

Министерство образования и науки Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Институт прикладной математики и механики
Кафедра теоретической механики

Работа допущена к защите
Зав. кафедрой, д.ф.-м.н., проф.
_____ А.М.Кривцов
____» _____ 2018 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА МАГИСТРА

«ОПТИМАЛЬНОЕ ПЛАНИРОВАНИЕ ГДИ НА ОСНОВЕ ЦЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ»

по направлению 01.04.03 «Механика и математическое моделирование»
по образовательной программе»
01.04.03_04 «Математическое моделирование процессов нефтегазодобычи»

Выполнил

студент гр. 23642/3

_____ А.Р.Валиахметова

Руководитель, к. ф.-м.н.

доцент кафедры

«Теоретическая механика» СПбПУ

_____ Е.А. Подольская

Консультант,

Эксперт ООО «Газпромнефть НТЦ»

_____ В.С. Котежеков

Санкт-Петербург

2018

РЕФЕРАТ

58 страниц, 29 рисунков, 3 таблицы, 18 источников литературы.

Ключевые слова: Гидродинамические исследования скважин, бурение скважин, фильтрационно-ёмкостные свойства пласта, пластовое давление, Kriging.

В данной работе изложен подход к созданию инструмента для оценки необходимости проведения гидродинамических исследований на этапе планирования бурения скважин на основе метода VOI. Проведен анализ исходных данных по месторождению. Реализован с помощью языка программирования Python интерполятор Кригинг. Рассчитаны добычные характеристики проектных скважин. Решены задачи о нестационарном притоке к скважине с применением языка программирования VBA.

THE ABSTRACT

Key words: Well test analysis, well drilling, filtration and capacitive properties of rocks, formation pressure, Kriging.

In the given work the essence of the approach to assess the need of well test analysis at the planning stage of well drilling based on the VOI method. The analysis of the initial data on the field is lead. The Python programming language is implemented to interpolate the initial values by using the method Kriging. The production characteristics of the project wells are calculated. The problem of unsteady inflow to the well was solved by using the VBA programming language

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА1 ЦЕННОСТЬ ИНФОРМАЦИИ (VOI).....	7
ГЛАВА 2 ОБЗОР ИМЕЮЩИХСЯ ДАННЫХ.....	9
ГЛАВА 3 КРИГИНГ	12
3.1 Теоретическая основа	13
3.2 Реализация метода	18
ГЛАВА 4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГДИС.....	25
4.1 Основы теории фильтрации в пористой среде	27
4.2 Решение уравнения пьезопроводности.....	30
ГЛАВА 5 ЗАДАЧА О НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРИТОКЕ К СКВАЖИНЕ....	36
5.1 Приток к вертикальной скважине с трещиной ГРП.....	36
5.2 Приток к горизонтальной скважине с МГРП.....	40
5.3 Реализация задачи	44
ГЛАВА 6 РАСЧЁТ ЦЕННОСТИ ПРОЕКТА (EMV).....	48
6.1 EMV до ГДИ.....	48
6.2 EMV после ГДИ	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
ОХРАНА ТРУДА	54
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	57

ВВЕДЕНИЕ

При планировании бурения одной из главных задач перед инженером-нефтяником является расчёт плановых показателей добычи, которые в дальнейшем влияют на реализацию проектного бурения. Расчёт данных показателей основывается на информации о параметрах пласта (1).

Основной неопределенностью при подсчёте добычных показателей являются фильтрационные емкостные свойства (ФЕС) пласта, которые характеризуют способность пласта фильтровать флюид к скважине (к ним относится параметр проницаемость, k), и пластовое давление ($P_{пл}$) характеризующее энергетическое состояние пласта, которое в свою очередь будет влиять на получаемый объём флюида.

Для количественного корректного определения вышеуказанных характеристик пласта применяют гидродинамические исследования скважин (ГДИС), которые подразумевают остановку скважин, что в свою очередь несёт потерю прибыли. В свою очередь неопределённости в ФЕС и пластовом давлении не позволяют корректно рассчитать показатели добычи. По этой причине, предлагается подход для оценки необходимости проведения исследований ГДИС перед бурением скважин – VOI.

VOI (Volume of information) - метод оценки необходимости проведения исследования при принятии решения в условиях неопределенности данных. В данной работе оценивается экономическая целесообразность проведения ГДИС.

VOI вычисляется как разница между ожидаемой ценностью проекта (прибылью) с учетом (EMVwi) и без учета полученной информации (EMVwoi). Если $VOI >$ затрат на проведение исследования, тогда исследование экономически обосновано; если $VOI <$ затрат на проведение исследования, исследование не обосновано. Таким образом, метод позволяет на количественном уровне оценить возможность проведения ГДИС.

Для расчёта VOI необходимо:

- 1 Расчёт распределений исходных параметров ФЕС и $P_{пл}$ в точках уже пробуренных и эксплуатирующих скважин вблизи проектной скважины.
- 2 Для расчёта плановых показателей добычи проектной скважины необходимо интерполировать значения ФЕС и $P_{пл}$ из точек скважин, где рассчитаны данные параметры по исследованиям ГДИС.
- 3 Расчёт EMV_{wi} на основе полученных показателей добычи
- 4 Для вычисления EMV_{woi} необходимо определить неопределенности при ГДИС, заключающиеся в расчёте длительности исследования и оценке ФЕС и $P_{пл}$, которые суммируются с распределением ФЕС и $P_{пл}$, известные в скважине, где запланировано исследование. Для этой задачи также необходимо решать уравнение пьезопроводности.

1 ЦЕННОСТЬ ИНФОРМАЦИИ (VOI)

Метод VOI (Value of information) в нефтегазовой промышленности впервые введён в 1960 году Джексоном Грейсоном (2).

Ценность информации (VOI) – это разница между ожидаемой ценностью проекта с учетом и без учета полученной информации (Рис. 1.1). Оценка экономической ценности информации позволяет охарактеризовать экономическую выгоду от выполнения исследования, произвести оценку эффективности программы исследовательских работ, а также оценить достаточность исследований на основе дерева решений (Рис. 1.2).

Дерево решений – это графический метод анализа информации, который отображает процесс принятия управленческих решений в виде набора последовательных альтернативных действий и реализацией сценариев характеризующиеся наличием рисков и неопределенностей, комбинации которых, при заданных вероятностях, приводят к достижению поставленных целей.

Расчёт ценности проекта основан на суммировании различных вариантов исхода проекта, которые в свою очередь характеризуются вероятностью и NPV. NPV (чистая приведённая стоимость) - это сумма дисконтированных значений потока платежей, приведённых к сегодняшнему дню

В связи с глобальной тенденцией перехода на месторождения со сложным геологическим строением, характеризующим высокую степень неопределенности, подход на основе ценности информации является особенно актуальным. Расчет VOI позволяет оценить ценность единичного исследования, найти оптимальную программу и оценить ее достаточность. Кроме того, оценка ценности информации позволяет улучшить понимание рисков проекта и в перспективе составить оптимальную программу разработки.

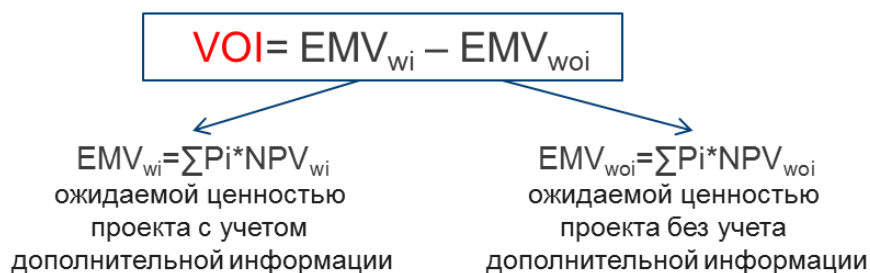


Рис. 1.1 Методика VOI

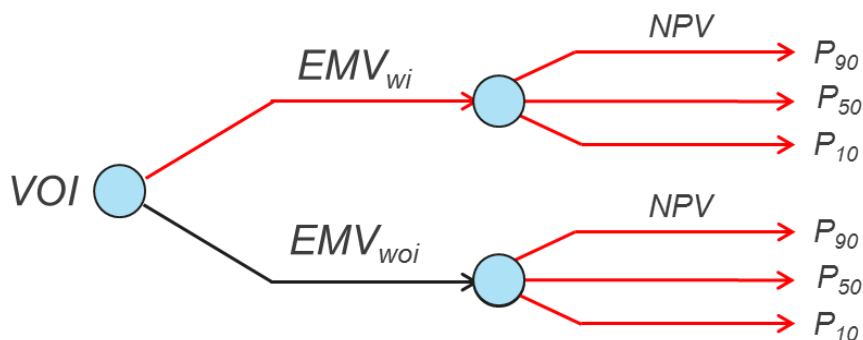


Рис. 1.2 Иллюстрация к расчёту VOI

В данной работе метод VOI применён для оценки необходимости проведения гидродинамических исследований с целью определения параметров пласта, которые используются при планировании бурения. Данными параметрами являются проницаемость и пластовое давление. От длительности исследования будет зависеть качество определяемых параметров. Длительность в свою очередь будет влиять на стоимость проведения гидродинамического исследования.

2 ОБЗОР ИМЕЮЩИХСЯ ДАННЫХ

В данной работе предложенная методика оценки необходимости проведения исследования ГДИС на стадии планирования бурения была применена на восточной части месторождения N (Рис. 2.1 Карта эффективной толщины пласта месторождения N).

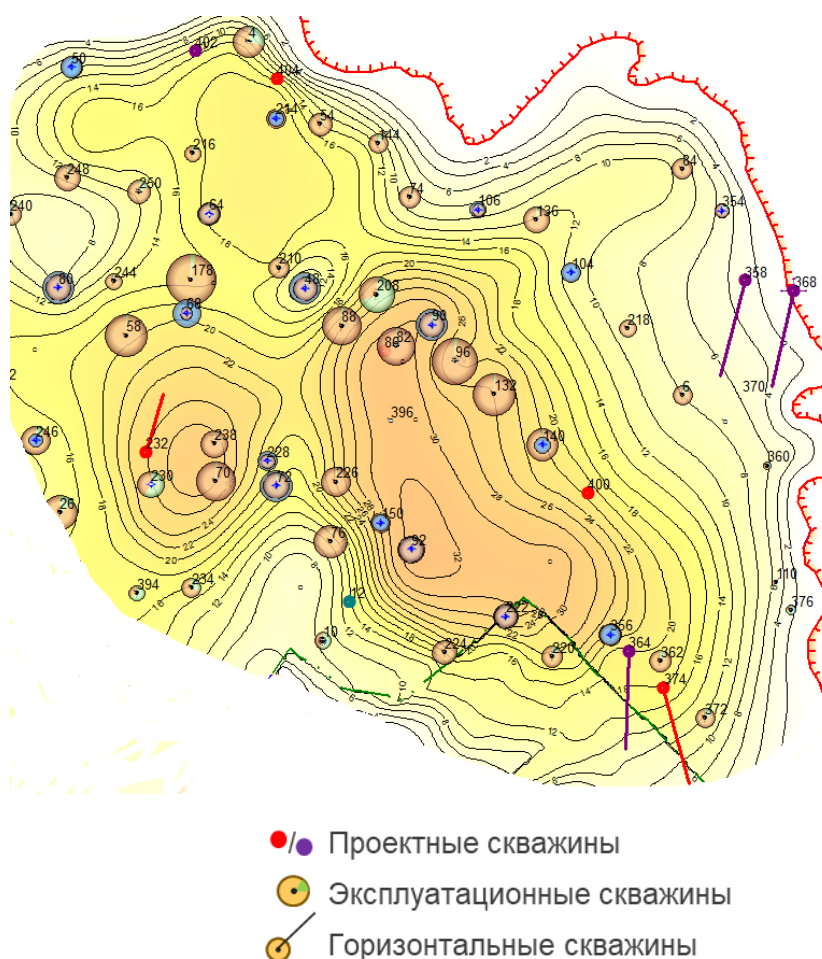


Рис. 2.1 Карта эффективной толщины пласта месторождения N

Месторождение N покрыто плотной сеткой гидродинамических исследований. При этом основная часть исследований была проведена более двух лет назад, что снижает актуальность о текущем пластовом давлении.

Пластовое давление ($P_{пл}$), параметр, который характеризует энергетическое состояние нефтегазоносных пластов – это давление, которое пластовые флюиды оказывают на вмещающие их породы. Пластовое давление образуется из гидростатического давления, избыточного давления

(архимедова сила), давления, которое возникло в результате изменения объёма порового пространства, и за счёт расширения\сжатия флюидов и изменения их массы. Различают понятия начальное пластовое давление и текущее пластовое давление. Начальное пластовое давление – исходный показатель, которым обладал пласт до вскрытия его скважинами. Текущее пластовое давление – динамический параметр, меняющийся в процессе разработки месторождения. Дебит скважины (q , объём жидкости (воды, нефти) или газа, поступающий в единицу времени), напрямую зависит от величины пластового давления, при этом чем выше $P_{пл}$, тем выше q . $P_{пл}$ – динамический параметр, по этой причине для эффективной разработки месторождения необходима информация о текущем пластовом давлении.

Проницаемость горных пород пласта - способность пород пласта пропускать жидкость и газ при перепаде давления. Чем выше значение проницаемости, тем выше дебит скважины.

Пластовое давление и произведение проницаемости на мощность пласта измеряются посредством проведения гидродинамических исследований. Зачастую длительность ГДИ и качество данных исследований недостаточны для точного определения значений этих параметров.. По данной причине была проведена оценка достоверности проведенных исследований.

На текущий момент не существует объективной системы для количественной оценки погрешностей результирующих параметров по ГДИ. Поэтому были выбраны критерии исходя из экспертных соображений по качеству проведенных исследований. Текущее пластовое давление, как уже отмечалось, динамический параметр, поэтому для $P_{пл}$ необходимо учитывать давность проведенного ГДИ. Так как мы не знаем распределение ошибок, то предполагаем равномерное распределение параметров kh и $P_{пл}$.

Для каждого исследования были введены диапазоны неопределенности с учётом достоверности ГДИ:

1) Оценка пластового давления, в зависимости от давности исследования и наличия соответствующих диагностических признаков:

- Высокая достоверность 10%
- Средняя достоверность 20%
- Низкая достоверность 30%

2) Оценка kh , в зависимости от длительности исследования и наличия соответствующих диагностических признаков:

- Высокая достоверность 10%
- Средняя достоверность 30%
- Низкая достоверность 50%

Под диагностическими признаками понимается наличие режимов течения (радиальный, линейный), по которым определяются свойства пласта.

