

На правах рукописи

ВОЙКИН ВАДИМ ФАГИМОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИТОКА ЖИДКОСТИ К
ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ СКВАЖИНАМ В ПЛОЩАДНОЙ
СИСТЕМЕ ЗАВОДНЕНИЯ**

Специальность 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бугульма 2017

Работа выполнена в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» им. В.Д.Шашина.

Научный руководитель: - доктор технических наук, доцент
Насыбуллин Арслан Валерьевич

Официальные оппоненты:

- **Шамсиев Марат Назиевич**
доктор технических наук, доцент,
ФГБУН «Федеральный исследовательский центр
«Казанский научный центр Российской академии
наук», Институт механики и машиностроения,
лаборатория подземной гидродинамики, ведущий
научный сотрудник

- **Сыртланов Виль Ромэнович**
кандидат физико-математических наук, ООО
«Везерфорд», департамент консультационных
услуг по разработке и гидродинамическому
моделированию, эксперт по разработке нефтяных
и газовых месторождений

Ведущая организация: Общество с ограниченной ответственностью
«РН-УфаниПИнефть»

Защита состоится «15» февраля 2018 года в 14 час. 30 мин. на заседании диссертационного совета Д 222.018.01 в Татарском научно-исследовательском и проектном институте нефти (ТатНИПИнефть) ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина по адресу: 423236, Республика Татарстан, г. Бугульма, ул. М. Джалиля, 32.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Татарского научно-исследовательского и проектного института нефти www.tatnipi.ru

Автореферат разослан в «___» 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Львова Ирина Вячеславовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Истощение основных нефтяных месторождений в нашей стране и в мире обуславливает применение новых технологий добычи. При этом ряд уже известных технологий нефтедобычи не исчерпали свой ресурс. Эффективность горизонтальных скважин (ГС) и площадных систем заводнения для выполнения этих задач доказана как теоретически, так и практически как в отечественной, так и в зарубежной нефтяной индустрии. Соответственно, широко распространены системы разработки, включающие вертикальные и горизонтальные скважины, что обуславливает необходимость применения методик расчета производительности этих систем аналитически или численно. Ввиду широкого распространения гидродинамических моделей численный расчет не представляет трудностей. Вместе с тем сохраняется необходимость в аналитической оценке дебита горизонтальных скважин для оперативности принятия решений, сужения количества вариантов для гидродинамического моделирования. При этом необходимо оценивать не только дебит единичной скважины, а рассматривать элемент заводнения, вписанный в определенную систему.

Аналитические формулы являются в определенной степени ограниченными, ввиду изначально заложенной стандартизации их применения. Кроме того, на поздних стадиях разработки в регулярных системах заводнения используются нестандартные схемы расположения скважин. Поэтому создание универсального уравнения комплексного потенциала течения, учитывающего регулярное и нерегулярное расположение траекторий горизонтальных скважин в площадных системах заводнения, является актуальным и перспективным направлением исследования.

При моделировании разработки месторождений с использованием горизонтальных скважин возникают трудности задания зон их дренирования в виде областей Вороного. В отличие от стандартных алгоритмов, основанных на координатах забоев вертикальных скважин, необходимо учитывать большую протяженность ствола. Поэтому создание новых методов расчета области Вороного для горизонтальных скважин является также актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы.

Вопросами решения теоретических и практических задач разработки месторождения методом площадной системы заводнения занимались такие

ученые, как Р.Г. Абдулмазитов, В.Е. Гавура, В.Д. Лысенко, П.А. Палий, Р.Т. Фазлыев, И.Л. Ханин, М.М. Хасанов, В.Н. Щелкачев, J.C. Deppe, W.C. Hauber, M. Muskat, M. Prats, R.E. Watson.

Изучению эксплуатации ГС посвящены работы таких исследователей, как Г.С. Абдрахманов, З.С. Алиев, Д.Г. Антониади, И.М. Бакиров, Ю.П. Борисов, И.В. Владимиров, С.И. Грачев, А.М. Григорян, В.Г. Григурецкий, С.Н. Закиров, А.Т. Зарипов, А.Б. Золотухин, Р.Р. Ибатуллин, А.И. Ибрагимов, В.А. Иктисанов, Р.Д. Каневская, А.Г. Корженевский, В.Д. Лысенко, В.П. Меркулов, Л.М. Миронова, И.Р. Мукминов Р.Х. Муслимов, Р.К. Мухамедшин, А.В. Насыбуллин, Р.Х. Низаев, А.И. Никифоров, В.А. Никонов, В.П. Пилатовский, П.Я. Полубаринова-Кочина, Д.А. Разживин, И.Б. Розенберг, В.Р. Сыртланов, В.П. Табаков, Р.Т. Фазлыев, М.Х. Хайруллин, И.Н. Хакимзянов, Р.С. Хисамов, Н.И. Хисамутдинов, М.Н. Шамсиев, R.M. Butler, D.K. Dabu, M.J. Economides, C.A. Ehlig, F.M. Giger, S.D. Joshi, A.S. Odeh, R. Suprunowicz.

