

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»**

* * *

**ГОРНО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА «НЕФТЕГАЗОВОЕ ДЕЛО»**

СТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ

Методические указания по выполнению курсовой работы

Для студентов, обучающихся по направлению подготовки:

21.04.01 – «Нефтегазовое дело»

Квалификация выпускника магистр.

Форма обучения – очная, очно-заочная

***Составители:* А.И.Мазко, И. И. Босиков**

Допущено

редакционно-издательским советом

Северо-Кавказского горно-металлургического института
(государственного технологического университета)

ВЛАДИКАВКАЗ - 2023

УДК 378.147
ББК 74.202.2
М 13

Рецензент:

доктор технических наук, профессор кафедры "Горное дело"
Северо-Кавказского горно-металлургического института
(государственного технологического университета)

Максимов Р.Н.

СТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ [Электронный ресурс]: Учебно-методическое пособие для самостоятельной работы и практических занятий по дисциплине «СТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ». Для студентов, обучающихся по направлению подготовки: 21.04.01 – «Нефтегазовое дело». Квалификация выпускника магистр. Форма обучения: все / Сост.: А.И. Мазко, И.И. Босиков; Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет).- Электрон. текст. дан. (86 Кб). - Владикавказ: Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), 2023.

Режим доступа

Загл. с титул. экрана.

Методические указания предназначены для выполнения курсовой работы по дисциплине «СТРОЕНИЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ НЕФТЯНЫХ И ГАЗОВЫХ ПЛАСТОВ» для студентов всех форм обучения направлению подготовки: 21.04.01 – «Нефтегазовое дело». Методические указания содержат ряд рекомендаций, пояснений, примеры расчета, а также ссылки на литературу, необходимую для выполнения всех разделов курсовой работы. Содержание указаний соответствует рабочей учебной программе

Подготовлено кафедрой Нефтегазового дела

© Составление ФГБОУ ВО СКГМИ (ГТУ), 2023

© Мазко А.И, Босиков И.И.,
составление, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

1	Введение	4
2	Требования к содержанию и оформлению курсовой работы	5
2.1	Структура и содержание курсового проекта	5
2.2	Требования к выполнению курсового проекта	6
3	Гидравлический расчет движения жидкости И ГАЗА в скважине	10
3.1	Уравнение Бернулли	10
3.2	Уравнение неразрывности.....	11
3.3	Потери напора по длине	12
3.4	потери напора на Местных сопротивлениях	13
3.5	Потери напора в некруглых трубах.....	14
3.6	Движение газа по трубам.....	15
3.7	Порядок расчета	17
4	Установившееся движение жидкости и газа в пористой среде	19
4.1	Основные понятия.....	19
4.2	Закон Дарси.....	20
4.3	Расчет дебита скважины	21
4.4	Несовершенные скважины	22
4.5	Неоднородный пласт.....	23
4.6	Интерференция скважин.....	25
4.7	Фильтрация газа	29
4.8	Порядок расчета	31
	Библиографический список	33

1 ВВЕДЕНИЕ

Выполнение и защита курсовой работы преследуют следующие цели:

- систематизировать и закрепить теоретические знания, полученные при изучении дисциплины «Строение и энергетическое состояние нефтяных и газовых пластов»;
- углубить теоретические знания по теме выполняемого курсовой работы;
- формировать умение использовать справочную и нормативную документацию;
- воспитать творческую самостоятельность, ответственность;
- подготовиться к итоговой государственной аттестации.

Для правильного понимания процессов, происходящих при движении нефти и газа, геолог-нефтяник должен знать особенности движения нефти и газа в пласте и скважине, а также влияние свойств пласта на продуктивность скважины. Поэтому курсовая работа представляет собой комплексную задачу, рассматривающую совместную работу пласта и скважины. В результате выполнения курсовой работы студент должен найти дебит скважины и предложить способы его увеличения.

2 ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполнение курсовой работы является видом самостоятельной работы.

Требования к оформлению, срокам и порядку защиты курсовой работы регламентируются Положением «О выполнении и защите курсовых работ (проектов) в ФГБОУ ВПО «СКГМИ (ГТУ)»

Курсовая работа состоит из теоретической и расчетной частей. Задание выдается преподавателем.

2.1 СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОГО ПРОЕКТА.

Введение

Во введении курсового проекта необходимо раскрыть современное состояние и перспективы внедрения современного оборудования для нефтегазовых компаний РФ. Раскрыть актуальность темы, сформулировать цель и задачи работы. Дается состав курсового проекта, перечень разделов, указывается количество страниц, иллюстраций, таблиц, количество первоисточников.

Теоретическая часть

В данном разделе освещается теоретический вопрос.

Расчетная часть

В данном разделе производится расчет, согласно заданию

Выводы.

Выводы должны содержать обобщенные результаты выполненной работы.

Список литературы

Приводится литература и иные источники, применявшиеся при выполнении работы

2.2 ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОГО ПРОЕКТА

Требования к оформлению текстового материала:

а) курсовая работа должна быть выполнена на листах формата А4 (210×297мм) в соответствии с ГОСТ 2.301-68 «ЕСКД. Форматы»;

б) текст должен быть выполнен на одной стороне белой бумаги через один интервал 14 шрифтом, лист содержит 33-35 строк текста.

в) текст пояснительной записки следует размещать, соблюдая следующие размеры:

г) расстояние от рамки формы до границ текста в начале и в конце строк не менее 3 мм;

д) расстояние от текста до верхней или нижней рамки должно быть не менее 20 мм;

е) расстояние между заголовком и текстом должно быть равно одному интервалу;

ж) расстояние между заголовком раздела и подраздела без интервалов;

з) абзацы в тексте начинают отступом 15-17 мм.

Нумерация страниц должна быть сквозной. Первой страницей считается титульный лист. Титульный лист и оборот титула не нумеруются.

Номера страниц проставляются внизу, в правом углу. Рисунки и таблицы на отдельных листах включаются в общую нумерацию страниц.

В оглавлении перечисляются введение, наименование разделов и подразделов, приложения, список литературы и номера страниц, где они расположены. Введение и заключение не нумеруются.

Текст курсового проекта разделяется на разделы, подразделы, в случае необходимости на пункты и подпункты

Разделы должны иметь порядковую нумерацию в пределах всей курсового проекта и обозначаются арабскими цифрами без точки в конце.

Подразделы нумеруются арабскими цифрами в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и подраздела, разделенные точкой.

Переносы слов в заголовках не допускаются. Точку в конце заголовка не ставят. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

Каждый раздел пояснительной записки следует начинать с нового листа.