Таким образом, были рассмотрены исследования ГДИ по 62 скважинам и оценены интервалы kh и $P_{пл}$, т.е. в каждой точке-скважине были получены равновероятностные распределения данных параметров (Рис. 2.2).

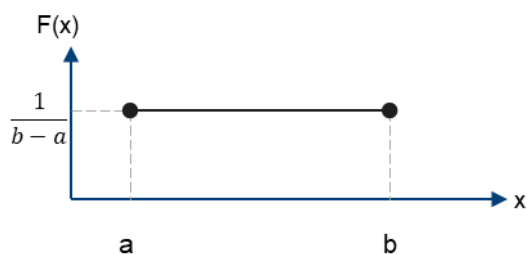


Рис. 2.2 Равновероятностное распределение

Полученные параметры далее были использованы для интерполяции значений в точку проектной скважины.

3 КРИГИНГ

Для описания/построения поведения некоего распределенного на заданной площади параметра используют имеющееся количество измерений изучаемого параметра Z в различных точках (X_i, Y_i) , число которых ограничено. Данные точки называются точками выборки (точками наблюдений). Задача пространственной интерполяции – получить (с минимально возможной погрешностью) значения изучаемой пространственной переменной Z в области, в которой отсутствуют исследования, на основе обработки и анализа имеющихся значений. Т.е. интерполировать из точек $Z(x_i)$ в точку $Z(x)$ (Рис. 3.1).

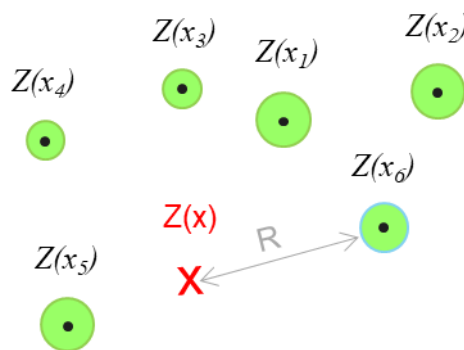


Рис. 3.1 Интерполяция в точку $Z(x)$

Для оценки значения параметра Z в области, где отсутствуют измерения, применяют различные методы пространственной интерполяции. Выделяют два основных подхода к интерполяции (3):

Детерминистический метод – основан напрямую на имеющихся значениях в окрестности изучаемой точки и на математических формулах, определяющие сглаженность результирующей поверхности.

Геостатистический метод - основывается на статистических методах, включающих анализ автокорреляции (статистических отношений между измеренными точками).

В данной работе был изучен и реализован геостатистический метод линейной регрессии, Кригинг.

3.1 Теоретическая основа

Основная формула для данного инструмента сводится к линейной регрессионной оценке (4):

$$Z^*(x) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x)[Z(x_i) - m(x_i)] \quad 3.1$$

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x)Z(x_i) \quad 3.2$$

$Z^*(x)$ – оценка случайной функции $Z(x)$, w_i – вес кригинга, $Z(x_i)$ – известные значения в других точках, n – количество измеряемых значений; значения $m(x)$ и $m(x_i)$ являются математическими ожиданиями (средними) пространственных переменных $Z(x)$ и $Z(x_i)$

Вес кригинга w_i зависит от выбранной модели вариограммы для измеряемых точек, от расстояния до местоположения исследуемой точки $Z(x)$ и от пространственных отношений между измеряемыми значениями вокруг исследуемой точки $Z(x)$. Необходимо определить веса, w_i , которые минимизируют дисперсию (5):

$$\sigma_E^2(x) = 2\gamma_R(x) = \text{var}\{Z^*(x) - Z(x)\} = E\{(Z^*(x) - Z(x))^2\} \quad 3.3$$

минимизируется при ограничении:

$$E\{Z^*(x) - Z(x)\} = 0 \quad 3.4$$

При геостохастическом моделировании известные геологические ограничения учитываются детерминировано в виде трендов ($m(x)$). Остаточное значение (случайная невязка) $R(x)$ определяется как разность случайной величины и детерминированного тренда.

$$R(x) = Z(x) - m(x) \quad 3.5$$

Компонента невязки $R(x)$ рассматривается как стационарная случайная функция с нулевым стационарным математическим ожиданием $m_R(x)$ и стационарной ковариацией $C_R(h)$ (5):

$$m_R(x) = E\{R(x)\} = 0 \quad 3.6$$

$$\text{Cov}\{R(x), R(x+h)\} = E\{R(x) * R(x+h)\} = C_R(h) \quad 3.7$$

Ковариация характеризует степень похожести данных — значение ковариации тем больше, чем более похожи данные (ближе значения).

Математическое ожидание пространственной переменной Z в точке x , будет равно значению тренда:

$$E\{Z(x)\} = m(x) \quad 3.8$$

Первое условие, которому удовлетворяют все модели кригинга — это несмещенность оценки (3.1) в точке x . Ошибки интерполяции должны иметь в каждой точке среднее, равное нулю:

$$R^*(x) = Z^*(x) - Z(x) \quad 3.9$$

$$E\{R^*(x)\} = 0 \quad 3.10$$

Таким образом, кригинг является наилучшим (в контексте минимума вариации оценки) линейным и несмещенным методом оценки распределения параметров. В процессе поиска минимума вариации (3.3) ключевую роль играет выбор модели вариограммы ($2\gamma_R(x)$) исходных данных, описанных ниже. В результате после нахождения весовых коэффициентов, при соблюдении всех перечисленных условий, удастся оценить и значение вариации, которое описывает точность кригинговой оценки (3.3).

Различают три вида кригинга в зависимости от модели тренда $m(x)$:

1. Простой кригинг — среднее значение $m(x)$ известно и постоянно;
2. Обыкновенный кригинг — значение среднего в области $m(x)$ неизвестно и постоянно;
3. Универсальный кригинг — значение среднего неизвестно и гладко меняется по области исследования. В настоящей работе для интерполяции параметров выбран универсальный кригинг.

Компонента тренда вычисляется как линейная комбинация известных функций $f_k(x)$ с коэффициентами $\alpha_k(x)$, которые вычисляются из системы уравнений универсального кригинга (6):

$$m(x) = \sum_{k=0}^K \alpha_k(x) f_k(x) \quad 3.11$$

Условие несмещенности (1.9):

$$E\{Z^*(x) - Z(x)\} = \sum_{i=1}^n w_i(x) m(x_i) - m(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) \sum_{k=0}^K \alpha_k(x) f_k(x) - \sum_{k=0}^K \alpha_k(x) f_k(x) = \sum_{k=0}^K \alpha_k(x) \left[\sum_{i=1}^n w_i(x) f_k(x) - f_k(x) \right] \quad 3.12$$

Получаем набор из $K+1$ дополнительных ограничений, но избавляемся от необходимости оценивать коэффициенты $\alpha_k(x)$,

$$\sum_{i=1}^n w_i(x) = 1 \quad 3.13$$

$$\sum_{i=1}^n w_i(x) f_k(x) = f_k(x) \quad k = 1, \dots, K \quad 3.14$$

Таким образом, оценка несмещенного кригинга будет являться несмещенной тогда и только тогда, когда будет выполняться 3.14.

Заменяя $Z^*(x)$ на соответствующую линейную комбинацию, а $Z(x)$ через (3.5) на тренд и остаток:

$$Z^*(x) - Z(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) (R(x_i) - m(x_i)) - (R(x) + m(x)) \quad 3.15$$

Таким образом,

$$Z^*(x) - Z(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) R(x_i) - R(x) + \{E[\sum_{i=1}^n w_i(x) Z(x_i)] - m(x)\} \quad 3.16$$

$$Z^*(x) - Z(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) R(x_i) - R(x) + E\{Z^*(x) - Z(x)\} \quad 3.17$$

Математическое ожидание, учитывая условие несмещенности, равно нулю (7):

$$Z^*(x) - Z(x) = \sum_{i=1}^n w_i(x) R(x_i) - R(x) \quad 3.18$$

По теореме (7) - дисперсия оценки будет равна:

$$\begin{aligned}\sigma^2(x) &= E \left\{ (Z^*(x) - Z(x))^2 \right\} = E \left\{ \left(\sum_{i=1}^n w_i(x) R(x_i) - R(x) \right)^2 \right\} = \\ &= 2 \sum_{i=1}^n w_i(x) \gamma_R(x, x_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i(x) w_j(x) \gamma_R(x_i, x_j) \quad 3.19\end{aligned}$$

$Z^*(x)$ является линейной несмещенной оценкой и пусть $\gamma_R(h)$ – полувариограмма ($\gamma_R(x)$) остатка $R(x)$.

Функция Лагранжа имеет вид (μ -множитель Лагранжа):

$$L(w_i, \mu_i) = \sigma^2(x) + 2\mu_0 \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) + 2 \sum_{l=1}^k \mu_l \left(\sum_{i=1}^n w_i f_l(x_i) - f_l(x) \right) \quad 3.20$$

Подставляя (3.19) в 3.20, получим:

$$\begin{aligned}L(w_i, \mu_i) &= 2 \sum_{i=1}^n w_i(x) \gamma_R(x, x_i) - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_i(x) w_j(x) \gamma_R(x_i, x_j) \\ &+ 2\mu_0 \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) + 2 \sum_{l=1}^k \mu_l \left(\sum_{i=1}^n w_i f_l(x_i) - f_l(x) \right) \quad 3.21\end{aligned}$$

Для того чтобы достичь минимума дисперсии, необходимо чтобы частные производные лагранжиана по его параметрам были равны нулю:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial w_i} &= 2\gamma_R(x, x_i) - 2 \sum_{j=1}^n w_j \gamma_R(x_i, x_j) + 2\mu_0 + 2 \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_i) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_0} &= 2 \left(\sum_{i=1}^n w_i - 1 \right) = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial \mu_l} &= 2 \left(\sum_{i=1}^n w_i f_l(x_i) - f_l(x) \right) = 0 \quad 3.22\end{aligned}$$

Таким образом, веса при которых достигается единственный минимум дисперсии, будут решением системы уравнений (3.23):

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n w_i \gamma_R(x_i, x_1) - \mu_0 - \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_1) = \gamma_R(x, x_1), \\ \sum_{i=1}^n w_i \gamma_R(x_i, x_2) - \mu_0 - \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_2) = \gamma_R(x, x_2), \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n w_i \gamma_R(x_i, x_n) - \mu_0 - \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_n) = \gamma_R(x, x_n), \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n w_i f_1(x_i) = f_1(x) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n w_i f_k(x_i) = f_k(x) \end{array} \right. \quad 3.23$$

В терминах ковариационной функции $\text{Cov}_R(x)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n w_i \text{Cov}_\gamma(x_i, x_1) + \mu_0 + \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_1) = \text{Cov}_\gamma(x, x_1), \\ \sum_{i=1}^n w_i \text{Cov}_\gamma(x_i, x_2) + \mu_0 + \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_2) = \text{Cov}_\gamma(x, x_2), \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n w_i \text{Cov}_\gamma(x_i, x_n) + \mu_0 + \sum_{l=1}^k \mu_l f_l(x_n) = \text{Cov}_\gamma(x, x_n), \\ \sum_{i=1}^n w_i = 1 \\ \sum_{i=1}^n w_i f_1(x_i) = f_1(x) \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n w_i f_k(x_i) = f_k(x) \end{array} \right. \quad 3.24$$

В систему уравнений входят значения вариограммы, т.е. требуются значения вариограммы для любых пространственных ориентаций. С этой

целью используют теоретическую модель вариограммы. Подбор модели — это важный ключ для перехода от пространственного описания к прогнозу неизвестных значений.

На практике наиболее часто применяются сферическая, экспоненциальная и гауссова модели (или их комбинации) (8).

1. Сферическая модель:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c, h > a, \\ c_0 + c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], h \leq a \end{cases} \quad 3.25$$

a — действительный радиус корреляции, который означает, что данные, находящиеся на расстоянии a и ближе, коррелированы, а находящиеся на расстоянии больше a — не коррелированы.

2. Экспоненциальная модель:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0, h = 0, \\ c_0 + (c - c_0) \left[1 - \exp\left(\frac{-3h}{a}\right) \right], h \neq 0 \end{cases} \quad 3.26$$

3. Гауссова модель:

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left[1 - \exp\left(\frac{-3h^2}{a^2}\right) \right] \end{cases} \quad 3.27$$

3.2 Реализация метода

В настоящей работе метод Kriging применён для интерполяции параметра проницаемости (k) и $P_{пл}$ из точек скважин, где известны данные значения W_i , в точку проектной скважины W' . При этом в точках W_i заданы равновероятностные распределения параметров (глава 1). По данной причине необходимо было интерполировать параметры в точку W' N -количество раз и в результате получить некое распределение значений k и $P_{пл}$ в точке W' .

Метод Kriging реализован с помощью языка программирования Python. Входными параметрами являются координаты скважин W_i и значения

k и $P_{пл}$. Выходными данными являются значения параметров в W' . Ниже приведён код реализующий метод интерполяции Kriging:

```

2 from myKr.gridGenerator import gridGenerator
3 from myKr.krImplementer import krImp
4 from myKr.krVisualization import krVisual
5 from myKr.krStatistic import krStat
6
7 gG = gridGenerator(leftAppend=0,
8                   rightAppend=0,
9                   upAppend=0,
10                  downAppend=0,
11                  xMin = 308142,
12                  yMin = 5783158,
13                  xMax = 311832,
14                  yMax = 5786894,
15                  fileXY='pointsXY.txt',
16                  gridStep=50)
17
18 kI = krImp(inputArray=gG.inputArray, gridx=gG.gridx, gridy=gG.gridy,
19           fileZ='pointsZ.txt')
20
21 kV = krVisual(inputArray=gG.inputArray, gridx=gG.gridx, gridy=gG.gridy,
22             gridTXT='grids/grid_2.txt')
23
24 kS = krStat(gridx=gG.gridx, gridy=gG.gridy)
25 kS.interpolateData(x=310246,y=5785488, printFile=True)

```

Рис. 3.2 Основной код, реализующий Kriging

Класс `gridGenerator` (Рис. 3.3)- генерирует сетку для выполнения расчета. Входными данными являются `leftAppend` - расширение сетки влево, `rightAppend` - расширение сетки вправо, `upAppend` - расширение сетки вверх, `downAppend` - расширение сетки вниз, `xMin` - минимальное значение координаты X, `yMin` - минимальное значение координаты Y, `xMax` - максимальное значение координаты X, `yMax` - максимальное значение координаты Y, `fileXY` - файл со входными данными, `gridStep` - шаг генерируемой сетки. Выходными данными являются `inputArray` - массив входных данных, `gridx` - сетка по X, `gridy` - сетка по Y, которые далее будут являться входными параметрами для класса `krImp`.

