забойного давлений. Строится индикаторная диаграмм-

ма в координатах $[(P_k^2 - P_c^2) - Q_{ат}]$, рис. 9.3. По виду индикаторной диаграммы делается вывод о соблюдении закона фильтрации Дарси.

8. В случае выполнения закона Дарси по формуле (9.14) вычисляются коэффициент фильтрационного сопротивления A' для каждого из режимов, затем коэффициент фильтрационного сопротивления по индикаторной диаграмме как тангенс угла наклона индикаторной линии к оси дебита.

9. Для полученных значений коэффициента фильтрационного сопротивления по формуле (9.13) рассчитываются значения коэффициента проницаемости. Анализируются причины расхождения этих значений, обосновывается величина проницаемости модели пласта.

10. Рассчитываются для одного из режимов значения проницаемости отдельных участков модели по формуле

$$K = \frac{2\mu_r P_{ат}}{\pi \alpha} \frac{Q_{ат}}{P_{i+1}^2 - P_i^2} \ln \frac{r_{i+1}}{r_i}, \quad (9.16)$$

где P_i и P_{i+1} - замеренное давление в точках модели, отстоящих от выходного сечения на расстоянии r_i и r_{i+1} соответственно.

11. Сравнением полученных значений проницаемости делается вывод об однородности пористой среды параболической модели. В заключительных выводах формулируются основные результаты работы.

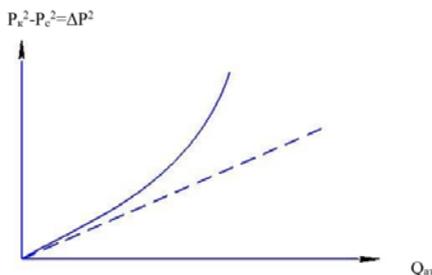


Рис.9.3. Индикаторные диаграммы газовых скважин:
1 - линейный закон; 2 - нелинейный закон

Таблица 9.1

	Режимы			
	I	II	III	IV
1. Замеренное давление газа, Па $r_1 = r_c = 0,01 \text{ м}$ $P_1 = P_c =$ $r_2 = 0,6 \text{ м}$ $P_2 =$ $r_7 = R_k = \dots \text{ м}$ $P_9 = P_k$				
2. Теоретические значения давления $r_2 = \dots$ P_2^T $r_3 = \dots$ P_3^T $r_7 = \dots$ P_7^T				
3. Объем газа, прошедшего через газовые часы за промежуток времени, $\text{м}^3/\text{с}$. Расход газа (дебит) при барометрическом давлении $Q_{ат}$, $\text{м}^3/\text{с}$.				
4. Барометрическое (атмосферное) давление $P_{ат}$, Па				
5. Разность квадратов давлений $P_k^2 - P_c^2$, Па^2				
6. Коэффициент фильтрационного сопротивления A' , $\text{Па}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^3$				
7. Коэффициент проницаемости модели K , мкм^2 а) по режимам б) по индикаторной диаграмме				
8. Разности квадратов замеренных давлений, Па^2 $P_2^2 - P_c^2$ $P_3^2 - P_c^2$ $P_k^2 - P_8^2$				
9. Коэффициенты проницаемости отдельных участков, мкм^2 K_1 K_2 K_8				

Перечень вопросов для самоподготовки

1. Вспомните понятия идеального и реального газов.
2. Охарактеризуйте особенности установившейся фильтрации газа по сравнению фильтрацией несжимаемой жидкости.
3. Опишите экспериментальную параболическую модель пласта для изучения плоскорадиальной фильтрации газа.
4. Напишите основные формулы, характеризующие установившуюся плоскорадиальную фильтрацию газа к скважине в круговом пласте (закон распределения давления, дебит скважины, уравнения притока) при линейном и нелинейных законах фильтрации.
5. Что такое коэффициенты фильтрационных сопротивлений при фильтрации газа и способы их определения?
6. Каковы особенности индикаторных диаграмм при фильтрации газа?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
ОБРАЗЕЦ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

по курсу «Подземная гидромеханика»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ОДНОРОДНОМ ПЛАСТЕ

Вариант –

Выполнил: студент гр.

Проверил:

Санкт-Петербург
2020

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Методические указания к выполнению лабораторных работ	4
1.1. Порядок выполнения и оформления лабораторных работ	4
1.2. Общие сведения о тематике лабораторного практикума.....	6
1.3. Основные правила техники безопасности в лаборатории	7
2. Лабораторная работа № 1. Исследование прямолинейно- параллельного установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте	8
3. Лабораторная работа № 2. Исследование плоскорадиального установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте	18
4. Лабораторная работа № 3. Исследование радиально-сферического установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в однородном пласте	28
5. Лабораторная работа № 4. Исследование одномерного прямолинейнопараллельного установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в неоднородных пластах.....	34
6. Лабораторная работа № 5. Исследование одномерного плоскорадиального установившегося фильтрационного потока несжимаемой жидкости в неоднородных пластах	42
Дебит скважины в таком двухзональном пласте определится.....	46
7. Лабораторная работа № 6. Исследование прямолинейно- параллельного установившегося фильтрационного потока идеального газа в однородном пласте	50
8. Лабораторная работа № 7. Исследование плоскорадиального установившегося фильтрационного потока идеального газа в однородном пласте	56
9. Лабораторная работа № 8. Исследование установившейся плоскорадиальной фильтрации газа на параболической модели пласта.....	63
Приложение 1	72