Наименование разделов, подразделов записывают в виде заголовков (с абзаца 15-17мм) строчными буквами (кроме первой прописной).

Подчеркивание наименований разделов и подразделов не допускается.

При использовании формул, справочных и нормативных материалов необходимо давать ссылки на источники, для чего после приведения их указывается в квадратных скобках порядковый номер источника в соответствии со списком литературы и страницу. Например: [16, с.43].

Формулы в тексте нумеруются арабскими цифрами, применяется сквозная нумерация по всему тексту курсового проекта. Номер указывается с правой стороны листа на уровне формулы в скобках (10мм от рамки).

Пояснения значений символов и числовых коэффициентов следует приводить непосредственно под формулой в той же последовательности, в какой они даны в формуле. Значение каждого символа и числового коэффициента следует давать с новой строки. Первую строку объяснения начинают со слова «где» без двоеточия.

Формулы текста следует выделять свободными строками.

Ссылки в тексте на порядковые номера формул дают в скобках, например: ... по формуле (1).

Иллюстрации (диаграммы, графики, схемы) обозначают словом «Рисунок» и нумеруются последовательно арабскими цифрами, рисунки располагаются после первой ссылки на них.

При приведении цифрового материала должны использоваться только арабские цифры, за исключением общепринятой нумерации кварталов, полугодий, которые обозначаются римскими цифрами.

Требования к оформлению таблиц:

а) название таблицы должно отражать ее содержание, быть точным, кратким. Название следует помещать над таблицей слева, без абзацного отступа в одну строку с ее номером через тире.

б) между заголовком таблицы и ее нижней границей оставляются пробелы в одну строку, отделяющие ее от текста.

в) заголовки граф и строк таблицы следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят. Высота строк таблицы должна быть не менее 8 мм. Заголовки граф, как правило, записывают параллельно таблице, при необходимости допускается перпендикулярное расположение заголовков граф.

г) таблицы слева, справа, снизу, как правило, ограничиваются линиями.

д) при переносе части таблицы на другую страницу название помещают только над первой частью таблицы, нижнюю горизонтальную черту, ограничивающую таблицу не приводят.

е) слово «Таблица» указывают один раз слева над первой частью таблицы, над другими частями пишут слова «Продолжение таблицы» с указанием номера таблицы, при этом наименование граф (шапку) не надо переписывать, а следует проставлять их номера с предыдущей страницы.

ж) если все параметры, размещенные в таблице, выражены одной и той же величиной (например: тыс. руб.), то сокращенное обозначение этой единицы измерения помещают над таблицей, справа.

Требования к оформлению списка использованной литературы и приложений:

а) источники следует располагать в порядке появления ссылок на них в тексте, нумеровать арабскими цифрами без точки, печатать с абзацного отступа. Если источник имеет автора, то указывается сначала его фамилия, а затем инициалы.

б) при описании источников, взятых из журналов и газет, пишутся фамилия и инициалы автора, название статьи, затем две косые линии (//)

название журнала или газеты, точка, тире, номер журнала или дата выпуска газеты, точка.

2.4 Требования к оформлению приложений:

а) в приложении дается все, что не вошло в текст курсового проекта, они нумеруются в порядке появления ссылок на них в основном тексте работы.

б) каждое приложение следует начинать с новой страницы с указанием наверху посередине страницы слова «Приложение».

3 ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В СКВАЖИНЕ

3.1 УРАВНЕНИЕ БЕРНУЛЛИ

Для применения уравнения Бернулли необходимо выбрать плоскость сравнения (обозначается 0-0). Плоскостью сравнения может служить любая горизонтальная плоскость. Также необходимо выбрать два сечения. Сечения проводятся перпендикулярно вектору скорости. Нумерация сечений производится по направлению движения жидкости. Уравнение Бернулли для установившегося движения реальной несжимаемой жидкости записывается [1]:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_{1-2}, \quad (3.1)$$

где z - расстояние от плоскости сравнения до центра тяжести сечения. Если сечение лежит ниже плоскости сравнения, то z отрицательно;

p - абсолютное или манометрическое давление в сечениях;

ρ - плотность несжимаемой жидкости;

α - коэффициент кинетической энергии. Обычно принимается равным единице;

v - средняя скорость в сечениях;

g - ускорение свободного падения;

h_{1-2} - потери напора между сечениями 1 и 2. Они представляют собой сумму потерь напора по длине и сумму потерь напора на местных сопротивлениях

$$h_{1-2} = \sum h_m + \sum h_d \quad (3.2)$$

На схеме (рисунок 1.1) плоскость сравнения удобно выбрать по поверхности земли, сечение 1-1 у кровли пласта, а сечение 2-2 за штуцером. Тогда $z_1 = -L$, $z_2 = 0$, т.к. $z_2 \ll z_1$, $p_1 = p_3$, $p_2 = p_y$. Скоростными напорами $\alpha_1 v_1^2/2g$ и $\alpha_2 v_2^2/2g$ пренебрегаем, т.к. они малы по сравнению с потерями напора

по длине. Из формулы (2.1) найдем давление у кровли пласта:

$$p_3 = p_y + \rho g (L + h_{1-2}). \quad (3.3)$$

3.2 УРАВНЕНИЕ НЕРАЗРЫВНОСТИ

Уравнение неразрывности является следствием закона сохранения массы. Если поток ограничен непроницаемыми стенками, то при установившемся движении масса жидкости или газа, прошедшая через любое сечение потока за одно и то же время, будет одинакова. Поэтому массовый расход Q_m постоянен $Q_m = \text{const}$. Массовый расход связан с объемным расходом Q и средней скоростью v с отношениями:

$$Q_m = \rho Q = \rho \omega v = \text{const}, \quad (3.4)$$

где ρ - плотность газа;

ω - площадь поперечного сечения.

В общем случае при движении сжимаемой жидкости и газа плотность и объемный расход меняются по длине потока, т.к. давление по длине потока падает, а соответственно падает плотность газа и увеличивается объемный расход.

Часто вместо массового расхода при движении газа рассматривают приведенный к нормальным условиям объемный расход Q_{am} .

$$Q_{am} = Q_m / \rho_{am} = Q \rho / \rho_{am}. \quad (3.5)$$

При движении несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}$), уравнение неразрывности (2.4) упрощается:

$$Q_m / \rho = Q = v \omega = \text{const}. \quad (3.6)$$

Поэтому исходя из уравнения неразрывности при известном массовом расходе, плотности и площади поперечного сечения потока, можно найти среднюю скорость движения в поперечном сечении

$$v = Q_m / \rho \omega , \quad (3.7)$$

а для несжимаемой жидкости

$$v = Q / \omega . \quad (3.8)$$

3.3 ПОТЕРИ НАПОРА ПО ДЛИНЕ

Потери напора по длине определяются по формуле Дарси-Вейсбаха:

$$h_d = \lambda \frac{\ell}{D} \frac{v^2}{2g} , \quad (3.9)$$

где ℓ - длина трубы (или участка трубы) на котором определяются потери напора;

D – диаметр трубы;

v - средняя скорость в трубе;

$\lambda = \lambda(Re, \Delta/D)$ - коэффициент гидравлического сопротивления трения.