`krImp` (Рис. 3.4) - класс, реализующий вычисления Kriging. К входным данным добавляется `fileZ` - файл со значениями массива Z, который содержит значения проницаемости/ пластового давления в точках скважин W_i , интерполирующийся на площади заданной сеткой.

krVisual (Рис. 3.5) - класс, необходимый для построения карты.

krStat (Рис. 3.6)- класс, необходимый для получения значения в произвольной точки карт W'.

```

1 import numpy as np
2
3 class gridGenerator:
4     def __init__(self, leftAppend=-300,
5                  rightAppend=300,
6                  upAppend=300,
7                  downAppend=-300,
8                  gridStep=None,
9                  fileXY=None,
10                 xMin=None,
11                 yMin=None,
12                 xMax=None,
13                 yMax=None):
14         _dtype = {'names': ('X.coordinate', 'Y.coordinate'),
15                   'formats': ('f4', 'f4')}
16         x, y = np.loadtxt(fileXY, dtype=_dtype, delimiter=' ', unpack=True)
17         self.inputArray = np.array([x, y])
18         self.inputArray = self.inputArray.transpose()
19         if xMin == None or yMin == None or xMax == None or yMax == None:
20             self.xMin = min(self.inputArray[:, 0])
21             self.xMax = max(self.inputArray[:, 0])
22             self.yMin = min(self.inputArray[:, 1])
23             self.yMax = max(self.inputArray[:, 1])
24         else:
25             self.xMin = xMin
26             self.xMax = xMax
27             self.yMin = yMin
28             self.yMax = yMax
29
30         leftStop = self.xMin + leftAppend
31         rightStop = self.xMax + rightAppend
32         gridStep = gridStep or (abs(leftStop) + abs(rightStop))/10
33         self.gridx = np.arange(float(leftStop),
34                                rightStop,
35                                gridStep)
36         downStop = self.yMin + downAppend
37         upStop = self.yMax + upAppend
38         gridStep = gridStep or (abs(upStop) + abs(downStop))/10
39         self.gridy = np.arange(float(downStop),
40                                upStop,
41                                gridStep)
42

```

Рис. 3.3 Класс gridGenerator

```

1 import numpy as np
2 import pykrige.kriging_tools as kt
3 from pykrige.uk import UniversalKriging
4 from pykrige.ok import OrdinaryKriging
5
6 import itertools, os
7
8 import random
9
10 class krImp:
11     def __init__(self, fileZ,
12                  inputArray=None,
13                  gridx=None,
14                  gridy=None):
15         self.inputArray = inputArray
16         self.gridx = gridx
17         self.gridy = gridy
18
19         data = np.loadtxt(fileZ)
20
21         filtered_data = []
22         count = 0
23         while count < 1000:
24             t_data = []
25             l = random.randint(0, len(data[0])-1)
26             for j in range(len(data)):
27                 c = random.randint(0, len(data)-1)
28                 t_data.append(data[c][l])
29             if t_data not in filtered_data:
30                 filtered_data.append(t_data)
31                 count += 1
32
33         self.zArrays = [np.array(i) for i in filtered_data]
34
35         self.main()
36
37     def main(self):
38         if not os.path.exists('grids'):
39             os.mkdir('grids')
40
41         count = 0
42
43         for i in self.zArrays:
44             out_string = 'Z values: ' + ' '.join(str(e) for e in i)
45             UK = UniversalKriging(self.inputArray[:, 0],
46                                  self.inputArray[:, 1],
47                                  i,
48                                  variogram_model='power',
49                                  drift_terms=['regional_linear'])
50             i, ss = UK.execute('grid', self.gridx, self.gridy)
51             fileN = 'grids/grid_{}.txt'.format(count)
52             kt.write_asc_grid(self.gridx, self.gridy, i, filename=fileN)
53             file = open(fileN, 'r')
54             text = file.read()
55             file.close()
56             file = open(fileN, 'w')
57             file.write(text.replace('NODATA_VALUE', '-999.00', out_string))
58             file.close()
59             count += 1

```

Рис. 3.4 Класс krImp

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3
4 class krVisual:
5     def __init__(self, inputArray=None, gridx=None, gridy=None, gridTXT=None):
6         Z = np.loadtxt(gridTXT, skiprows=7)
7         fig, ax1 = plt.subplots()
8         pos = ax1.imshow(Z, interpolation='bilinear')
9         dots = ax1.plot(inputArray[:, 0], inputArray[:, 1], 'k^')
10        fig.colorbar(pos, ax=ax1)
11        plt.axis([min(gridx), max(gridx), min(gridy), max(gridy)])
12        plt.show()

```

Рис. 3.5 Класс krVisual