При этом вопросы совместного рассмотрения притока жидкости к ГС в регулярных и не регулярных системах разработки требуют дополнительной проработки.

Цель работы – повышение качества проектирования горизонтальных скважин за счет разработки методов расчета их производительности и зон дренирования в регулярных и нерегулярных системах разработки.

Основные задачи исследований

1. Разработка методики определения комплексного потенциала течения совместно с уравнением фильтрации однородной жидкости через прямолинейную макротрешину бесконечной проводимости.

2. Создание методики моделирования элемента заводнения при разработке месторождения ГС и/или ВС.

3. Вывод аналитической формулы для расчета дебитов ГС в площадных системах разработки.

4. Изучение отношения толщины пласта и длины ГС для достижения оптимальных показателей добычи нефти.

5. Совершенствование методов расчета области дренирования для ГС.

Методы решения поставленных задач.

Для нахождения формулы дебита ГС и комплексного потенциала течения используется разложение эллиптической функции на сигма-, дзета- и пэ-функции Вейерштрасса. Для получения аналитической формулы дебита, ГС представляются как ВС, расположенные вдоль пути ГС, вскрывшие пласт на полную толщину и с расстоянием между ними, равным толщине пласта.

Получение комплексного потенциала течения основано на представлении ГС как макротрешины бесконечной проницаемости.

Основой методики расчета области Вороного для ГС является разбиение ГС на мнимые ВС с помощью кривых Безье. Для получения кривой Безье используются фактические данные телеметрии.

Научная новизна.

1. Получено общее решение задачи определения дебита регулярно расположенных ГС в площадных системах заводнения.

2. Определена аналитическая зависимость дебита ГС в пятиточечном элементе заводнения от геолого-физических параметров, сторон элемента заво-днения и энергетического состояния пласта.

3. Получен комплексный потенциал течения для площадных систем с макротрешиной бесконечной проницаемости имитирующий ГС.

Основные защищаемые положения:

1. Аналитическое решение задачи притока к ГС при площадной системе заводнения.

2. Изучение влияния толщины пласта и длины ГС на ее продуктивность в элементе заводнения.

3. Методика вывода комплексного потенциала течения для площадных систем заводнения.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Указанная область исследований соответствует паспорту специальности 25.00.17 «Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений», а именно п.5: Научные основы компьютерных технологий проектирования, исследования, эксплуатации, контроля и управления природно-техногенными системами, формируемыми для извлечения углеводородов из недр или их хранения в недрах с целью эффективного использования методов и средств информационных технологий, включая имитационное моделирование геологических объектов, систем выработки запасов углеводородов и геологотехнологических процессов.

Практическая ценность результатов работы.

1. Разработаны программные модули в вычислительной среде MatLab для расчета дебита горизонтальной скважины непосредственно из уравнения комплексного потенциала течения.

2. Полученный комплексный потенциал течения можно применять для обоснования заложения горизонтальных скважин на любых стадиях разработки месторождения.

3. Программный модуль, полученный для расчета дебита на основе комплексного потенциала течения, использует минимальные допущения что, безусловно, повышает точность полученных результатов.

4. Усовершенствован метод расчета области дренирования ГС с использованием сетки Вороного и кривых Безье.

5. Разработан программный модуль для расчета области дренирования ГС с помощью кривых Безье. Практическое применение опробовано на срезе скважин Коробковского участка Бавлинского месторождения.

6. Созданные программные модули интегрированы в программный продукт «Нефтяной калькулятор» и внедрены во все НГДУ ПАО «Татнефть» для поддержки задач регулирования и управления разработкой.

7. Материалы диссертации используются в учебном процессе Альметьевского государственного нефтяного института для подготовки студентов по направлению «Нефтегазовое дело».

Личный вклад автора включает получение новых формул для расчета дебита ГС в площадных системах заводнения. В выводе комплексных потенциалов течения. Получении новых методик расчета области Вороного для ГС. Разработки программных продуктов для расчетов.