Коэффициент гидравлического сопротивления трения зависит от двух безразмерных параметров Re - числа Рейнольдса и Δ/D - относительной шероховатости трубы.

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = v D \rho / \mu = v D / \nu , \quad (3.10)$$

где μ - динамическая вязкость жидкости, Па с;

ν - кинематическая вязкость жидкости, м²/с.

Для определения коэффициента гидравлического сопротивления трения существует много различных формул. Удобно пользоваться следующими формулами.

Для ламинарного режима движения:

$$\lambda = 64/Re, \text{ если } Re < 2000. \quad (3.11)$$

Для турбулентного режима движения:

$$\lambda = 0,11 (68/Re + \Delta/D)^{0,25}, \text{ если } Re > 2000. \quad (3.12)$$

3.4 ПОТЕРИ НАПОРА НА МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ

Потери напора на местных сопротивлениях определяются по формуле:

$$h_m = \xi_m \frac{v^2}{2g}, \quad (3.13)$$

где v - средняя скорость движения жидкости;

ξ_m - коэффициент местного сопротивления.

Потеря напора на местном сопротивлении может определяться как по скорости до местного сопротивления, так и по скорости после местного сопротивления. Так как скорости по величине могут быть разными, то в этих случаях для одного и того же местного сопротивления будут разные значения ξ_m . принято определять потери напора по скорости после местного сопротивления. Исключение составляет расширение трубопровода (выход потока из трубы в бак), где потери определяются по скорости до местного сопротивления.

Замковые соединения труб представляют собой сужение и расширение потока и поэтому представляют собой сумму потерь напора на сужение и расширение. Эти потери напора будем определять по скорости до замкового сопротивления, тогда коэффициент на сужение определяется по формуле

$$\xi_c = \left(\frac{\omega}{\omega_m} - 1 \right)^2, \quad (3.14)$$

а для расширения по формуле

$$\xi_p = 0,5 \left(\frac{\omega}{\omega_m} - 1 \right) \frac{\omega}{\omega_m}. \quad (3.15)$$

Здесь ω - площадь поперечного сечения до замка, ω_m - минимальная

площадь поперечного сечения в замке.

Число замковых соединений зависит от глубины скважины и длины одной трубы НКТ $n = L/L_{\text{НКТ}}$. Тогда коэффициент сопротивления на всех замках будет равен:

$$\xi_3 = n (\xi_p + \xi_c). \quad (3.16)$$

Коэффициент сопротивления штуцера зависит от отношения площадей поперечных сечений отверстия штуцера $\omega_{\text{ш}}$ и труб арматуры ω_a на устье скважины (диаметр труб арматуры принимается равным 63 мм) и определяется по таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Определение коэффициента сопротивления штуцера

$\omega_{\text{ш}}/\omega_a$	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$\xi_{\text{ш}}$	1105	245	51,2	18,2	8,25	4,0	2,0	0,97	0,42	0,13	0,0

С учетом разных площадей поперечного сечения скважины и арматуры коэффициент сопротивления штуцера определяется по формуле

$$\xi'_{\text{шр}} = \xi_{\text{ш}} \left(\frac{\omega}{\omega_a} \right)^2. \quad (3.17)$$

3.5 ПОТЕРИ НАПОРА В НЕКРУГЛЫХ ТРУБАХ

При движении жидкости по трубам некруглого сечения расчет производится с учетом следующих особенностей.

Вводится понятие эквивалентного диаметра D_3 :

$$D_3 = 4 \omega / \chi, \quad (3.18)$$

где ω - площадь сечения;

χ - смоченный периметр - это часть периметра живого сечения, где жидкость соприкасается со стенками.

Для кольцевого пространства с диаметрами D и d площадь, смоченный

периметр и эквивалентный диаметр равны:

$$\begin{aligned}\omega &= \pi (D^2 - d^2)/4; \\ \chi &= \pi (D + d); \\ D_3 &= 4 \omega / \chi = (D - d).\end{aligned}\tag{3.19}$$

При расчете потерь напора и числа Рейнольдса в формулах (2.8) и (2.7) вместо диаметра D подставляется эквивалентный диаметр D_3 . Средняя скорость в трубе определяется $v = Q/\omega$.

3.6 ДВИЖЕНИЕ ГАЗА ПО ТРУБАМ

Малые перепады давлений. Если перепад давления мал, т.е. $(p_1 - p_2)/p_1 = 0,1$, то в этом случае с точностью до 10% можно сжимаемостью газа пренебречь и расчет вести как для несжимаемой жидкости. Для расчета необходимо найти среднее давление p_{cp} в колонне труб, среднюю температуру T_{cp} , среднее значение коэффициента сверхсжимаемости z_{cp} (для идеального газа $z_{cp} = 1$). Так как давление на забое скважины неизвестно, то в первом приближении давление на забое скважины можно принять равным пластовому. Считая температуру газа на поверхности равной 20°C (293°K), а пластовую температуру $T_{пл}$, получим:

$$p_{cp} = 0,5 (p_y + p_z), \quad T_{cp} = 0,5 (293 + T_{пл}).\tag{3.20}$$

Движение газа считается изотермическим, поэтому средняя плотность идеального газа находится как

$$\rho_{cp} = \rho_{ат} p_{cp} T_{ат}/(p_{ат} T_{cp}).\tag{3.21}$$

где $p_{ат}$ - атмосферное давление, принимается равным 0,1 МПа;

$\rho_{ат}$ - плотность газа при стандартных условиях;

$T_{ат}$ - стандартных температура (293°K).

Объемный расход, приведенный к среднему значению давления и

температуры в скважине, определится по формуле

$$Q = Q_{ат} \rho_{ат} / \rho_{ср} , \quad (3.22)$$

а средние скорости движения газа

$$v = Q/\omega. \quad (3.23)$$

Дальнейший расчет ведется аналогично расчету движения несжимаемой жидкости. По окончании расчета будет найдено в первом приближении давление на забое скважины. После этого найдем уточненное значение среднего давления и средней плотности газа по формулам (2.20, 2.21) и в ходе расчета найдем новое значение забойного давления. Таким образом, дальнейшие расчеты продолжать до тех пор, пока значение старого и нового забойного давления будут отличаться не более чем на 1%.