```

1 import numpy as np
2 from scipy import interpolate
3 import matplotlib.pyplot as plt
4
5 import os
6
7 class krStat:
8     def __init__(self, gridx=None, gridy=None, gridDIR=None):
9         self.gridx = gridx
10        self.gridy = gridy
11        self.data_dct = {}
12        self.gridDIR = gridDIR or 'grids'
13        self.takeAllData()
14
15    def takeAllData(self):
16        self.gridLst = os.listdir(os.getcwd() + '/' + self.gridDIR)
17        for i in self.gridLst:
18            self.data_dct.update({ i : np.loadtxt(self.gridDIR + '/' + i, skiprows=7 )})
19
20    def interpolateData(self, x=None, y=None, gridName=None, printHist=False, printFile=False):
21        tlst = []
22        if gridName == None:
23            for i in self.gridLst:
24                f = interpolate.interp2d(self.gridx, self.gridy, self.data_dct[i], kind='cubic')
25                tlst.append(f(x, y)[0])
26            if printHist:
27                fig, axs = plt.subplots(1, sharey=True, tight_layout=True)
28                axs.hist(tlst, bins=20)
29                plt.show()
30            else:
31                if printFile:
32                    with open('results.txt', 'w') as file:
33                        for i in tlst:
34                            file.write(str(i)+'\n')
35                else:
36                    print('Список интерполированных значений в точке ({}, {}):'.format(x, y))
37                    print(tlst)
38            else:
39                f = interpolate.interp2d(self.gridx, self.gridy, self.data_dct[gridName], kind='cubic')
40                print(f(x, y))
41
42
43

```

Рис. 3.6 Класс krStat

После Kriging получаем карту распределения параметров, на рис.3.7 показан пример распределения параметра kh , где треугольниками указаны скважин, в которых известны значения kh и из которых производится

интерполяция. В точке проектной скважины получено распределения kh и $P_{пл}$ (Рис. 3.8-3.9).

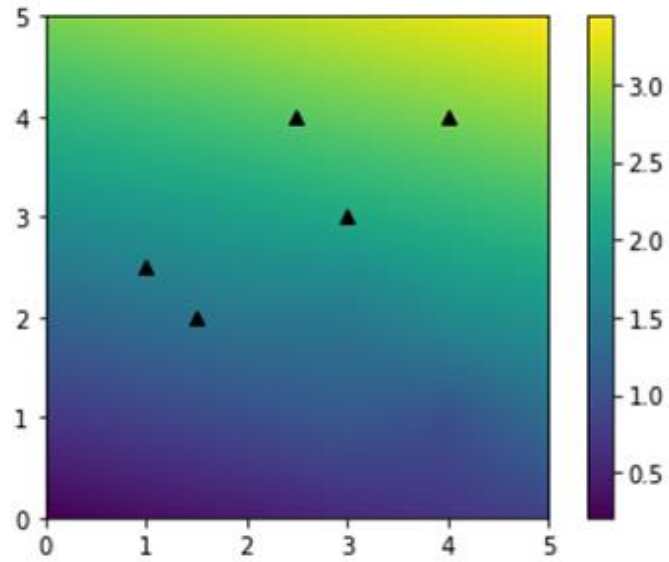


Рис. 3.7 Карта распределения kh после Kriging

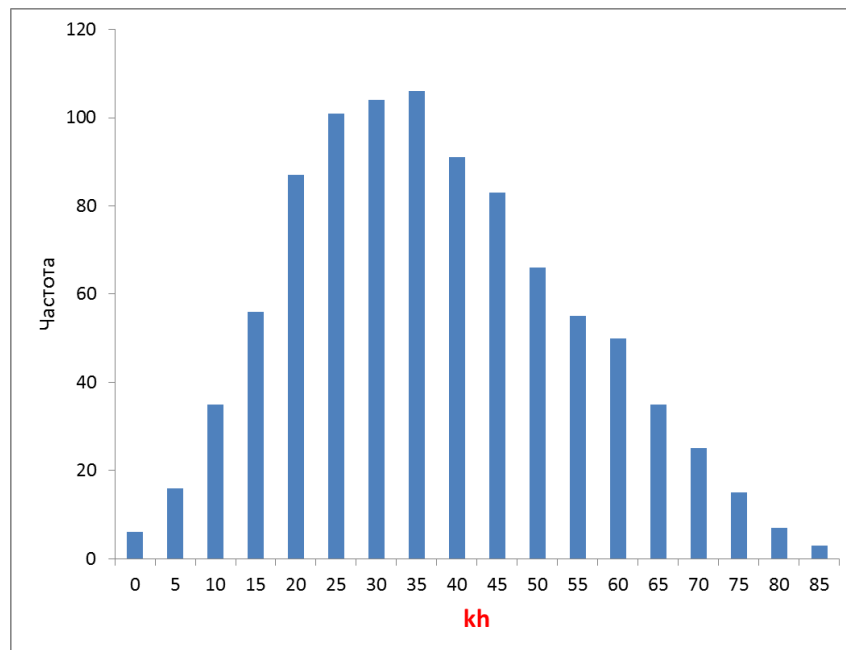


Рис. 3.8 Распределение kh в точке проектной скважины 400 до проведения исследования ГДИ

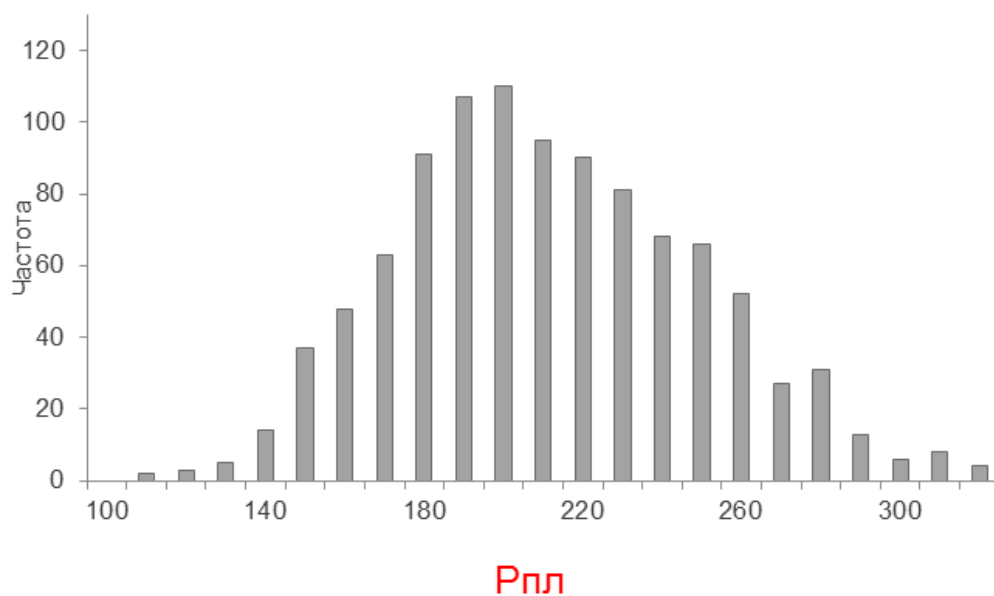


Рис. 3.9 Распределение $R_{пл}$ в точке проектной скважины 400 до проведения исследования ГДИ

Полученные распределения для проектных скважин далее в главе 5 используются для подсчёта добычи скважин на период в 25 лет и подсчёта ожидаемой ценности проекта (прибыли) без учета полученной информации (EMV_{woi}).

4 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ГДИС

Гидродинамические исследования скважин - устьевые и глубинные непрерывные и дискретные измерения во времени динамических параметров в скважине: давления в комплексе с расходом и температурой. Основой ГДИС являются нестационарные технологии, базирующиеся на изучении процессов формирования и релаксации поля давления в скважинах и пластах, связанных с закачкой или отбором флюида (9).

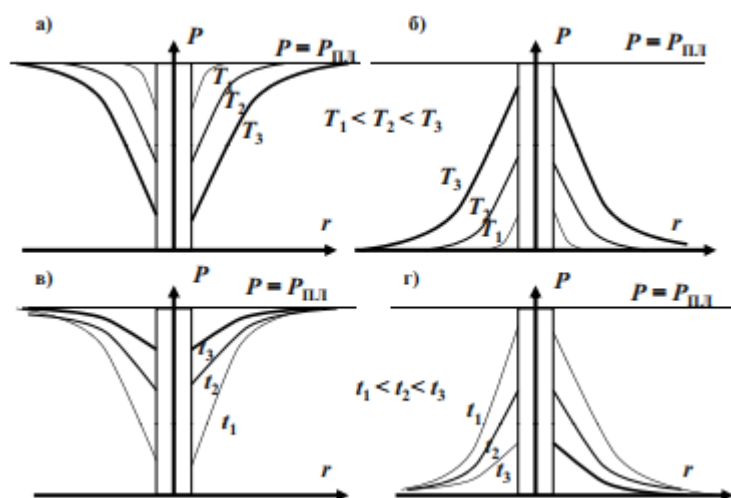


Рис. 4.1. а), б): формирование радиальной воронки депрессии после пуска добывающей и нагнетательной скважины; в), г): расформирование радиальной воронки депрессии после остановки добывающей и нагнетательной скважины. T — время, прошедшее после пуска скважины; t — время, прошедшее после остановки скважины (9)

Методы ГДИС, основанные на изучении неустановившихся процессов изменения забойного давления в возмущающих и реагирующих скважинах, тесно связаны с теорией упругого режима. Во время запуска скважины или её остановки возникает перераспределение забойного давления. При помощи электронных скважинных манометров можно записать повышение или понижение давления и построить график изменения забойного давления с течением времени. К примеру, при остановке скважины фиксируется рост забойного давления (Рис. 4.2). Для инженера более информативен будет

билогарифмический график: по оси ординат указывается $\ln \Delta P$, $\ln \Delta P' = \ln \left(\frac{\partial P}{\partial \ln \left(\frac{dt}{dt+tp} \right)} \right)$; по оси абсцисс указывается $\ln t$ (Рис. 4.3).

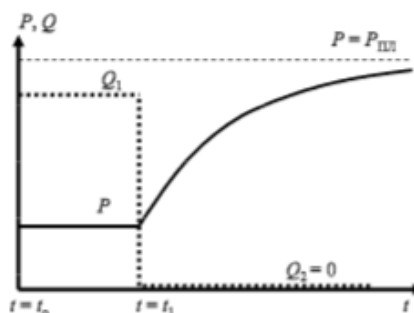


Рис. 4.2 Исследование скважины по технологии КВД (остановка добывающей скважины) (9)

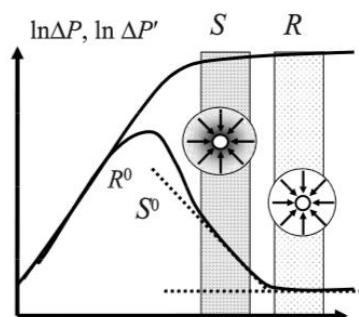


Рис. 4.3 Билогарифмический график КВД (9)

Очевидно, что коллекторские свойства пласта и призабойной зоны скважины влияют на форму графиков восстановления забойного давления, поэтому по форме КВД возможно определить коллекторские свойства пласта

В данной работе были изучены результаты исследований ГДИС для определения параметров проницаемости и пластового давления в точках скважин для интерполяции значений с помощью метода Kriging в точки проектных скважин. Кроме этого, было оценено качество исследований на основе наличия радиального режима (описанного ниже) и давности проведенного исследования экспертным методом. Интерполируемые значения, как указывалось выше, после были использованы для подсчёта EMV_{woi} .

Ниже описываются основы гидродинамических исследований, выводы решения уравнения пьезопроводности, которые далее использовались для расчёта неопределенности исследований ГДИС, что в свою очередь было использовано для подсчёта EMV_{wi} .

4.1 Основы теории фильтрации в пористой среде

Фильтрация жидкостей в пористой среде описывается с помощью дифференциальных уравнений в частных производных. С соответствующими граничными условиями они ведут к краевой задаче с начальными условиями или начально-краевой задаче, решив которую, можно найти математическое выражение для характеристик фильтрационного потока в пористой среде..

Движение жидкости в пористой среде описывается вектором скорости $\vec{v}(x, y, z, t)$ и плотностью жидкости $\rho(x, y, z, t)$.

Процессы в пористой среде опираются на фундаментальный физический закон сохранения массы (уравнение неразрывности), в соответствии с которым: разница между скоростью притока и оттока флюида через замкнутую поверхность, ограничивающую некоторый объем, равна скорости изменения массы в данном объеме (10).

Рассмотрим поток жидкости через произвольную неподвижную замкнутую поверхность Γ , расположенную в пористой среде (с пористостью ϕ), заполненной жидкостью (с вязкостью μ) (Рис. 4.4).

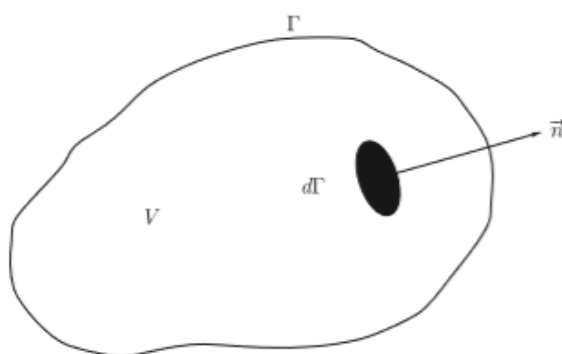


Рис. 4.4 Произвольная замкнутая поверхность Γ в пористой среде (11)

Скорость изменения массы в области Γ равна скорости поступления массы V через данную поверхность (11):

$$\frac{dM_g}{dt} = \frac{d}{dt} \iiint_V \rho \varphi dV = \iiint_V \frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) dV \quad 4.1$$

В случае дифференциального элемента поверхности $d\Gamma$, масса, поступающая в рассматриваемый объем пористой среды через этот элемент со скоростью $\rho \bar{v} * \bar{n}$ за промежуток времени Δt , равна $-\rho \bar{v} * \bar{n}$. Разница между массой, поступившей в рассматриваемый блок, и массой, покинувшей этот блок, за приращение времени Δt , равна:

$$\Delta M_g = -\Delta t \oint_{\Gamma} \rho \bar{v} * \bar{n} d\Gamma \quad 4.2$$

Скорость притока массы в объем блока V через поверхность Γ :

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dM_g}{\Delta t} = \frac{dM_g}{dt} = \oint_{\Gamma} \rho \bar{v} * \bar{n} d\Gamma \quad 4.3$$

Приравнивая правые части уравнений 4.3 и применяя теорему Остроградского – Гаусса к правой части уравнения 4.3, получим:

$$\iiint_V \left[\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \nabla \rho \bar{v} \right] dV = 0 \quad 4.4$$

Интеграл равен нулю тогда и только тогда, когда функция, стоящая под знаком интеграла, равна нулю, из этого утверждения получаем:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \varphi) + \nabla \rho \bar{v} = 0 \quad 4.5$$

Полученное уравнение 1.5 перепишем через давление, так как ГДИС не замеряют непосредственно скорость и плотность. Для этого необходимо использовать уравнение состояния и закон фильтрации Дарси.

Уравнение состояния, связывающее плотность и давление:

$$c = -\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial P}, \quad c = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial P}, \quad c\rho \frac{\partial P}{\partial t} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad 4.6$$

c – сжимаемость жидкости, знак « $-$ » отражает условие, что коэффициент сжимаемости должен быть положительным при сжатии флюида (давление растет, объем уменьшается). Сжимаемость пористой среды c_f и общая сжимаемость c_t :

$$c_f = \frac{1}{\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial P} \quad 4.7$$

$$c_t = c_f + c \quad 4.8$$

По закону Дарси вектор скорости фильтрации определяется через тензор проницаемости пласта k и вязкость флюида μ :

$$\bar{\vartheta} = -\frac{k}{\mu} \nabla P \quad 4.9$$

Рассмотрим первое слагаемое уравнения 4.5 и подставим 4.6:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) &= \varphi \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi c_p \frac{\partial P}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \varphi c_p \frac{\partial P}{\partial t} + \rho \frac{\partial \varphi}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial t} = \\ &= \varphi c_p \frac{\partial P}{\partial t} + \rho c_f \varphi \frac{\partial P}{\partial t} = \rho c_t \varphi \frac{\partial P}{\partial t} \quad 4.10 \end{aligned}$$

Перепишем уравнение $\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varphi) + \nabla \rho \bar{\vartheta} = 0$ 4.5 с учетом полученного выражения и подставим уравнение из закона Дарси:

$$c_t \varphi \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu} \nabla P \right), \quad \frac{1}{\chi} \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 P, \quad \chi = \frac{k}{c_t \varphi \mu} \quad 4.11$$

Где χ – коэффициент пьезопроводности, $c_t \varphi \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla \left(\frac{k}{\mu} \nabla P \right)$, $\frac{1}{\chi} \frac{\partial P}{\partial t} = \nabla^2 P$,

$\chi = \frac{k}{c_t \varphi \mu}$ 4.11 является уравнением пьезопроводности, основным уравнением, описывающим процессы происходящие при исследованиях ГДИС.

Уравнение пьезопроводности, описывающее фильтрацию в пористой среде в радиальных координатах, имеет вид:

$$\frac{1}{\chi} \frac{\partial \Delta P}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \Delta P}{\partial r} \right) \quad 4.12$$

$\Delta P = P_i - P$, P_i – начальное пластовое давление.

В целом, уравнение пьезопроводности, используемое в большинстве аналитических моделей, представляет собой выражение радиальной формулы. Опорным пунктом такого радиального решения служит добывающая или нагнетательная скважина. Эта система координат хорошо

подходит для моделирования радиального потока в скважину и из нее. Далее мы будем придерживаться радиальных координат

4.2 Решение уравнения пьезопроводности

Рассмотрим движение флюида в однородном бесконечном коллекторе, начиная с начального однородного давления P_i , создаваемого вертикальной скважиной.

В начальный момент 0, в соответствии с началом цикла эксплуатации, у коллектора было начальное равномерное давление P_i :

$$\Delta P(r, t = 0) = 0, P(r, t = 0) = P_i \quad 4.13$$

Рассмотрим простейшее граничное условие, когда граница отсутствует, т.е. коллектор имеет бесконечную протяженность (контур):

$$\Delta P(r \rightarrow \infty, t) = 0, P(r \rightarrow \infty, t) = P_i \quad 4.14$$

Граничное условие на скважине зависит от условий на поверхности ствола скважины ($r = r_w$). Рассмотрим вертикальную скважину, радиусом r_w , с полным вскрытием однородного коллектора проницаемости k и мощности h , добывающей малосжимаемую жидкость вязкостью μ , с дебитом q при стандартных условиях, и соответственно с подземным дебитом $q_{sf} = q \cdot B$ (где B – объемный коэффициент пласта коллектора):

$$\left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right)_{r=r_w} = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \quad 4.15$$

Удобной моделью состояния скважины является линейный источник, предельный случай скважины нулевого радиуса: $\lim_{r \rightarrow 0} \left(r \frac{\partial P}{\partial r} \right) = \frac{qB\mu}{2\pi kh}$

Задача упрощается путем ввода безразмерных переменных, которые интегрируют все прочие параметры и заканчиваются уникальным набором уравнений, что мы будем решать аналитическим методом раз и навсегда. Смысл безразмерных величин заключается в исключении из уравнения пьезопроводности параметров пласта с целью нахождения общего решения,

из которого, переходя на размерные переменные, получить решение для конкретного пласта и найти его пьезопроводность и проводимость (10):

$$r_D = \frac{r}{r_w} \quad 4.16$$

$$t_D = \frac{0,00036kt}{\phi\mu c_t r_w^2} \quad 4.17$$

$$P_D = \frac{2\pi kh}{qB\mu} \Delta P \quad 4.18$$

Введя безразмерные члены, получаем безразмерную задачу:

$$\frac{\partial P_D}{\partial t_D} = \frac{1}{r_D} \left[\frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_D}{\partial r_D} \right) \right] \quad 4.19$$

$$P_D(r_D, t_D = 0) = 0 \quad 4.20$$

$$P_D(r_D \rightarrow \infty, t_D) = 0 \quad 4.21$$

$$\lim_{r_D \rightarrow 0} \left(r_D \frac{\partial P_D}{\partial r_D} \right) = -1 \quad 4.22$$

При решении дифференциальных уравнений часто применяются интегральные преобразования. При решении уравнения пьезопроводности удобно применять особую форму линейных интегральных преобразований, которые называются преобразованием Лапласа. Применим к уравнению 4.19

$$\frac{\partial P_D}{\partial t_D} = \frac{1}{r_D} \left[\frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial P_D}{\partial r_D} \right) \right] \quad 4.19 \text{ преобразования Лапласа и получим:}$$

$$s\overline{P_D} = \frac{1}{r_D} \left[\frac{\partial}{\partial r_D} \left(r_D \frac{\partial \overline{P_D}}{\partial r_D} \right) \right] \quad 4.23$$

Трансформанта Лапласа:

$$\overline{P_D}(s, r_D) = \int_{t_D}^{\infty} P_D(t_D, r_D) \exp(-st_D) dt_D \quad 4.24$$

s — число, действительная часть которого положительна и которое достаточно велико, чтобы существовал интеграл, функция с чертой является изображением (образом) функции или результатом преобразования Лапласа подынтегральной функции (называемой оригиналом (прообразом)).

Уравнение 4.23 является модифицированным уравнением Бесселя нулевого порядка, решение которого можно записать следующим образом:

$$\overline{P}_D(s, r_D) = A(s)I_0(r_D\sqrt{s}) + B(s)K_0(r_D\sqrt{s}) \quad 4.25$$

I_0 и K_0 - модифицированные функции Бесселя нулевого порядка. Значения постоянных величин A и B в уравнении определяются из граничных условий. Из внешнего граничного условия $A(s)=0$, $B(s)=\frac{1}{s}$. Получаем изображение решения для линейного источника в виде:

$$\overline{P}_D(s, r_D) = \frac{1}{s} K_0(r_D\sqrt{s}) \quad 4.26$$

Обратное преобразование полученного уравнения можно выполнить с помощью таблицы преобразований Лапласа (из таблиц в работах (12) и (13)):

$$L^{-1}\left(K_0(r_D\sqrt{s})\right) = \frac{1}{2t} \exp\left(-\frac{k^2}{4t}\right)$$

В итоге, получаем решение для линейного источника в безразмерном виде:

$$P_D(t_D, r_D) = -Ei\left(-\frac{r_D^2}{4t_D}\right), Ei(x) = -\int_{-x}^{\infty} \frac{e^{-y}}{y} dy \quad 4.27$$

Где $Ei(x)$ -интегральная показательная функция. Таким образом, переходя на размерные величины:

$$\Delta P(t, r) = -\frac{qB\mu}{2\pi kh} Ei\left(-\frac{r^2}{4 * 0.00036\chi t}\right) \quad 4.28$$

Таким образом, получили решение, в любой точке и в любое время, для скважины линейного источника, эксплуатирующей однородный бесконечный коллектор. Полученное решение уравнения пьезопроводности показывает - перераспределение давления мгновенно распространяется по всему пласту. С другой стороны, существует какое-то расстояние от скважины r_{inv} , на котором изменение давления столь мало, что им можно пренебречь.

Радиус исследования r_{inv} , определяет размер области вокруг скважины, свойства которой влияют на результаты ГДИС. Рассмотрим поле давления в бесконечном пласте во время пуска в работу скважины на основании решения уравнения пьезопроводности (а), б): формирование радиальной воронки депрессии после пуска добывающей и нагнетательной скважины; в), г): расформирование радиальной воронки депрессии после остановки добывающей и нагнетательной скважины. T — время, прошедшее после пуска скважины; t — время, прошедшее после остановки скважины). В начальный момент времени $T_1=0$ давление в пласте одинаковое и равно текущему пластовому давлению, спустя время T_2 , вокруг скважины образуется воронка депрессии, которая характеризует неустановившийся режим течения. По мере увеличения времени депрессия будет распространяться на большее расстояние пока не достигнет границы ($r_{inv}=r_w + \sqrt{\chi t}$). При остановки скважины, картина будет выглядеть иначе, воронка депрессии будет уменьшаться пока не достигнет пластового давления и не стабилизируется.

Наиболее важным режимом течения для исследований ГДИС является радиальный режим течения, при котором линии тока направлены к круговому цилиндру в виде скважины (

Рис. 4.5).

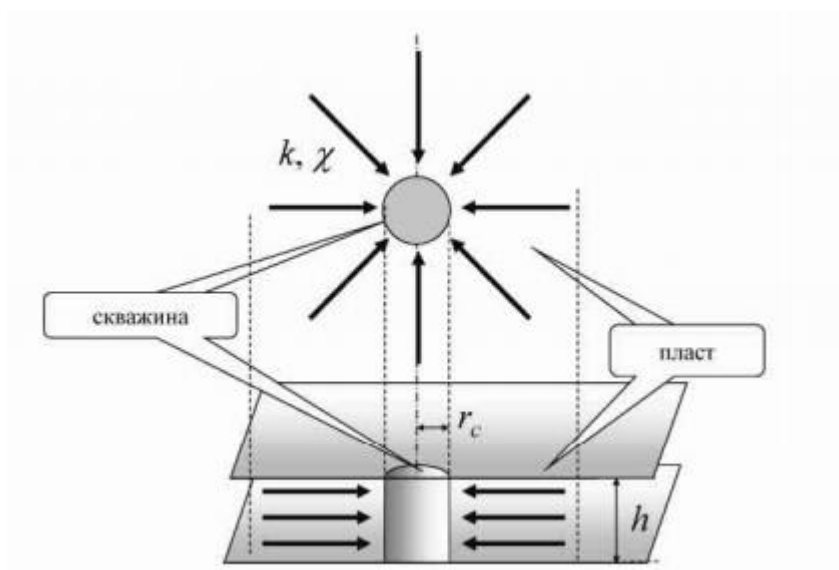


Рис. 4.5 Линий тока при радиальной фильтрации для вертикальной скважины (9)

Существует интервал времени, в течение которого решение линейного источника достигает радиального режима течения, на билогарифмическом графике (Рис. 4.3) это наблюдается в стабилизации производной давления. При этом проницаемость вычисляется по формуле:

$$kh = qB\mu * \frac{0.5}{2\pi\Delta P_{\text{стаб}}} \quad 4.29$$

1) Вертикальная скважина в цилиндрическом пласте

При решении уравнения пьезопроводности для вертикальной скважины в цилиндрическом пласте поменяется граничное условие на границе цилиндра $r_e \Delta P(r \rightarrow \infty, t) = 0, P(r \rightarrow \infty, t) = P_i$ 4.144.14:

$$\left(\frac{\partial \Delta P}{\partial r}\right)_{r=r_e} = 0 \quad 4.30$$

Решая уравнение пьезопроводности также как и для бесконечного пласта, получим изображение изменения давления:

$$\begin{aligned} \overline{\Delta P}(s) = \frac{qB\mu}{2\pi kh} * \\ * \frac{I_0\left(r\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right)K_1\left(r_e\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right) + I_1\left(r_e\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right)K_0\left(r\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right)}{r_w\sqrt{\frac{s}{\chi}}s \left[I_1\left(r_e\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right)K_1\left(r_w\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right) - I_1\left(r_w\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right)K_1\left(r_e\sqrt{\frac{s}{\chi}}\right) \right]} \end{aligned} \quad 4.31$$

Аналитическое преобразование уравнения имеет следующий вид (14):

$$\begin{aligned} \Delta P(t, r) = \frac{qB\mu}{2\pi kh} \left\{ \frac{2}{r_e^2 - r_w^2} \left(\chi t - \frac{r^2}{4} \right) - \frac{r_e^2}{r_e^2 - r_w^2} \ln \frac{r}{r_w} - \frac{1}{(4r_e^2 - r_w^2)^2} * \right. \\ * \left(3r_e^4 - 4r_e^4 \ln \frac{r_e}{r_w} - 2r_e^2 - 1 \right) + \\ \left. + \pi \sum_{n=1}^{\infty} \frac{J_1^2\left(\beta_n \frac{r_e}{r_w}\right) \left[J_1(\beta_n) Y_0\left(\beta_n \frac{r}{r_w}\right) - Y_1(\beta_n) J_0\left(\beta_n \frac{r}{r_w}\right) \right]}{\beta_n \left[J_1^2\left(\beta_n \frac{r_e}{r_w}\right) - J_1^2(\beta_n) \right]} \exp\left(-\beta_n^2 \frac{\chi t}{r_w^2}\right) \right\} \end{aligned} \quad 4.32$$