Апробация результатов работы

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались на 27-й молодежной научно-практической конференции, посвященной 60-летию института ТатНИПИнефть ОАО «Татнефть» в секции «Геология, разработка нефтяных и нефтегазовых месторождений» (Бугульма, 2016 г.); на 15-й международной заочной конференции «Развитие науки в XXI веке» в секции «Технические науки» (Харьков, 2016 г.); на международной научно-практической конференции молодых ученых приуроченный к 60-летию высшего нефтегазового образования в республике Татарстан «Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии» (Альметьевск, 2016 г.); на международной научно-практической конференции посвященный к 100-летию со дня рождения В.Д. Шашина «Инновации в разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений» (Казань, 2016 г.); на международной научно-практической конференции «Интеллектуальное месторождение: инновационные технологии от скважины до магистральной трубы» (Сочи, 2016);

Публикации. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 13 научных трудах, в том числе в 3 ведущих рецензируемых

научных журналах, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки РФ, и в 3 свидетельствах о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, основных выводов и рекомендаций, библиографического списка литературы, включающего 137 наименований. Работа изложена на 118 страницах машинописного текста, содержит 3 таблицы, 39 рисунков.

Автор выражает благодарность научному руководителю д.т.н., доценту А.В. Насыбуллину за методическую помощь в постановке и реализации работы, а также признательность д.т.н. И.М. Бакирову, к.т.н. Д.А. Разживину, к.т.н. А.В. Лифантьеву и сотрудникам института «ТатНИПИнефть» за помощь в написании и ценные советы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определены основные цели диссертационной работы, обосновано актуальность проблем разработки нефтяных месторождений с помощью ГС в элементе заводнения.

В первой главе рассмотрен опыт работ Советских, Российских и зарубежных ученых, как для площадных систем разработки, так и для ГС. Приводятся примеры аналитических решений и комплексного потенциала течения для рассматриваемых систем. Отмечается, что существующие алгоритмы нахождения области Вороного для смешанных систем с ГС и ВС не являются исчерпывающими.

Обосновывается, необходимость аналитического решения для ГС при площадных системах заводнения и методов их получения. Объясняется необходимость получения методики по выводу комплексного потенциала течения для площадных систем, с произвольным количеством ГС. Констатируется необходимость разработки алгоритма нахождения области Вороного для ГС.

Во второй главе показан метод вывода комплексного потенциала течения для ГС в элементе заводнения.

Большинство нефтяных месторождений Республики Татарстан находятся на поздней стадии разработки, где наблюдается сложная структура остаточных запасов. Она характеризуется сосредоточением нефти в прикровельной части пласта, зонах с ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами, недренируемых участках. Вовлечение таких запасов в разработку путем создания больших градиентов давления приводит, как правило, к опережающему обводнению скважин за счет образования водяного конуса.

Поэтому в данных условиях широко применяется метод горизонтального бурения, позволяющий обеспечить большую зону контакта с пластом, высокую продуктивность скважин и высокие дебиты при небольших депрессиях. Проектирование месторождений с применением ВС и ГС влечет необходимость создания систем разработки, а, следовательно, методик расчета производительности этих систем аналитически или численно. Численный расчет реализован в широко применяющихся в отрасли гидродинамических моделях. Однако, применение комплексного потенциала течения для ГС до сих пор актуально. Это позволяет сократить количество вариантов при расчете на гидродинамических моделях. Уравнения притока к одиночной ГС рассматривались многими исследователями.

В своих трудах Р.Т. Фазлыев исследовал фильтрацию однородной несжимаемой жидкости в изотропном пласте, вскрытом системой скважин площадного заводнения. На основе методов теории функции комплексного переменного, в частности, свойств эллиптических функций Якоби и Вейерштрасса, получено решение гидродинамической задачи по определению характеристик фильтрационного потока в прямоугольном элементе площадного заводнения, вскрытом произвольным конечным числом эксплуатационных и нагнетательных скважин (Рисунок 1).