Большие перепады давлений. Если перепад на забое и устье большой, т.е. $(p_1 - p_2)/p_1 > 0,1$, то в этом случае удобно пользоваться формулой Адамова. Для расчета необходимо найти среднее давление $p_{ср}$ в колонне труб, среднюю температуру $T_{ср}$, среднее значение коэффициента сверхсжимаемости $z_{ср}$ (для идеального газа $z_{ср} = 1$). Так как давление на забое скважины неизвестно, то в первом приближении давление на забое скважины можно принять равным пластовому. Считая температуру газа на поверхности равной 20°C (293°K), а пластовую температуру $T_{пл}$ получим

$$p_3^2 = p_y^2 e^{2s} + B(e^{2s} - 1), \quad (3.24)$$

здесь

$$2s = \frac{2 \rho_{ат} g T_{ат}}{p_{ат} z_{ср} T_{ср}} ; \quad (3.25)$$

$$B = \frac{\lambda p_{ат}^2 T_{ср}^2 z_{ср}^2}{2 D_3 g \omega^2 T_{ат}^2} Q_{ат}^2$$

Коэффициент гидравлического сопротивления трения рассчитывается по формулам раздела 2.3, только число Рейнольдса удобнее рассчитывать по формуле:

$$Re = \frac{v D_{\text{э}} \rho}{\mu} = \frac{\rho_{\text{ат}} Q_{\text{ат}} D_{\text{э}}}{\mu \omega}. \quad (3.26)$$

3.7 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1). Задаемся максимальными значениями расхода. Расход (дебит) нефтяных и газовых скважин зависит от диаметра труб, перепада давления, вязкости, проницаемости пласта и многих других причин. Поэтому максимально возможные значения расхода (дебита) данной скважины задать, даже ориентировочно, трудно. Например, на Усинском месторождении дебит нефтяных скважин составляет от 10 до 100 м³/сут. Для газовых скважин значение приведенного дебита, например, на Вуктыльском месторождении, порядка 10⁵ м³/сут.

2). При заданном максимальном расходе (дебите) определяют среднюю скорость движения жидкости (газа) (п. 2.2), число Рейнольдса (п. 2.3), коэффициент гидравлического сопротивления трения (п. 2.3), коэффициент местных сопротивлений, потери напора и находят значение давления на забое скважины. При расчете движения газа в скважине, порядок расчета определения забойного давления определяется согласно пункту 2.6.

3). Задаемся значениями расхода (дебита), которые составляют 0,8; 0,6; 0,4; 0,2 и 0 от максимального значения расхода (дебита). Расчет производится аналогично пункту 2).

4). Результаты расчета удобно оформить в виде таблицы (таблица 2.2). В столбце примечаний указываются значения коэффициентов местных сопротивлений, вязкости жидкости, плотности газа при атмосферных условиях.

5). На основании расчетов строится зависимость забойного давления от расхода (рисунок 3.3).

Таблица 3.1 – Результаты расчетов

№№ по п.п.	Расход Q	Плотность ρ ($\rho_{\text{ар}}$)	Скорость $v = Q/\omega$	Число Рейнольдса Re	Режим движения	Коэффициент гидравлического сопротивления трения λ	Потери напора между сечениями 1 и 2 h_{1-2}	Забойное давление P_3	Примечание
	м ³ /с	кг/м ³	м/с	-	-	-	м	МПа	
1.									
2.									
3.									
4.									
5.									
6.	0								

Замечание. Нулевое значение расхода берется обязательно.

4 УСТАНОВИВШЕЕСЯ ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОСТИ И ГАЗА В ПОРИСТОЙ СРЕДЕ

4.1 ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Пористая среда представляет собой множество твердых частиц пространство между которыми (поры, трещины) заполнено жидкостью или газом [2]. Коэффициентом пористости m называется отношение объема пор в образе $W_{\text{п}}$ к объему образца W :

$$m = W_{\text{п}}/W . \quad (4.1)$$

Просветностью n называется отношение площади просветов $\omega_{\text{п}}$ в поперечном сечении образца к площади поперечного сечения этого образца:

$$n = \omega_{\text{п}}/\omega, \quad (4.2)$$

Можно доказать, что средняя просветность равна пористости. Жидкость в образце породы движется только по порам, поэтому при известном объемном расходе жидкости (газа) действительная скорость движения частиц жидкости v равна:

$$v = Q/\omega_{\text{п}}, \quad (4.3)$$

Удобно ввести фиктивную скорость, которую назовем скоростью фильтрации u . Эта скорость соответствует движению жидкости, как через поры образца, так и через породу. Поэтому при том же объемном расходе через образец, скорость фильтрации определяется:

$$u = Q/\omega . \quad (4.4)$$

Скорость фильтрации связана с действительной скоростью соотношением

$$u = m v. \quad (4.5)$$

Из сравнения формулы для скорости фильтрации (3.4) и формулы для движения жидкости по трубам (2.7) видно, что они имеют один и тот же вид,

т.к. закон сохранения массы справедлив и при фильтрации жидкости (газа), то уравнение неразрывности при фильтрации жидкости будет иметь тот же вид, что и при движении жидкости по трубам.

Для жидкости и газа:

$$Q_m = \rho \omega u = \text{const} \quad (4.6)$$

Для несжимаемой жидкости ($\rho = \text{const}(p)$) это уравнение упрощается:

$$Q = \omega u = \text{const} \quad (4.7)$$

4.2 ЗАКОН ДАРСИ

Движение однородной жидкости пористой среде определяется силами давления и силами тяжести. Основное соотношение теории фильтрации - закон Дарси - устанавливает связь между величиной скорости фильтрации вдоль линии тока и силами, действующими в жидкости, и записывается:

$$u = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p^*}{\partial s}, \quad (4.8)$$

где u - скорость фильтрации вдоль линии тока;

k - коэффициент проницаемости, который характеризует свойства породы;

μ - динамический коэффициент вязкости;

∂s - расстояние между двумя бесконечно близкими точками линии тока;

∂p^* - перепад приведенных давлений в этих точках.

Приведенное давление зависит от давления в данной точке, плотности жидкости ρ , ускорения силы тяжести g , расстояния z от плоскости сравнения до данной точки и определяется:

$$p^* = p + \rho g z. \quad (4.9)$$

При движении жидкости в горизонтальных пластах ($z = \text{const}$), второе слагаемое постоянно и при подстановке в формулу (3.9) обращается в нуль. Поэтому в горизонтальных пластах при движении однородной жидкости приведенное давление можно положить равным давлению в данной точке.