β_1, β_2 и т.д. – решения уравнений:

$$Y_1(\beta_n)J_1\left(\beta_n \frac{r_e}{r_w}\right) - J_1(\beta_n)Y_1\left(\beta_n \frac{r_e}{r_w}\right) = 0 \quad 4.33$$

К полученному решению, невозможно подобрать обратное преобразование Лапласа в виде простой аналитической функции с помощью табличных значений (13), но можно выполнить его численно. Для задач нестационарной фильтрации применяется алгоритм численного обращения, основанный на стохастических подходах (15), который предполагает, что можно рассчитать приближенное значение оригинала $p_a(T)$ по изображению $p(s)$ в момент времени $t = T$:

$$p_a(T) = \frac{\ln 2}{T} \sum_{i=1}^N V_i \bar{p}(s)_{s=1 \frac{\ln 2}{T}} \quad 4.34$$

$$V_i = (-1)^{\left(\frac{N}{2}\right)+i} \sum_{k=\frac{(i+1)}{2}}^{\min\left(i, \frac{N}{2}\right)} \frac{k^{\frac{N}{2}} (2k)!}{\left[\left(\frac{N}{2}\right) - k\right]! k! (k-1)! (i-k)! (2k-i)!} \quad 4.35$$

5 ЗАДАЧА О НЕСТАЦИОНАРНОМ ПРИТОКЕ К СКВАЖИНЕ

5.1 Приток к вертикальной скважине с трещиной ГРП

Выше были рассмотрены простые случаи для вертикальной скважины. Для скважин со сложной геометрией, например для наклонных скважин, вертикальных скважин с неполным вскрытием пласта, для скважин с ГРП и горизонтальных скважин, используется метод источников.

Источник — это точка, линия, поверхность или объем, из которых жидкость отбирается из пласта (или закачивается в пласт). Физически этот источник соответствует скважине бесконечно малого диаметра, из которой мгновенно отбирается конечное количество жидкости.

Функция Грина ($G(M, M', \tau - t)$) для неустановившегося потока в пористой среде определяется как давление в точке $M(x, y, z)$ в момент времени t , обусловленное мгновенным точечным источником единичной интенсивности, созданным в точке $M'(x', y', z')$ в момент времени $\tau < t$. Функция Грина должна удовлетворять уравнению пьезопроводности:

$$\frac{\partial G}{\partial t} = \chi \nabla^2 G \quad 5.1$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} = \chi \nabla^2 P \quad 5.2$$

$$\int_D \nabla^2 f(M) dM = \int_\Gamma \frac{\partial f}{\partial n} d\Gamma \quad 5.3$$

Учитывая (4.43), применяя теорему Грина (4.44) и используя свойства функции Грина (16) получим:

$$\Delta P(M, t) = \frac{1}{\varphi c} \int_0^t \int_{\Gamma_w} \tilde{q}(M'_w, \tau) G(M, M'_w, t - \tau) dM'_w d\tau =$$

$$\frac{1}{\varphi c} \int_0^t \tilde{q}(\tau) S(M, M'_w, t - \tau) d\tau \quad 5.4$$

$$S(M, M'_w, t - \tau) = \int_{\Gamma_w} G(M, M'_w, t - \tau) dM'_w \quad 5.5$$

Γ_w – поверхность ствола скважины, $\tilde{q} = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial P}{\partial n}$ – объём флюида, проходящий через точку на поверхности внутренней границы M'_w на поверхности внутренней границы Γ_w . Интегрирование в правой части уравнения (4.46) представляет собой распределение мгновенных точечных источников по длине, площади и объёму источника (скважины), а S обозначает функцию соответствующего мгновенного источника. Для различных вариантов конфигураций системы «пласт-источник» существуют табличные базовые функции мгновенных источников (11).

В настоящее время практически на всех добывающих скважинах проведен метод интенсификации работы скважин – гидравлический разрыв пласта (ГРП). Метод заключается в создании высокопроводимой трещины в целевом пласте для обеспечения притока добываемого флюида к забою скважины.

Рассмотрим вертикальную скважину с трещиной ГРП. Вертикальная скважина полностью вскрывает пласт толщиной h , пласт снизу и сверху ограничен непроницаемыми горизонтальными границами. Вертикальная трещина ГРП расположена симметрично относительно вертикального ствола скважины, полудлина трещины составляет x_f , ширина трещины w_f ($w_f \ll x_f$), проницаемость внутри трещины k_f , индекс «f» обозначает трещину ГРП. В латеральном направлении пласт бесконечный (Рис. 4.8 - 4.9). Течение к трещине будет двумерным.

Для решения данной задачи необходимо рассмотреть два вида течения: 1) течение в трещине и 2) течение в пласте тс трещиной.

1) Учитывая безразмерные переменные (4.47-4.50), запишем уравнение пьезопроводности (4.51) и граничные условия (4.52-4.53):

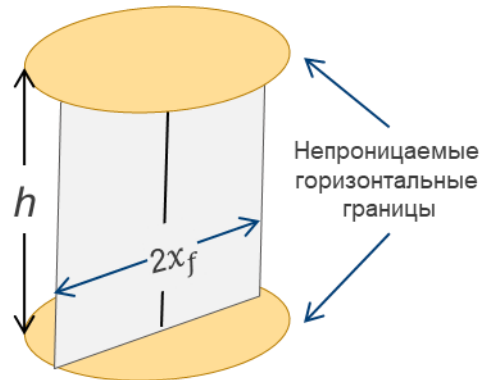


Рис. 5.1 Вертикальная трещина (вид сбоку)

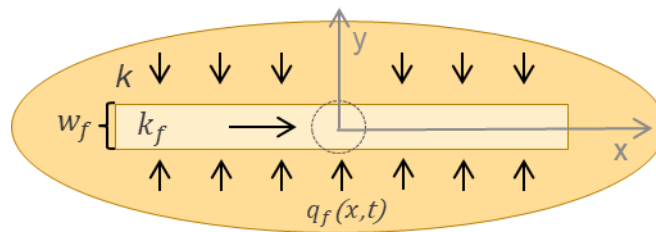


Рис. 5.2 Течение флюида к вертикальной трещине (вид сверху)

$$p_{fD}(x_D, t_D) = \frac{2\pi k h (p_i - p_f(x, t))}{q_w \mu} \quad 5.6$$

$$t_D = \frac{kt}{\phi \mu c_t x_f^2} \quad 5.7$$

$$x_D = \frac{x}{x_f} \quad 5.8$$

$$q_{fD}(x', \tau) = \frac{2q_f(x', \tau)}{q_w} x_f \quad 5.9$$

$$\frac{d^2 p_{fD}(x_D)}{dx_D^2} = \frac{\pi}{F_{CD}} q_{fD}(x_D) \quad 5.10$$

$$\frac{dp_{fD}}{dx_D} \Big|_{x_D=0} = \frac{\pi}{F_{CD}} \quad 5.11$$

$$\frac{dp_{fD}}{dx_D} \Big|_{x_D=1} = 0 \quad 5.12$$

Таким образом, перепад давления между забоем скважины и точкой трещины с координатой x_D :

$$p_{wD} - p_{fD}(x_D) = \frac{\pi}{F_{CD}} \left[x_D - \int_0^{x_D} \int_0^{x'} q_{fD}(x'') dx'' dx' \right] \quad 5.13$$

2) Приток флюида из пласта в трещину рассматривается как наличие распределенного нестационарного источника флюида $q_f(x,t)$ внутри трещины. В соответствии с методом источников, рассмотренным выше, безразмерное давление в любой точке пласта:

$$p_D(t_D, x_D - x_{wD}, y_D - y_{wD}) = \int_0^{t_D} \int_{-1}^1 q_{fD}(\tau, x' - x_{wD}) G(\tau, x', x_D - x_{wD}, y_D - y_{wD}) dx' d\tau \quad 5.14$$

(x_{wD}, y_{wD}) - безразмерные координаты забоя скважины в плоскости $xу$, ось x направлена параллельно трещине.

Давление в пласте и трещине должно быть непрерывным:

$$p_{fD}(t_D, x_D) = p_D(t_D, x_D, 0) \quad 5.15$$

Следовательно, уравнение 4.54 принимает вид:

$$\begin{aligned} p_{wD} - \int_0^{t_D} \int_{-1}^1 q_{fD}(\tau, x') G(\tau, x', x_D, 0) dx' d\tau \\ = \frac{\pi}{F_{CD}} \left[x_D - \int_0^{x_D} \int_0^{x'} q_{fD}(t_D, x'') dx'' dx' \right] \quad 5.16 \end{aligned}$$

Применяем преобразование Лапласа:

$$\begin{aligned} \bar{p}_{wD}(s) - \int_{-1}^1 \bar{q}_{fD}(s, x') \bar{G}(s, x', x_D, 0) dx' = \frac{\pi}{F_{CD}} \left[\frac{x_D}{s} - \right. \\ \left. \int_0^{x_D} \int_0^{x'} \bar{q}_{fD}(s, x'') dx'' dx' \right] \quad 5.17 \end{aligned}$$

$$\int_{-1}^1 \bar{q}_{fD}(s, x') dx' = \frac{1}{s} \quad 5.18$$

Получили систему уравнений, решение которых производится путём разбиения трещины на $2n$ сегментов и записи системы в дискретном виде для каждого сегмента (Рис. 5.3)

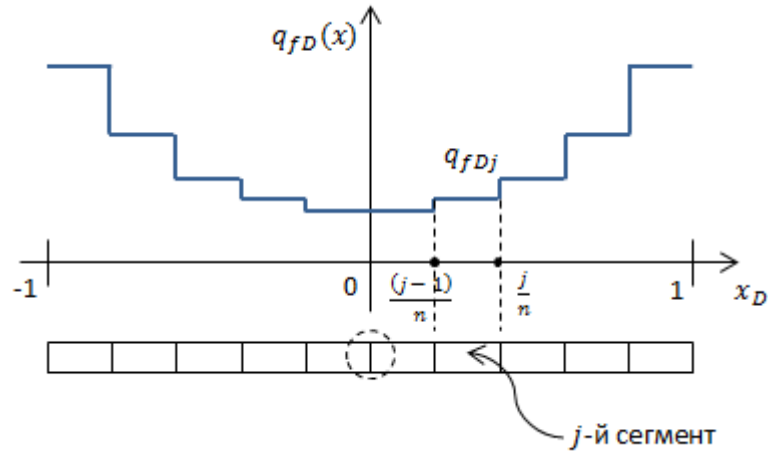


Рис. 5.3 Схема разбиения трещины на сегменты

$$\begin{aligned} \bar{P}_{wD}(s) - \sum_{i=1}^n \bar{q}_{fDi} \left\{ \int_{dx_D(i-1)}^{dx_D i} \bar{G}\left(s, x', dx\left(j - \frac{1}{2}\right), 0\right) dx' \right. \\ \left. + \int_{dx_D(-i)}^{dx_D(-i+1)} \bar{G}\left(s, x', dx\left(j - \frac{1}{2}\right), 0\right) dx' \right\} \\ + \frac{\pi}{F_{CD}} \left[\frac{dx_D \cdot j}{s} - (dx_D)^2 \sum_{i=1}^j \sum_{k=1}^i \bar{q}_{fDk} \right] \quad 5.19 \end{aligned}$$

$$dx_D \cdot \sum_{i=1}^n \bar{q}_{fDi} = \frac{1}{2s} \quad 5.20$$

Изображение давления в любой точке пласта:

$$\begin{aligned} \bar{p}_D(s, x_D, y_D) = \sum_{i=1}^n \bar{q}_{fDi} \left\{ \int_{dx_D(i-1)}^{dx_D i} \bar{G}(s, x', x_D, y_D) dx' + \right. \\ \left. \int_{dx_D(-i)}^{dx_D(-i+1)} \bar{G}(s, x', x_D, y_D) dx' \right\} \quad 5.21 \end{aligned}$$

Где \bar{q}_{fDi} – решение системы уравнений 4.60-4.61

5.2 Приток к горизонтальной скважине с МГРП

Данную задачу схематично можно представить, как соединенные общим горизонтальным стволом трещины ГРП, при этом ствол скважины пересекает каждую трещину в центре трещины (x_{wDj}, y_{wDj}) :

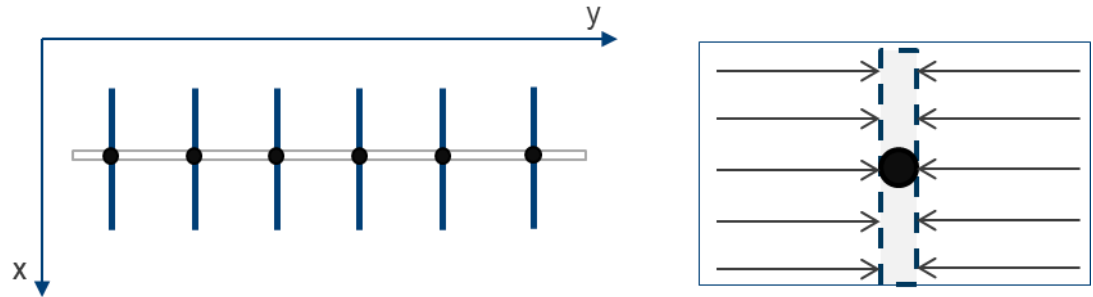


Рис. 5.4 Схематическое изображение ГС с МГРП

Все трещины имеют равную полудлину x_f и безразмерную проводимость F_{CD} . Поток внутри трещины одномерный. Тогда поток к горизонтальному стволу с n трещинами ГРП будет равен сумме дебитов от каждой трещины:

$$Q = \sum_{j=1}^n Q_j(t) = \text{const}$$

Введём безразмерное давление в точке пересечения j трещины с ГС - p_{wDj} , безразмерный дебит - $q_{Dj} = \frac{Q_j}{Q}$.

Горизонтальный ствол имеет бесконечную проводимость:

$$p_{wDj} = p_{wD}, \quad j = 1..n$$

Пусть $p(\tau)_{Djk} \equiv p_D(\tau, x_{wDk}, y_{wDk}, x_{wDj}, y_{wDj})$ – возмущение давления, создаваемое k трещиной в месте пересечения j трещины со стволом ГС, тогда по принципу суперпозиции:

$$p_{wD}(t_D) = \sum_{j=1}^n \int_0^{t_D} q_{Dj} \cdot p'_{Djk}(t_D - \tau) d\tau$$

5.22

Суммарный дебит всех трещин фиксирован, тогда: $\sum_{j=1}^n q_{Dj} = 1$ и с применением преобразования Лапласа - $\sum_{j=1}^n \tilde{q}_{Dj} = \frac{1}{s}$ 5.23

$$\text{Преобразование Лапласа для 3.63} \quad \bar{p}_{wDj} = \sum_{k=1}^n s \bar{q}_{Dj} \bar{p}_{Djk} \quad 5.24$$

$$\bar{p}_{Djk} = \int_{x_{wDk-1}}^{x_{wDk+1}} \bar{q}_{fDi}(s, |x_{wDk} - x'|) \bar{G}(s, x_{wDk} - x', x_{wDj}, y_{wDk}, y_{wDj}) dx' \quad 5.25$$

$$\bar{p}_{Djk} = \sum_{i=1}^n \bar{q}_{fDi} \left\{ \int_{dx_D(i-1)}^{dx_D \cdot i} \bar{G}(s, x_{wDk} - x', x_{wDj}, y_{wDk}, y_{wDj}) dx' + \int_{-i \cdot dx_D}^{-(i-1) \cdot dx_D} \bar{G}(s, x_{wDk} - x', x_{wDj}, y_{wDk}, y_{wDj}) dx' \right\} \quad 5.26$$

При этом мощность источников $\bar{q}_{fDi}(s, |x_{wDk} - x'|)$ вычисляется из 4.60-4.61. $dx_D = \frac{1}{n}$ – безразмерная длина сегментов, \bar{q}_{fDi} – безразмерная скорость стока через i элемент.

Система уравнений 4.64-4.67 записывается в виде:

$$A\bar{x} = \bar{b} \quad 5.27$$