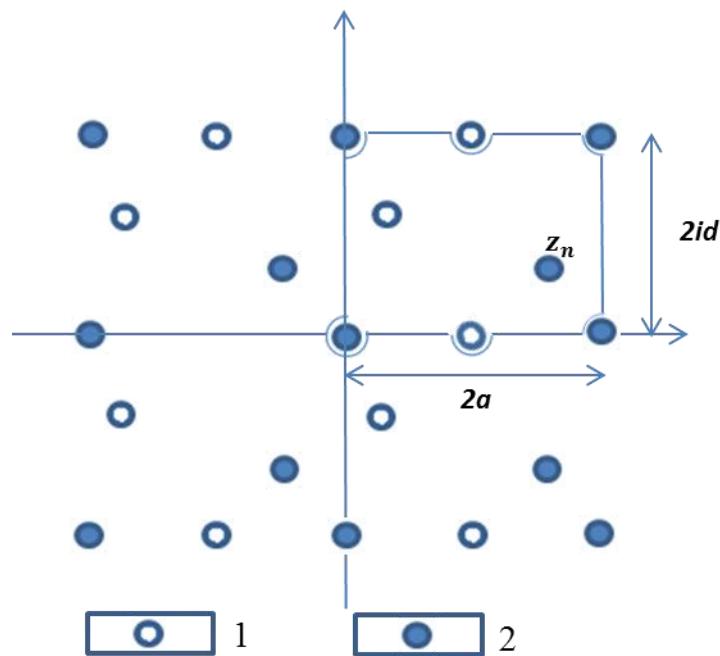


Рисунок 1 – Параллелограм периодов двоякопериодического течения жидкости.

1 - нагнетательная скважина;

2 - эксплуатационная скважина;

Используя эту теорию Р.Т. Фазлыев получил следующее уравнение комплексного потенциала течения при площадной системе заводнения:

$$\begin{aligned}
F(z) &= \sum_{n=1}^N \frac{q_n}{2\pi} \left[\ln \sin \frac{\pi(z - z_n)}{2a} + \sum_{v=1}^{\infty} \ln \{\gamma_{nv} \tau_{nv}\} \right] + Cz + D \\
\gamma_{nv} &= 1 - h^{2v} \exp \left[\frac{\pi i(z - z_n)}{a} \right] \\
\tau_{nv} &= 1 - h^{2v} \exp \left[-\frac{\pi i(z - z_n)}{a} \right] \\
h &= \exp \left(-\frac{\pi d}{a} \right) \\
C &= \frac{-i \sum_{n=1}^N q_n \operatorname{Im} z_n}{4ad}
\end{aligned} \tag{1}$$

Формула М. Маскета для дебита пятиточечной системы площадного заливания при квадратной сетке скважин имеет вид:

$$Q = \frac{\pi k h}{\mu} \frac{\Delta P}{\ln \frac{c}{r} - 0,6188} \tag{2}$$

В своей работе В.П. Пилатовский привел работу прямолинейной макротрешины в поступательном потоке (Рисунок 2). Для оси трещины Γ

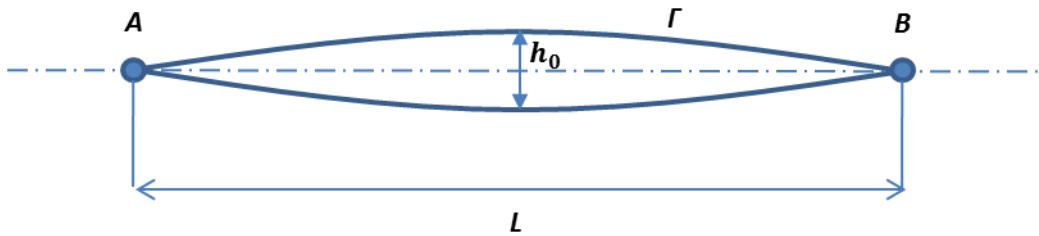


Рисунок 2 – Раскрытие трещины h .

раскрытие трещины определяется по параболическому закону:

$$h = h_0(1 - s^2) \quad (|s| < 1) \tag{3}$$

h – раскрытие трещины

$$\zeta = d + e^{i\beta} L s \quad (|s| < 1) \tag{4}$$

и комплексного потенциала течения

$$F(z) = A \ln z \tag{5}$$

автором книги было получено следующее уравнение

$$\begin{aligned}
W(z) &= A \ln z - \frac{w_0(z - d)}{\pi z_0} + \frac{w_0}{2\pi} \left[1 - \frac{(z - d)^2}{z_0^2} \right] \ln \frac{z - d - z_0}{z - d + z_0} + C \\
w_0 &= \frac{Ab\delta_0 \cos \beta}{d \left(b + \frac{2\delta_0}{\pi} \right)}
\end{aligned} \tag{6}$$

δ_0 – проницаемость в середине трещины.