При больших скоростях движения жидкости, особенно часто это касается газа, происходит нарушение закона Дарси. В этом случае необходимо пользоваться нелинейными законами фильтрации.

4.3 РАСЧЕТ ДЕБИТА СКВАЖИНЫ

Если скважина вскрывает пласт на всю толщину пласта h и фильтрация происходит по всей боковой поверхности, то скважина называется совершенной. Поперечные сечения представляют собой боковую поверхность цилиндра радиусом r и высотой h . Поэтому площадь поперечного сечения равна:

$$\omega = 2 \pi r h. \quad (4.10)$$

При движении несжимаемой жидкости удобно пользоваться уравнением неразрывности в виде:

$$Q = u \omega = \text{const}. \quad (4.11)$$

Частицы жидкости к скважине движутся от контура питания по радиусам. Поэтому радиусы являются линиями тока и расстояние вдоль линии тока удобно отсчитывать от радиуса контура питания R_k . Оно будет равно:

$$S = R_k - r, \quad dS = -dr. \quad (4.12)$$

Тогда закон Дарси (3.8) запишется в виде:

$$Q = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} 2 \pi r h. \quad (4.13)$$

Используя соотношения (3.10) и (3.11), последнее уравнение легко интегрируется. Если заданы давления на контуре питания p_k и на скважине p_z , и

известен радиус скважины r_c , то дебит (расход), скважины находится по формуле Дюпюи:

$$Q = \frac{2 \pi k h}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r_c)}. \quad (4.14)$$

Практически давление на скважине совпадает с забойным давлением, которое рассчитывается во второй главе ($p_c = p_3$).

4.4 НЕСОВЕРШЕННЫЕ СКВАЖИНЫ

Если скважина вскрывает пласт не на всю толщину, а на некоторую глубину b , то скважина называется несовершенной по степени вскрытия. При этом b/h называется относительным вскрытием пласта.

Если скважина сообщается с пластом не по всей боковой поверхности, а только через специальные отверстия, то такую скважину называют несовершенной по характеру вскрытия. Дебит несовершенных скважин определяется по формуле

$$Q = \frac{2 \pi k h}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{(\ln(R_k/r_c) + C_1 + C_2)}. \quad (4.15)$$

где C_1, C_2 - безразмерные коэффициенты.

Эти коэффициенты удобно определять по графикам В.И. Щурова или аналитическим зависимостям, которые приведены в [3, 4].

Коэффициент C_1 учитывающий дополнительное фильтрационное сопротивление в призабойной зоне пласта из-за несовершенства скважины по степени вскрытия зависит только от относительного вскрытия пласта h и отношения толщины пласта к диаметру скважины h/D_c .

Коэффициент C_2 учитывающий дополнительное фильтрационное сопротивление в призабойной зоне пласта из-за несовершенства скважины по характеру вскрытия зависит от диаметра перфорационного канала d_n , числа отверстий на один погонный метр длины скважины n_n и длины

перфорационного канала l_p . По следующим безразмерным параметрам определяются:

l_p/D_c – график, по которому находится C_2 ,

d_p/D_c – номер линии на этом графике;

$n_p D_c$ – значение C_2 .

В отличие от C_1 , C_2 может принимать отрицательные значения, что приводит при прочих равных условиях к увеличению дебита скважины. Удобно ввести понятие о приведенном радиус r'_c , т.е. радиус такой совершенной скважины, дебит которой равен дебиту данной несовершенной скважины:

$$r'_c = r_c \exp(-(C_1 + C_2)). \quad (4.16)$$

Тогда формула (3.14) запишется в виде:

$$Q = \frac{2 \pi k h}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r'_c)}. \quad (4.17)$$

4.5 НЕОДНОРОДНЫЙ ПЛАСТ

Часто встречаются пласты, значительные области которых сильно отличаются друг от друга по фильтрационным характеристикам. Можно выделить два основных вида неоднородностей такого типа - это слоисто - неоднородные и зонально - неоднородные пласты. Слоисто - неоднородный пласт состоит из пропластков разной толщины h_i и проницаемости k_i . Часто пропластки разделены непроницаемыми границами. В других случаях между ними существуют перетоки. В случае непроницаемых границ между пропластками, каждый пропласток можно считать, как отдельный пласт, со своей проницаемостью, толщиной и дебитом Q_i . Поэтому дебит скважины в таком пропластке будет определяться по формуле Дюпюи:

$$Q_i = \frac{2 \pi k_i h_i}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r_c)}. \quad (4.18)$$

А дебит всей скважины будет равен сумме дебитов всех пропластков:

$$Q = \sum_1^n Q_i = \frac{2 \pi \sum_1^n k_i h_i}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r_c)}. \quad (4.19)$$

Если заменить слоисто - неоднородный пласт однородным с проницаемостью k_{cp} таким образом, что дебиты слоисто - неоднородного и однородного пласте были равны, тогда среднюю проницаемость можно определить по формуле:

$$k_{cp} = \frac{1}{h} \sum_1^n k_i h_i. \quad (4.20)$$

Зонально-неоднородный пласт состоит из кольцевых зон. В пределах каждой той зоны ($i = 1, 2, \dots, n$) проницаемость постоянна и равна k_i . Наружный и внутренний радиусы зоны равны соответственно R_i, R_{i-1} . Причем, внутренний радиус первой зоны равен радиусу скважины $R_0 = r_c$, давление жидкости на этой границе равно давлению на скважине $p_0 = p_c$. Наружный радиус последней зоны равен радиусу контура питания $R_n = R_k$, а давление на нем $p_n = p_k$.