$$\bar{x} = \begin{pmatrix} \bar{p}_{wD} \\ \bar{q}_{D1} \\ \vdots \\ \bar{q}_{Dn} \end{pmatrix} \quad 5.28$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -s \cdot \bar{p}_{D11} & \cdots & -s \cdot \bar{p}_{D1n} \\ & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & -s \cdot \bar{p}_{Dn1} & \cdots & -s \cdot \bar{p}_{Dnn} \\ & 0 & 1 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad 5.29$$

$$\bar{b} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1/s \end{pmatrix} \quad 5.30$$

Для расчета матричных элементов \bar{p}_{Djk} нужна информация о мощности стоков в каждой из n трещин. Если при этом каждая трещина разбита на $2m$ сегментов (рис.4.10), то система (4.70) должна содержать $(1 + 2m \times n)$ уравнений относительно неизвестных $\bar{p}_{wD}, \bar{q}_{fD11}, \dots, \bar{q}_{fD(2m)1}, \dots, \bar{q}_{fD1n}, \dots, \bar{q}_{fD(2m)n}$, где в \bar{q}_{fDij} – поток через i -й сегмент в j -й трещине. В соответствии с упрощенным подходом:

$$\forall j \in 1 \dots n, \forall k = 1 \dots m : \bar{q}_{fDjk} = \bar{q}_{Dj} \cdot \bar{q}_{fDk}$$

где j – номер трещины, а \bar{q}_{Dj} определено в (4.69). Т.е. считается, что распределения мощности стоков в трещинах подобны друг другу и симметричны относительно центров трещин. Элементы матрицы A в (4.70) получают по формуле (3.67):


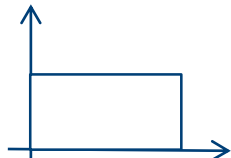
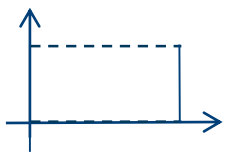
$$\tilde{p}_{Djk} = \sum_{i=1}^n \tilde{q}_{fDi} \left\{ \int_{dx_D(i-1)}^{dx_D \cdot i} \tilde{G}(s, x_{wDk} \pm x', x_{wDj}, y_{wDk}, y_{wDj}) dx' \right\}$$

где функция $\tilde{G}(\dots)$ определяется по формулам (рассмотрены ниже) в зависимости от типа зоны дренирования.

Для решения систем уравнения используется представление матрицы в виде произведения двух матриц: нижней треугольной и верхней треугольной (LU-декомпозиция) (17). LU-разложение (LU-декомпозиция) — представление матрицы в виде произведения двух матриц, $A = LU$, где L — нижняя треугольная матрица, а U — верхняя треугольная матрица.

Теперь рассмотрим применяемы в данной работе функции источников в пространстве Лапласа:

Таблица 5.1 Функции линейных стоков

Тип условий на границах	Функции линейных стоков
	$\begin{aligned} \tilde{G}_{nnnn} = & \\ = & \frac{\pi}{2x_{eD}} \left\{ \frac{\cosh \sqrt{s} \tilde{y}_{D1} + \cosh \sqrt{s} \tilde{y}_{D2}}{\sqrt{s} \sinh \sqrt{s} y_{eD}} \right. \\ & \left. + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \cos k\pi \frac{x_D}{x_{eD}} \cos k\pi \frac{(x_{wD} - x')}{x_{eD}} \frac{\cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D1} + \cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D2}}{\epsilon_k \sinh \epsilon_k y_{eD}} \right\} \end{aligned} \quad 5.31$
	$\begin{aligned} \tilde{G}_{cccc} = & \\ = & \frac{\pi}{x_{eD}} \sum_{k=1}^{\infty} \sin k\pi \frac{x_D}{x_{eD}} \sin k\pi \frac{ x_{wD} - x' }{x_{eD}} \frac{\cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D1} - \cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D2}}{\epsilon_k \sinh \epsilon_k y_{eD}} \end{aligned} \quad 5.32$
	$\begin{aligned} \tilde{G}_{cncn} = & \\ = & \frac{\pi}{2x_{eD}} \left\{ \frac{\cosh \sqrt{s} \tilde{y}_{D1} - \cosh \sqrt{s} \tilde{y}_{D2}}{\sqrt{s} \sinh \sqrt{s} y_{eD}} \right. \\ & \left. + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \cos k\pi \frac{x_D}{x_{eD}} \cos k\pi \frac{(x_{wD} - x')}{x_{eD}} \frac{\cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D1} - \cosh \epsilon_k \tilde{y}_{D2}}{\epsilon_k \sinh \epsilon_k y_{eD}} \right\} \end{aligned} \quad 5.33$

Где $x_{eD} = \frac{x_e}{x_f}$, $y_{eD} = \frac{y_e}{x_f}$, $\tilde{y}_{D1} = y_{eD} - |y_D - y_{wD}|$, $\tilde{y}_{D2} = y_{eD} - (y_D + y_{wD})$,
 $\epsilon_k = \sqrt{s + k^2 \pi^2 / x_{eD}^2}$, x_e – размер области дренирования по оси x, y_e – размер области дренирования по y

"n" обозначает границу неперетока, "с" обозначает границу постоянного давления.

5.3 Реализация задачи

В данной работе решается задача о нестационарном притоке к скважине при постоянном дебите для вертикальных скважин с трещиной ГРП и для горизонтальных скважин с трещинами МГРП. Описанное решение для двух задач (Главы 3.3-3.2) реализовано посредством языка программирования VBA.

Входными параметрами являются: дебит скважины (Q , м³/сут); радиус скважины (r_w , м); длина горизонтального ствола скважины (L , м); свойства флюида: вязкость (μ , сП) и объёмный коэффициент (B , д.ед.); параметры пласта: проницаемость (k_{ist} , мД), эффективная мощность (h , м), общая сжимаемость (c_t , атм⁻¹), пористость (ϕ , д.ед.), текущее пластовое давление (P_i , атм), скин-фактор (S , д.ед.); параметры трещины: количество трещин (n), полудлина трещины (x_f , м), безразмерная проводимость (F_{CD}). Границы задаются прямоугольником, где X_e и Y_e длина его сторон (рис. 4.123). Проницаемость задаётся из полученных равновероятностных распределений, описанных в главе 1.

В результате решения задачи моделируется забойное давление по заданной истории дебита (рис.4.13).

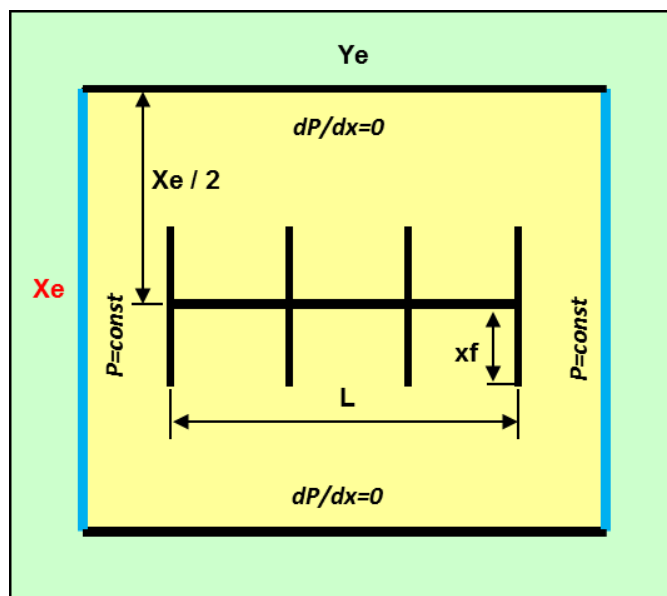


Рис. 5.5 Расположение горизонтальной скважины в границах

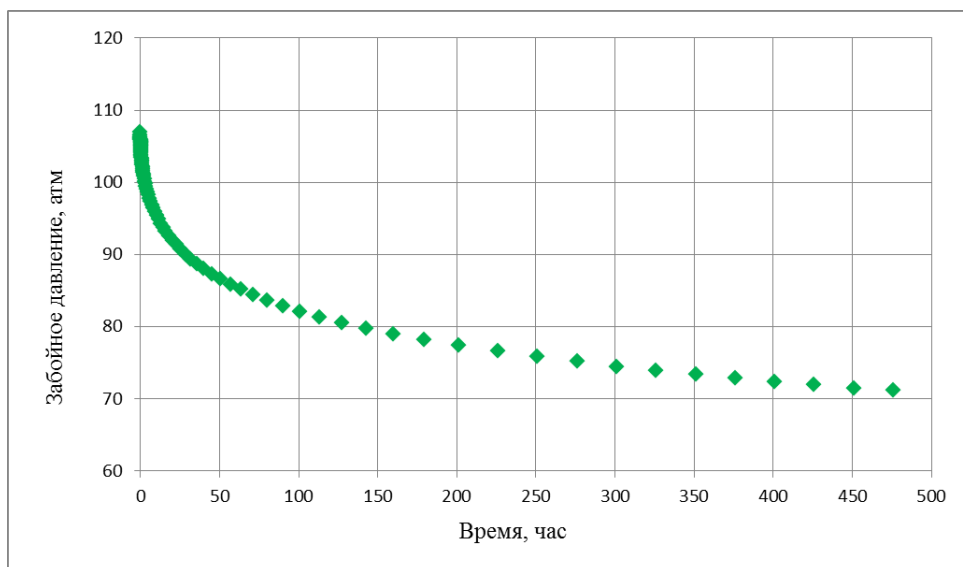


Рис. 5.6 Изменение забойного давления

На следующем этапе необходимо по последней точке определить значение k_{model} по формуле 3.29, чем выше положение радиального режима на рис.4.14, тем ниже значение k . Варьируя временем исследования, до которого будет рассчитываться забойное давление, получаем различные значения проницаемости.

Рассчитанное значение k_{model} сравнивается со значением k_{ist} , заданным во входных данных. При этом, подразумевается, что компетентный интерпретатор при наличии непроницаемых граничных условий

(производная растёт вверх после радиального режима) выберет положение радиального режима не выше k_{ist} . Таким образом, получаем отношение рассчитанного значения k_{model} после «проведения ГДИ» к известному значению k_{ist} в зависимости от длительности исследования.

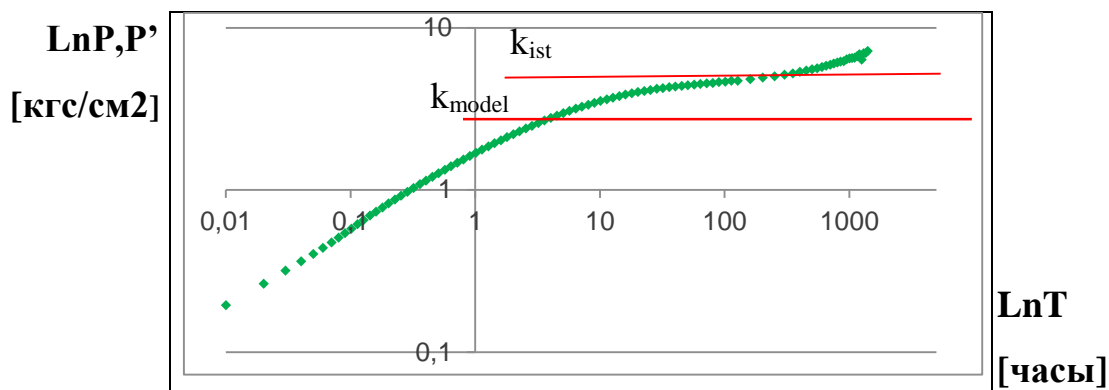


Рис. 5.7 График производной забойного давления

t\k model	10	20	30	40	50	60	70	80
50	2.288169	1.501385	1.150108	0.948723	0.808706	0.717031	0.640296	0.581876
100	1.496394	0.948581	0.717744	0.581513	0.484438	0.414342	0.361937	0.319311
150	1.107448	0.689761	0.503907	0.394864	0.322636	0.269636	0.233048	0.203542
200	0.949817	0.580742	0.417822	0.318936	0.259364	0.21555	0.186095	0.163468
250	0.818194	0.486803	0.338246	0.259062	0.206736	0.173204	0.14824	0.129707

Рис. 5.8 Результат VBA (отношение $k_{model} \setminus k_{ist}$)

Получив отношения модельной проницаемости к истинной, рассчитывается выборочная дисперсия:

$$S_n^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \right)^2 \quad 5.34$$

Где X_i – выборка из полученных значений k после ГДИ.

Данные по проницаемости умножаются на эффективную мощность пласта и полученное распределение kh на скважине, которая рассматривается под ГДИ, интерполируется с остальными значениями по скважинам в точку проектной скважины.

На рис. 4.16 показано распределение kh для разной длительности ГДИ на скважине 6.

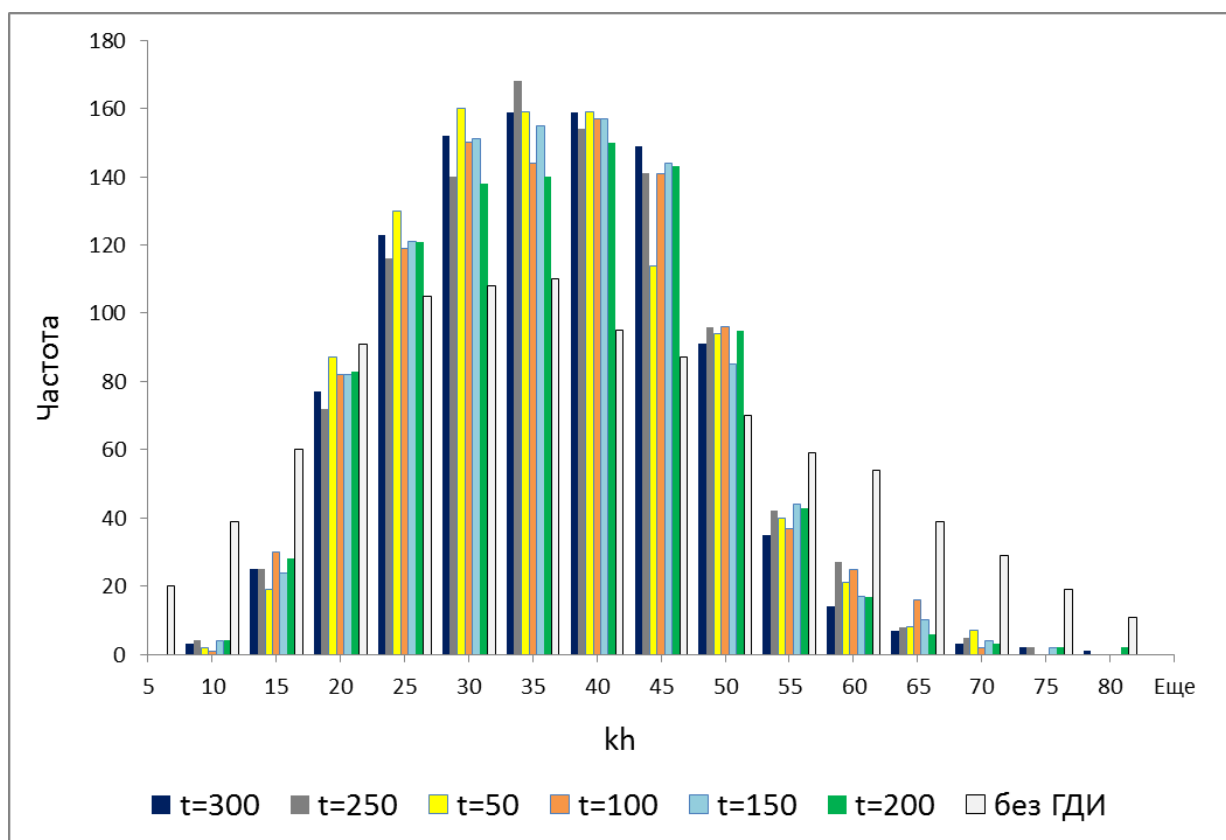


Рис. 5.9 Распределение kh на проектной скважине 400 после проведения ГДИ на скважине

6

Распределение kh в точке проектной скважины до ГДИ имело большую дисперсию по сравнению с распределением kh после проведенного ГДИ на скважине 6.

6 РАСЧЁТ ЦЕННОСТИ ПРОЕКТА (EMV)

Ожидаемая ценность проекта EMV вычисляется как сумма произведений вероятности на чистую приведённую стоимость (NPV). NPV рассчитывается по формуле 5.1: где CF – денежный поток, r – ставка дисконтирования, I – сумма инвестиционных вложений. Денежный поток зависит от количества добываемого флюида, т.е. добычи (18).

$$NPV = \sum \frac{CF_t}{(1+r)^t} - \sum \frac{I_t}{(1+r)^t} \quad 6.1$$

Инвестиционные вложения включают операционные затраты – Орех, повседневные затраты компании для ведения бизнеса, производства товаров и услуг, и капитальные затраты - Сарех, расходы на приобретение или обновление необоротных активов. При проведении ГДИС затраты на спуск\подъём оборудования, интерпретацию исследования инженером и потеря в прибыли, связанные с остановкой скважины, учитываются в Сарех.

6.1 EMV до ГДИ

Для оценки добычных характеристик скважины необходимо рассчитать запускной дебит скважины и темп падения дебита на 25 лет. Темпы падения строятся на основе исторических данных добычи по соседним скважинам.

Запускные показатели рассчитываются по следующим формулам:

1) Для вертикальной скважины с ГРП:

$$q = \frac{2\pi kh(P_i - P_w)}{\mu B (\ln \frac{R_e}{R_w} - 0,75 + S)}, S = \ln \frac{2r_w}{x_f} \quad 6.2$$

2) Для горизонтальной скважины с МГРП:

$$q = 2\pi kh \left(P_i - \frac{P_m}{2} + \frac{P_w}{2} \right) + mQ_D \quad 6.3$$

$$Q_D = \frac{2\pi kh(P_i - P_w)}{\mu B (\ln \frac{R_e}{R_w} - 0,75 + S)} \quad 6.4$$

Рассчитав запускные показатели, и, анализируя работу окружающих скважин, были рассчитаны темпы падения, на рисунке 5.1 показаны темпы падения P50 добываемой нефти и жидкости за 25 лет для скважины 716. Гистограмма накопленной добычи показана на рис. 5.2.

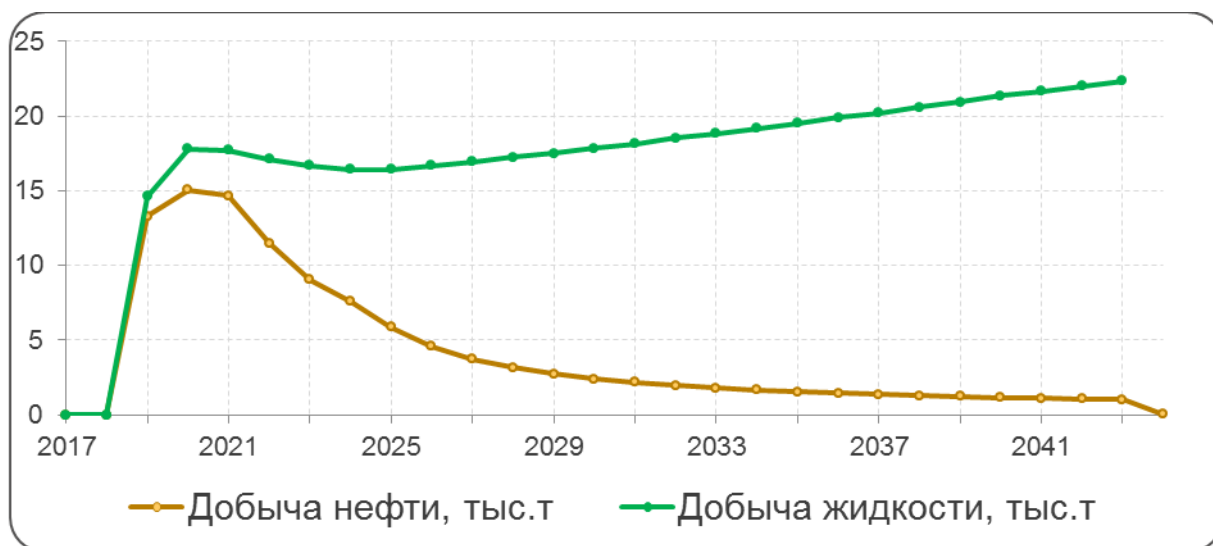


Рис. 6.1 Темпы падения для скважины 400



Рис. 6.2 Гистограмма распределения добычи нефти
для скважины 400 до ГДИ

Следующим шагом является расчёт NPV по полученным значениям добычи за 25 лет. Гистограмма NPV показана на рис. 5.3, в таблице 5.1 указаны накопленная добыча и NPV для вероятностей P10, P50, P90.

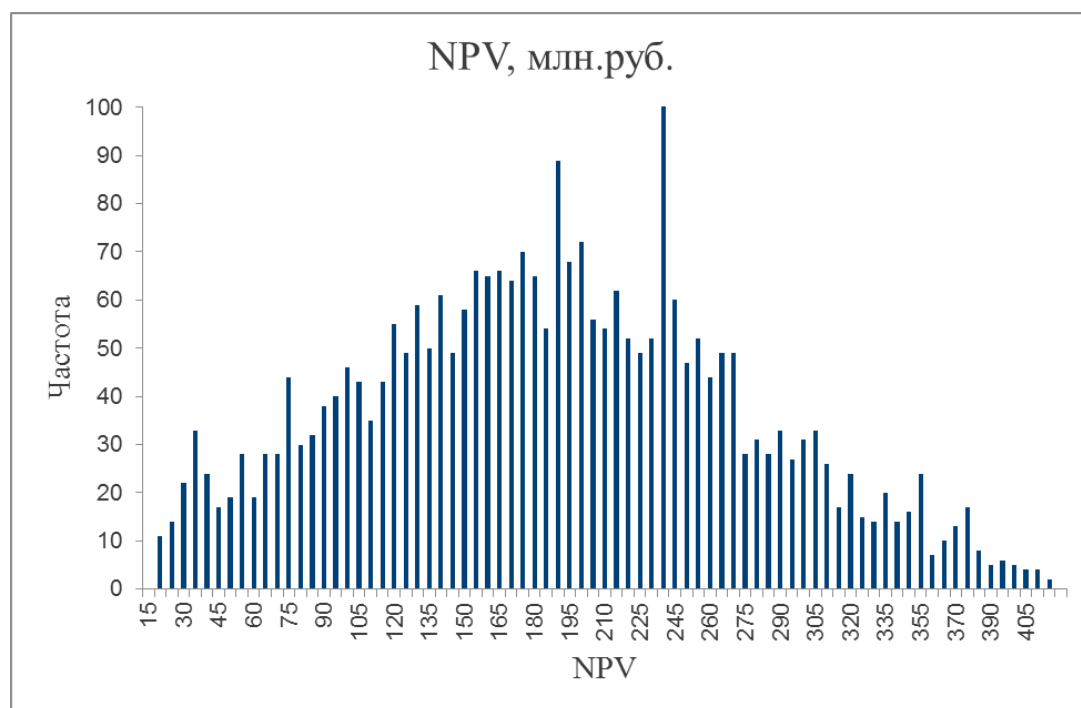


Рис. 6.3 Гистограмма распределения NPV для скважины 400 до ГДИ

Таблица 6.1 Показатели добычи и NPV