Используя уравнения представленные в работах Р.Т. Фазлыева, а также разработки проведенные В.П. Пилатовским с трещинами бесконечной проводимости можно получить комплексный потенциал течения площадной системы заводнения с конечным числом ГС.

В качестве примера разработан комплексный потенциал течения для пятиточечной системы заводнения с одной ГС (Рисунок 3).

Приняв угол $\beta = 0$ полученное уравнение можно представить в следующем виде:

$$W(z) = F(z) - \frac{2w_0 z}{\pi L} + \frac{w_0}{2\pi} \left(\left(1 - \left(\frac{2z}{L} \right)^2 \right) \log \frac{\left(z - \frac{L}{2} \right)}{\left(z + \frac{L}{2} \right)} \right) \quad (7)$$

$$w_0 = \frac{\pi R e(F'(r))}{2}$$

$F(z)$ берется из формулы (1)

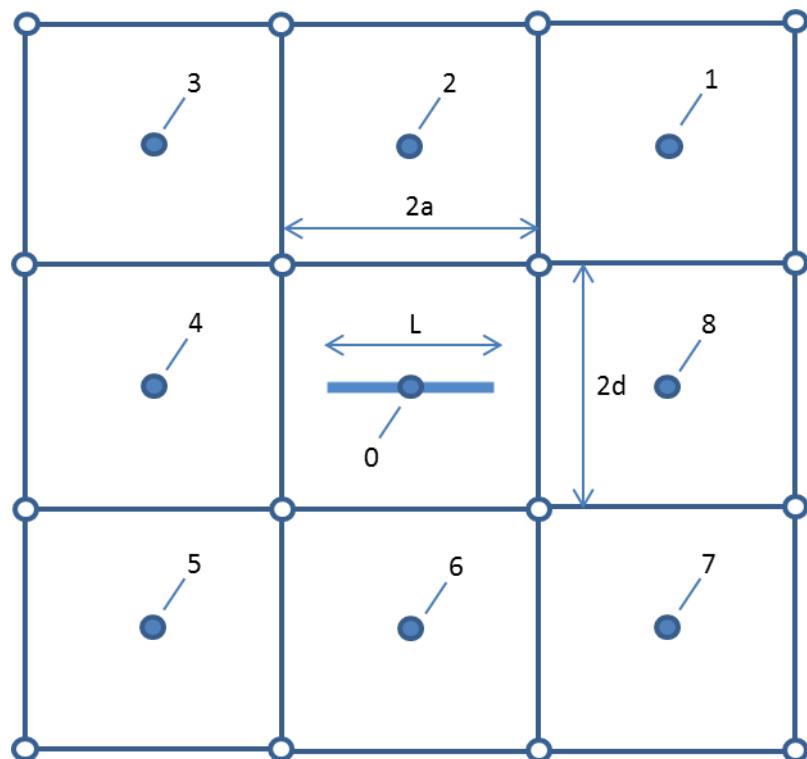


Рисунок 3 – Горизонтальная скважина
в пятиточечной системе.

Используя уравнения, приведенные ниже можно найти давление в любой точке месторождения:

$$W(z) = \varphi + i\psi$$

$$\varphi = -\frac{kP}{\mu} \quad (8)$$

Для определения дебита используется разница в давлениях между добывающей скважиной с № 0 из (Рисунок 3) и ближайшей нагнетательной скважиной к ней. Очевидно, что такие вычисления представляет определенные трудности, поэтому разработан программный модуль на языке MatLab.

Сравним результаты расчетов формулы М. Маскета для пятиточечной системы площадного заводнения, уравнение (1) и уравнение (7). Требуется определить дебит добывающей скважины, если известно, что забойное давление добывающих скважин - 9 МПа, нагнетательных - 11 МПа, вязкость - 5 мПа*с, проницаемость – $100 \cdot 10^{-3}$ мкм², радиусы скважин - 0,05 м, стороны элемента заводнения - 150 м, длина ГС - 150 м. Подставив соответствующие значения в выражения, находим, что формула М. Маскета дает следующий результат 178,48 м³/сут; для уравнения (1) 178,44 м³/сут; для уравнения (7) 189,17 м³/сут.

Пример, представленный выше, показывает, возможность совместного использования трудов Р. Т. Фазлыева и В. П. Пилатовского для определения комплексного потенциала течения ГС при площадных системах заводнения.

Третья глава описывает методику получения дебита ГС в площадных системах заводнения. В качестве примера приведен дебит ГС в пятиточечной системе заводнения.