При движении жидкости к скважине в зонально-неоднородном пласте, дебит в любом поперечном сечении потока жидкости в любой из зон будет один и тот же и равен дебиту скважины. В пределах каждой зоны будет справедлива формула Дюпюи, в которую вместо радиуса контура питания и радиуса скважины стоят соответственно внешний и внутренний радиус зоны, а перепад давлений равен перепаду давлений на границах зоны. Обозначив давления на границах зон p_i , получим:

$$Q = Q_i = \frac{2 \pi k_i h}{\mu} \frac{(p_i - p_{i-1})}{\ln(R_i/R_{i-1})}. \quad (4.21)$$

Исключим из этой системы уравнений неизвестные давления на границах зон. Для этого перенесем проницаемости в знаменатель и воспользуемся правилом пропорций $a/b = c/d = \dots = (a + c + \dots)/(b + d + \dots)$, тогда получим формулу для дебита скважины в виде

$$Q = \frac{2 \pi h}{\mu} \frac{(p_i - p_{i-1})}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \ln(R_i/R_{i-1})}. \quad (4.22)$$

Если заменить зонально - неоднородный пласт однородным с проницаемостью k_{cp} таким образом, что дебиты зонально - неоднородного и однородного пласте были равны, тогда среднюю проницаемость можно определить по формуле:

$$k_{cp} = \frac{\ln(R_k/r_c)}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{k_i} \ln(R_i/R_{i-1})}, \quad (4.23)$$

а дебит скважины будет определяться по формуле Дюпюи:

$$Q = \frac{2 \pi k_{cp} h}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r_c)}. \quad (4.24)$$

4.6 ИНТЕРФЕРЕНЦИЯ СКВАЖИН

Интерференцией называется влияние работающих скважин друг на друга. Наиболее наглядно интерференция проявляется в том, что при одинаковых условиях работы скважин суммарный дебит всех скважин растет не прямо пропорционально количеству скважин, а более сложным образом. При этом с увеличением числа скважин пуск каждой новой скважины приводит к меньшему увеличению суммарного дебита.

В подземной гидромеханике при работе групп скважин и установившемся движении несжимаемой жидкости широко используется метод суперпозиции (наложения), который следует из уравнений неразрывности и закона Дарси. Смысл метода суперпозиции состоит в том, что изменения давления в данной точке пласта, вызванное работой каждой скважины, суммируется. Поэтому будут суммироваться и вектора скоростей фильтрации. Распределение давления вокруг одной скважины в бесконечном пласте определяется в какой-либо точке

А по формуле:

$$p_{1a} = p_c - \frac{Q_1 \mu}{2 \pi k h} \ln(R_k/r_{1a}) = \frac{Q_1 \mu}{2 \pi k h} \ln(r_{1a}) + c_1, \quad (4.25)$$

где r_{1a} - расстояние от скважины до точки А;

p_a - давление в точке А.

Тогда при работе n скважин, давление в точке А будет равно:

$$p_a = \sum_{i=1}^n p_{1a} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \mu}{2 \pi k h} \ln(r_{ia}) + \sum_{i=1}^n c_1. \quad (4.26)$$

Сумму постоянных обозначим c . Будем считать, что контур питания удаленный, т.е. расстояния между скважинами гораздо меньше расстояния до контура питания. Поместим точку А на контур питания, тогда можно считать, что $r_{1a} = r_{2a} = R_k$ и $p_a = p_k$. Из этого условия получаем:

$$p_k = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \mu}{2 \pi k h} \ln(R_k) + c. \quad (4.27)$$

Исключая постоянную c получим следующее уравнение для давления в произвольной точке пласта:

$$p_k - p_a = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \mu}{2 \pi k h} \ln(R_k/r_{ia}). \quad (4.28)$$

Для того чтобы найти дебиты скважин при известных забойных давлениях, помещаем точку А на забой первой скважины, тогда $r_{1a} = r_{c1}$ - радиус первой скважины, $r_{2a} = r_{21}$ - расстояние между второй и первой скважинами и т.д., а $p_a = p_{c1}$ - забойное давление на первой скважине. Аналогично поступаем и для других скважин. Для j - той скважины получим следующее уравнение:

$$p_k - p_{cj} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i \mu}{2 \pi k h} \ln(R_k/r_{ij}). \quad (4.29)$$

В общем случае это уравнение является системой n уравнений. Первое уравнение получается, если подставить $j = 1$, второе $j = 2$ и так далее до значения $j = n$. Неизвестными могут являться, как дебиты, так и давления на

скважинах. Наиболее интересны следующие частные случаи.

Непроницаемая граница. Пусть скважина расположена на расстоянии a от непроницаемой границы. Используя принцип суперпозиции (наложения) скоростей можно показать, что эта задача эквивалентна задаче о притоке к двум скважинам (рисунок 3.1). Отсюда выводится принцип отражения: для того чтобы избавиться от прямолинейной непроницаемой границы необходимо область фильтрации зеркально отразить относительно этой границы. После этого непроницаемую границу можно убрать.

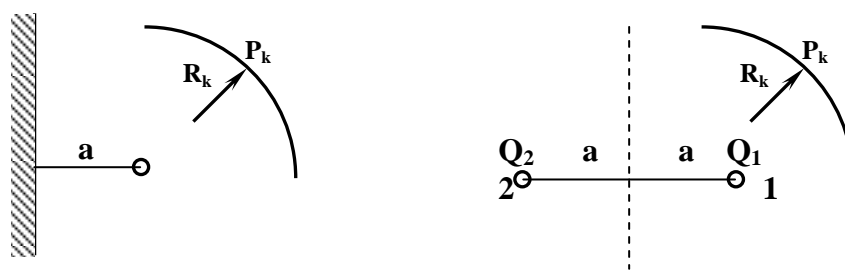


Рисунок 3.1 – Схема расположения скважины вблизи непроницаемой границы

Запишем систему уравнений интерференции скважин с удаленным контуром питания для двух скважин. Скважины одинаковые, поэтому можно записать не два уравнения, а одно, например при $j = 1$. Из геометрии задачи следует, что

$r_{c1} = r_{c2} = r_c$, $r_{12} = r_{21} = r_c$, $Q_1 = Q_2 = Q$ и $p_{c1} = p_c$. Тогда

$$p_k - p_c = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln(R_k/r_c) + \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln(R_k/2a) = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln(R_k^2/(r_c 2a)). \quad (4.30)$$

Поэтому дебит скважины у непроницаемой границы вычисляется по формуле:

$$Q = \frac{2\pi kh (p_k - p_c)}{\mu \ln(R_k^2/(r_c 2a))}. \quad (4.31)$$

Прямолинейный контур питания. Пусть скважина расположена на расстоянии a от прямолинейного контура питания. Используя принцип

суперпозиции (сложения) скоростей можно показать, что эта задача эквивалентна задаче о притоке к двум скважинам (рисунок 3.2). Отсюда выводится принцип отражения: для того чтобы избавиться от прямолинейного контура питания необходимо область фильтрации зеркально отразить относительно этого контура и в отраженной области поменять знак дебитов скважин на противоположный, то есть добывающие скважины сделать нагнетательными и наоборот. После этого прямолинейный контур питания можно убрать.

Запишем систему уравнений интерференции скважин с удаленным контуром питания для двух скважин. Так, как скважины одинаковые, то можно записать не два уравнения, а одно, например при $j = 1$.