Вероятность	Накопленная добыча нефти тыс.т.	NPV, млн.руб.
P10	193.7	301.2
P50	112.8	154.7
P90	59.7	58.5

На основе данных, указанных в таблице 5.1, ожидаемая ценность проекта без проведения ГДИ, EMV_{woi} , составляет 160.11 млн. рублей.

6.2 EMV после ГДИ

Добыча при наличии дополнительной информации после проведения ГДИ рассчитывается аналогично по формулам 5.2-5.3. При этом в качестве значений проницаемости и пластового давления при вычислении используются уточнённые параметры после ГДИ.

На рисунке 5.4 для примера представлено распределение kh после проведенного ГДИ длительностью 100 часов.

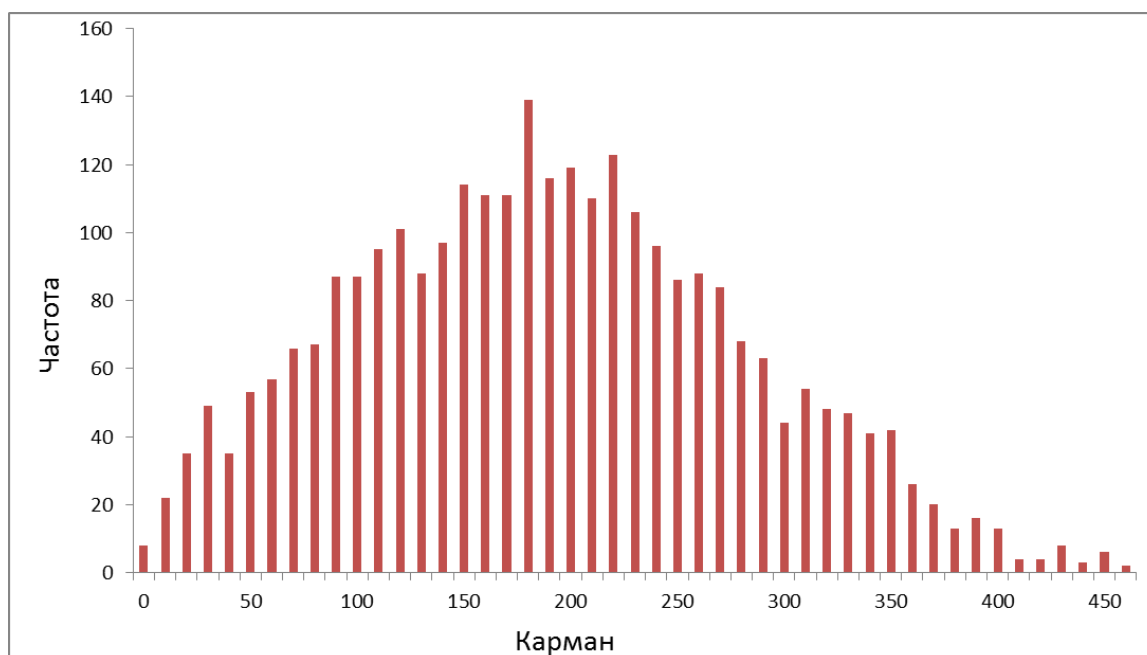


Рис. 6.4 Гистограмма распределения NPV для скважины 400 после ГДИ длительностью 100 часов

При проведении исследования ГДИ Сарех включают затраты на инструментальные замеры (спускоподъёмные операции), зависят от длительности ГДИ, затраты на интерпретацию исследования, которые не зависят от длительности ГДИ. Кроме того, при проведении исследования ГДИ компания теряет прибыль во время остановки скважины (потери добычи), данные потери зависят от длительности остановки скважины на ГДИ.

В таблице 5.1 результаты экономических расчётов и VOI в целом.

Таким образом, целесообразно провести ГДИ на скважине 6 длительностью от 50 до 200 часов, т.к. $VOI > Сарех$.

Для горизонтальных скважин, находящихся в окружении скважины 400, также были посчитаны VOI после проведения ГДИ. Но по той причине, что радиальный режим для горизонтальных скважин рассматриваемого месторождения N наступает около 1000 часов (по причине низкой

проницаемости), при этом на длительность более 500 часов скважины на ГДИ не останавливают, проведение на них исследований не целесообразно. В таблице 5.2 указаны расчёты при проведении исследования на горизонтальной скважине 132.

Таблица 5.2 VOI при проведении ГДИ на скважине 6

Длительность ГДИ	EMV _{wi} , млн. руб.	CAPEX, млн. руб.	EMV _{woi} , млн. руб.	VOI	VOI- Capex	Целесообразность проведения ГДИ
50	161.4	0.241	160.21	1.29	1.05	+
100	161.7	0.432	160.21	1.59	1.16	+
150	161.9	0.623	160.21	1.82	1.20	+
200	162.1	0.814	160.21	1.96	1.15	+
250	160.3	1.006	160.21	0.22	-0.79	-
300	160.2	1.197	160.21	0.14	-1.06	-

Таблица 5.2 VOI при проведении ГДИ на скважине 132

Длительность ГДИ	EMV _{wi} , млн. руб.	CAPEX, млн. руб.	EMV _{woi} , млн. руб.	VOI	VOI- Capex	Целесообразность проведения ГДИ
50	159.1	0.241	160.21	-1.01	-5.79	-
100	159.6	0.432	160.21	-0.51	-10.02	-
150	159.9	0.623	160.21	-0.21	-14.45	-
200	160.05	0.814	160.21	-0.06	-19.04	-
250	160.1	1.006	160.21	-0.01	-23.72	-
300	160.15	1.197	160.21	0.04	-28.40	-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате данной работы создан инструмент для оценки необходимости проведения гидродинамических исследований на этапе планирования бурения скважин на основе метода VOI.

В процессе выполнения работы были реализованы: Кригинг с помощью языка программирования Python, используемый для интерполяции параметров, решение задачи о нестационарном притоке к скважине посредством языка программирования VBA, которое учитывало результаты проведения синтетического ГДИ.

Плановые показатели добычи рассчитывались на основе получаемых после Кригинга распределений $P_{пл}$ и kh до проведения исследования и после него. В итоге, был рассчитан VOI для различной длительности ГДИС.

Результаты расчётов показали, что целесообразно останавливать на ГДИ скважину 6 с длительностью исследования 150 часов.

Таким образом, метод VOI позволяет определять целесообразность проведения исследования ГДИ и экономически обосновывать остановку скважины и её длительность.

Возможности метода VOI:

- Автоматизированная оценка неопределённостей по ФЕС и $P_{пл}$ в зоне планируемого бурения.
- Экономически обоснованные рекомендации по проведению КВД в районе бурения скважин.
 - Рейтинг наиболее «интересных» скважин;
 - Оценка оптимальной длительности ГДИС.
- Связь между затратами на ГДИС и последующими экономическими решениями на основе результатов ГДИС.

ОХРАНА ТРУДА

Большую часть времени при написании дипломной работы исполнитель проводит за компьютером.

Охрана труда при осуществлении трудовой деятельности за компьютером осуществляется по документу: Типовая инструкция ТОИ Р-45-084-01. Среди опасных и вредных факторов при написании выпускной квалификационной работы выделяют:

- высокий уровень наличия статического электричества;
- низкая степень ионизации воздуха;
- статические перегрузки, связанные с длительным сидячим положением;
- перенапряжение зрительных органов;

Для безопасной работы пользователя неблагоприятные воздействия, перечисленные выше, требуется свести к минимуму, соблюдая требования техники безопасности и охрану труда

1) Наличие статического электричества

Приступая к работе за компьютером, пользователю необходимо проверить правильность подключения оборудования к электросети. При этом, запрещается: производить самостоятельный ремонт оборудования; держаться за шнур при выключении оборудования от электросети. Кроме того, пользователь должен следить, чтобы влага не попадала на поверхность электрооборудования.

Если пользователь компьютера заметил обрыв проводов, появление запаха гари, он должен отключить питание и сообщить руководителю о аварийном случае.

2) низкая степень ионизации воздуха

В нормативном акте, который установлен в СанПиНе, указано: необходимо проветривать помещения с компьютерами через каждый час, офисы должны быть оборудованы системой вентиляции, отопления и

кондиционирования воздуха. Кроме того, с целью регулирования аэроионного фактора в офисах необходимо использовать оборудование стабилизации ионного режима воздушной среды.

3) статические перегрузки

Работа за компьютером подразумевает длительный сидячий образ, т.е. пониженную мышечную, что приводит к быстрому утомлению. По этой причине длительность непрерывной работы за компьютером не должна превышать 2-х часов.

Утомление при длительном сидячем образе увеличивается, если не соблюдаются правила положения стула и рабочего места с компьютером. Необходимо соблюдать следующие условия: высота рабочего стола - в пределах 680 - 800 мм; его глубина на уровне колен не менее 450 мм; стул – регулируется по высоте и наклону спинки; наличие подставки для ног с шириной не менее 300 мм и глубиной не менее 400 мм.

4) Зрительное напряжение

При длительной работе за компьютером возникают нагрузки на зрение, что может приводить к близорукости, переутомлению глаз, что в свою очередь приводит к головным болям, стрессу и т.д.

Рабочее место и помещение в целом должны быть правильно освещены. Рекомендуется норма освещенности: 150 – 200 лк. Освещение помещения не должно создавать бликов на поверхности экрана и увеличивать освещенность экрана более 300 лк. Окна расположенные в помещении должны быть оснащены жалюзи. Рабочее место по отношению к окнам должны располагаться так, чтобы естественный свет падал сбоку, преимущественно слева.

В случае если пользователь получил травму или внезапном заболевании необходимо немедленно известить своего руководителя, организовать первую доврачебную помощь или вызвать скорую медицинскую помощь.

5) Пожарная безопасность

Если пользователь почувял запах гари или другие признаки пожара, ему необходимо позвонить в пожарную часть, открыть запасные выходы и покинуть здание.

В свою очередь, помещение должно быть оборудовано сигнализациями и средствами пожаротушения, выходами для эвакуации сотрудников, средствами индивидуальной защиты. В помещение должны быть установлены планировки эвакуационных путей и выходов и огнетушительных веществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Joshi S.D. Horizontal Well Technolog. Tulsa, Oklahoma : Penwell Published Compan, 1991.
2. Grayson C. J. Decision Under Uncertainty: Drilling Decisions by Oil and Gas Operators. 1960.
3. how-kriging-works: <http://desktop.arcgis.com/ru/arcmap.htm>.
4. Демьянов В. В., Савельева Е. А. Геоestatистика: теория и практика. [ред.] Р. В. Арутюняна. Москва, 2010. стр. 327.
5. Bohling, Geoff : KRIGING. Kansas, Geological Survey, 2005 г.
6. Каневский М.Ф., Демьянов В.В., Савельева Е.А. и др.,. Элементарное введение в геостатистику. Москва : ВИНТИ, 1999.
7. Байков В.А., Бакиров Н.К. , Яковлев А.А. ,. Математическая геология. Москва-Ижевск : б.н., 2012. стр. 228. Т. 1: ВВ=ведение в геостатистику.
8. <http://resources.arcgis.com/ru/help>
9. Кременецкий М. И., Ипатов А. И., Гуляев Д.Н. Информационное обеспечение и технологии гидродинамического моделирования нефтяных и газовых залежей. Москва-Ижевск : Ижевский институт компьютерных исследований, 2011. стр. 896.
10. Houzé O., Viturat D. , Fjaere O-S. ,. Dynamic data analysis. б.м. : Карра, 2008.
11. The Society of Petroleum Engineers. Введение в нефтяной инжиниринг. Москва-Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2014.
12. Churchill R.V. Operational Mathematics. New York : McGraw-Hill Book Co. Inc., 1972.
13. Abramowitz M., I.A. Stegun,. Handbook of Mathematical Functions. New York : Dover Publications Inc., 1972.
14. Van Everdingen A.F. and HurstW. W. The Application of the Laplace Transformation to Flow Problems in Reservoirs. б.м. : AIME, 1953.

15. Stehfest H. Numerical Inversion of Laplace Transforms. б.м. : Communication of the ACM, 1970.
16. Gringarten A.C. and Ramey. H.J. The Use of Source and Green's Functions in Solving Unsteady-Flow Problems in Reservoirs. б.м. : SPEJ, 1973.
17. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. Москва : Мир, 1991.
18. Jan R. Williams, Susan F. Haka, Mark S. Bettner, Joseph V. Carcello.,. Financial & Managerial Accounting. 2008.