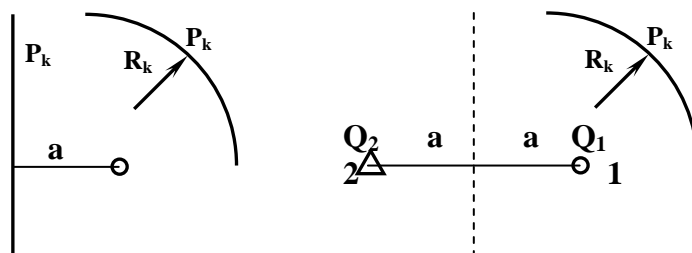


Рисунок 3.2 – Схема расположения скважины вблизи прямолинейного контура питания

Из геометрии задачи следует, что

$r_{c1} = r_{c2} = r_c$, $r_{12} = r_{21} = r_c$, $Q_1 = Q$, $Q_2 = -Q$ и $p_{c1} = p_c$. Тогда

$$p_k - p_c = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln(R_k/r_c) + \frac{(-Q)\mu}{2\pi kh} \ln(R_k/2a) = \frac{Q\mu}{2\pi kh} \ln\left(\frac{R_k}{r_c} \frac{2a}{R_k}\right). \quad (4.32)$$

Поэтому дебит скважины у прямолинейного контура питания определяется по формуле:

$$Q = \frac{2\pi kh (p_k - p_c)}{\mu \ln(2a/r_c)}. \quad (4.33)$$

4.7 ФИЛЬТРАЦИЯ ГАЗА

Все формулы пунктов 3.3 - 3.6 выведены для установившегося движения несжимаемой жидкости $\rho = \text{const}(p)$, на основании уравнения неразрывности и закона Дарси:

$$Q = u \omega = \text{const},$$
$$u = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial s}. \quad (4.34)$$

Величины k , μ , ω (s) от давления не зависят.

При изотермическом движении идеального газа плотность газа зависит от давления $\rho(p)$. Поэтому уравнение неразрывности потока будет справедливо для массового расхода (объемный расход с уменьшением давления будет увеличиваться). Тогда уравнения запишутся:

$$Q_m = \rho_{\text{ат}} Q_{\text{ат}} = \rho u \omega = \text{const},$$
$$u = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial s}. \quad (4.35)$$

Подставим скорость фильтрации, найденную из закона Дарси, в уравнения неразрывности и запишем полученные формулы для жидкости и газа:

$$Q = u \omega = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial s} \omega = \text{const}; \quad Q_m = \rho u \omega = - \frac{k \rho}{\mu} \frac{\partial p}{\partial s} \omega = \text{const}. \quad (4.36)$$

Сравнивая эти формулы видим, что они отличаются, кроме обозначений, присутствием множителя $\rho(p)$. Для того чтобы добиться полной аналогии в уравнениях, введём функцию P , которая называется функцией Лейбензона и зависит от давления:

$$dP = \rho(p) dp \quad \text{или} \quad P = \int \rho(p) dp. \quad (4.37)$$

Таким образом, уравнения изотермического установившегося движения идеального газа запишутся:

$$Q_m = \rho u \omega = - \frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial s} \omega = \text{const.} \quad (4.38)$$

Сравнивая уравнения фильтрации несжимаемой жидкости и газа, видим их полную аналогию. То есть, если в уравнениях несжимаемой жидкости заменить объемный расход $Q \Rightarrow Q_m$ - массовым расходом, а давление $p \Rightarrow P$ - функцией Лейбензона, то получим уравнения движения сжимаемой жидкости или газа. Поэтому, если для несжимаемой жидкости при притоке к скважине получена формула Дюпюи, то для сжимаемой жидкости или газа получаем формулу:

$$Q = \frac{2 \pi k h}{\mu} \frac{(p_k - p_c)}{\ln(R_k/r_c)} \Rightarrow Q_m = \frac{2 \pi k h}{\mu} \frac{(P_k - P_c)}{\ln(R_k/r_c)}. \quad (4.39)$$

Здесь введены обозначения P_k, P_c - значения функций Лейбензона на контуре питания и на скважине. Аналогично получаются формулы при движении газа к несовершенным скважинам, интерференции газовых скважин и т.д.

При изотермическом движении идеального газа уравнение состояния газа запишется:

$$\rho = \frac{p}{R' T} = \rho_{\text{ат}} \frac{p}{p_{\text{ат}}}, \quad (4.40)$$

где $p_{\text{ат}} = 0,1$ МПа - стандартное давление;

$\rho_{\text{ат}}$ - плотность газа при стандартном давлении и пластовой температуре;

R' - газовая постоянная.

Поэтому функция Лейбензона будет равна:

$$P = \frac{\rho_{\text{ат}}}{R_{\text{ат}}} \int p dp = \frac{\rho_{\text{ат}}}{2 R_{\text{ат}}} p^2. \quad (4.41)$$

Постоянная интегрирования опущена, т.к. в дальнейшем всегда будет встречаться разность двух функций Лейбензона. При этом постоянные интегрирования взаимно сокращаются.

4.8 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1). Задаем значением давления на скважине p_c и вычисляем депрессию $p_k - p_c$. При движении газа вычисляем значения функции Лейбензона R_k и R_c и находим их разность $R_k - R_c$.

2). В зависимости от формы контура питания (круговой, прямолинейный) и наличия непроницаемой границы выбираем соответствующую формулу для притока к скважине жидкости или газа.

3). Если пласт неоднородный по толщине, а скважина несовершенна, то для каждого пропластка в отдельности находим коэффициенты C_2 и C_1 и вычисляем приведенные радиусы скважин для этих пропластков. Если пласт зонально неоднородный, то эти коэффициенты и приведенный радиус скважины вычисляется для всей толщины пласта.

4). Определяем дебит скважины. Для неоднородного по толщине пласта по формулам п. 2 с учетом п. 3 находим дебит каждого пропластка и их суммируем (для газа находим массовые расходы). Для зонально неоднородного пласта находим среднее значение проницаемости пласта и вычисляем, с учетом несовершенства скважины, дебиты скважин.

5). Для газовых скважин находим приведенный к стандартным условиям объемный дебит $Q_{ат}$.

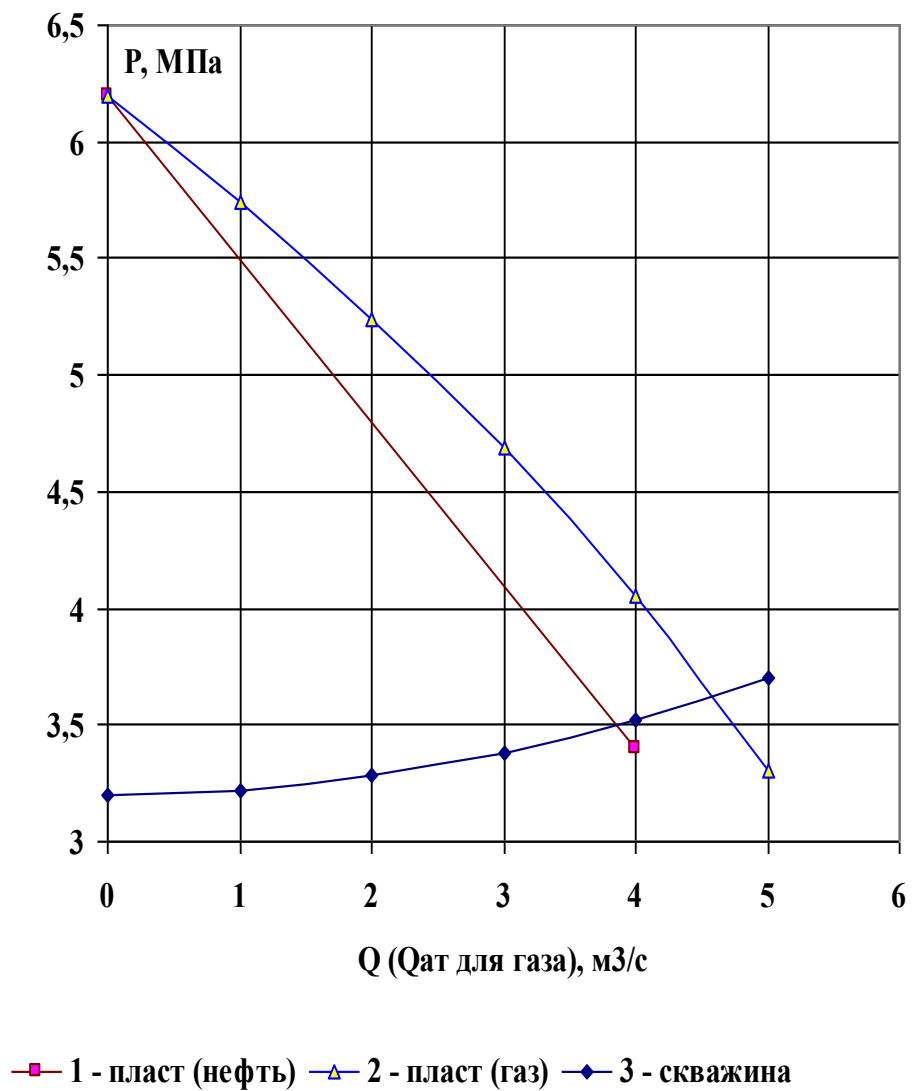
6). При движении газа задаемся несколькими (до пяти) значениями давления на забое скважины и для них проводим расчеты снова.

7). Строим зависимость давления на забое скважины от расхода. Т.к. для несжимаемой жидкости зависимость между давлением на забое и расходом линейная, то ее можно построить по одной точке (вторая точка $Q = 0$; $p = p_k$ - известна). На рисунке 3.3 приведены графики зависимости давления на забое скважины от расхода при движении жидкости или газа в скважине и фильтрации жидкости (газа) в пористой среде.

8). По графикам находим рабочую точку. Она находится в точке пересечения линий работы скважины и фильтрации жидкости (газа) в пласте

(пересечении линий 3 и линии 1 или 2).

Рисунок 3.3 - Зависимость давления на забое скважины от дебита



БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Храменков, В. Г. Автоматизация управления технологическими процессами бурения нефтегазовых скважин [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / В. Г. Храменков. — Москва : Издательство Юрайт .-2021. -415 ЭБС "Юрайт". Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/469988>
2. Нефтегазовые технологии: физико-математическое моделирование течений [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А. Б. Шабаров [и др.] ; под редакцией А. Б. Шабарова. — Москва : Издательство Юрайт, 2022 ; Тюмень : Тюменский государственный университет. — 215 с. ЭБС "Юрайт". Режим доступа: <https://urait.ru/bcode/498906>
- 3 . Степанова Г.С. Газовые и водогазовые методы воздействия на нефтяные пласты [Электронный ресурс] -М.: Газоил Пресс, .-2006. -200с Место хранения: ЭБС «ГОРНОЕ ДЕЛО». Режим доступа: <http://bibl.gorobr.ru/rasshirennyj-poisk?view=content&id=32070>
4. Басарыгин Ю.М. Бурение нефтяных и газовых скважин [Электронный ресурс] : учеб. пособие для вузов / Ю.М. Басарыгин, А.И. Булатов, Ю.М. Проселков. -М.: Недра-Бизнесцентр, .-2002. -632с. Место хранения: ЭБС «ГОРНОЕ ДЕЛО». Режим доступа: <https://bibl.gorobr.ru/rasshirennyj-poisk?view=content&id=31167>
5. Сваровская Н.А. Физика пласта [Электронный ресурс]: учеб. пособие для вузов. -Томск: Изд-во ТПУ, .-2003. -155с Место хранения: ЭБС «ГОРНОЕ ДЕЛО». Режим доступа: <http://bibl.gorobr.ru/rasshirennyj-poisk?view=content&id=31162>
6. Геология нефти и газа [Электронный ресурс] : учеб. для студентов образовательных организаций высшего образования, обучающихся по направлению подготовки бакалавриата "Нефтегазовое дело" / [В.Ю. Керимов и др.]. -М.: Академия, .-2015. -288с. Э Б «ГОРНОЕ ДЕЛО». Режим доступа: <http://bibl.gorobr.ru/rasshirennyj-poisk?view=content&id=32075>

7. Гидравлика : учебник и практикум для вузов / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов ; под редакцией В. А. Кудинова. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2023. — 386 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-01120-3. — Текст : электронный // Образовательная платформа Юрайт [сайт]. — URL: <https://urait.ru/bcode/511258>
8. Гидромеханика : учеб. пособие для студ. вузов, [аспирантов] / Д.Н. Попов, С.С. Панайотти, М.В. Рябинин; Учеб.-метод. объединение по образованию. -М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, .-2014. -318с
9. Гусев А.А. Гидравлика. Теория и практика : учеб. для студ. вузов, [бакалавров, магистров, специалистов] / М-во образования и науки Рос. Федерации. -2-е изд., испр. и доп. -М.: Юрайт, .-2015. -285с.
10. Гейер Виктор Георгиевич и др. Гидравлика и гидропривод : [Учеб. для вузов] / В.Г. Гейер, В.С. Дулин, А.Н. Заря. -М.: Недра, .-1991. -330,[1]с.