В трудах Ю.П. Борисова, В.П. Пилатовского и В.П. Табакова было предложено моделировать ГС как ВС, расположенные вдоль пути ГС, вскрывшие пласт на полную толщину и с расстоянием между ними, равным толщине пласта. Таким образом, вместо одной ГС получали $[L/h]$ ВС, сумма дебитов которых и равнялась дебиту ГС.

Пользуясь разложением комплексного потенциала течения жидкости при площадном заводнении на тэта-функции, в работе Р.Т. Фазлыева представлена следующая формула для расчета фильтрации жидкости:

$$P_j = \frac{\mu}{k} \left[\frac{Q_j}{2\pi} \ln \left| \vartheta_1 \frac{\pi(z_{r_j} - z_r)}{2a} \right| + \sum_{n=1}^N \frac{Q_n}{2\pi} \ln \left| \vartheta_1 \frac{\pi(z_j - z_n)}{2a} \right| - C' y_j \right] + D_1. \quad (9)$$

Решая систему N уравнений совместно с соотношением:

$$\sum_{n=0}^N Q_n = 0 \quad (10)$$

определяем все значения Q_n и значение D_1 .

В трудах В.А. Иктисанова и Л.Х. Фокеевой показано, что для условий месторождений ПАО «Татнефть» потери на трение по длине ствола менее сотых долей МПа. Так, практические потери на трение для большого дебита

при высокой вязкости нефти при длине ствола скважины 300 м диаметром 0,146 м составляет 0,0062 МПа. Приведенная величина позволяет пренебречь изменением давления вдоль ствола скважины. Исходя из вышесказанного, мы можем давление в узлах P_j принять за постоянное давление в стволе ГС $P_{\text{скв}}$:

$$P_i = P_{\text{скв}} \quad (11)$$

Приток к горизонтальной скважине на установившемся режиме

В пятиточечной системе представив ГС как ВС с расстоянием между ними, равным толщине пласта и подставив соответствующие значения в уравнение (11), получим следующую формулу:

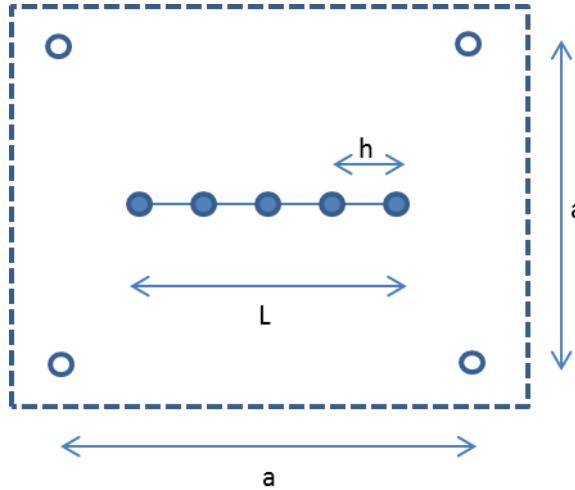


Рисунок 4 – Горизонтальная скважина в пятиточечной системе

$$Q = \frac{2\pi kh}{\mu} \frac{\Delta P}{\frac{h+L}{L} \ln \frac{a}{\pi r} - B + C - \frac{\ln 2}{2L} h - 2,2779}$$

$$B = \frac{h^2}{2L^2} \ln \prod_{\substack{j=1 \\ n=1 \\ j \neq n}}^N \left(1 - \cos \frac{2\pi h(j-n)}{a} \right)$$

$$C = \frac{h}{L} \ln \prod_{n=1}^N \left(11,5919 - \cos \frac{\pi(h(2n-1) - L)}{a} \right)$$

$$N = \left[\frac{L}{h} \right]$$

$$L \geq h$$
(12)

Сопоставим полученное решение с решениями уравнения (1) и формулы (2) для пятиточечной системы площадного заводнения. Для расчетов воспользуемся следующими данными: давление добывающей скважины равна 10 МПа, давление для нагнетательной скважины равняется 35 МПа, вязкость 5

мПа^{*}с, проницаемость $100 \cdot 10^{-3}$ мкм², радиус добывающих и нагнетательных скважин 0,05 м, стороны квадрата площадного заводнения 300 м, толщина пласта 15 м, длина ГС меняется от 15 м до 300 м. Подставив соответствующие значения в выражения, находим, что формула (2) дает следующий результат 19,33 м³/сут; для уравнения (1) 19,53 м³/сут; для формулы (12) дебит меняется от 20,07 м³/сут до 37,14 м³/сут в зависимости от длины ГС (Рисунок 5).

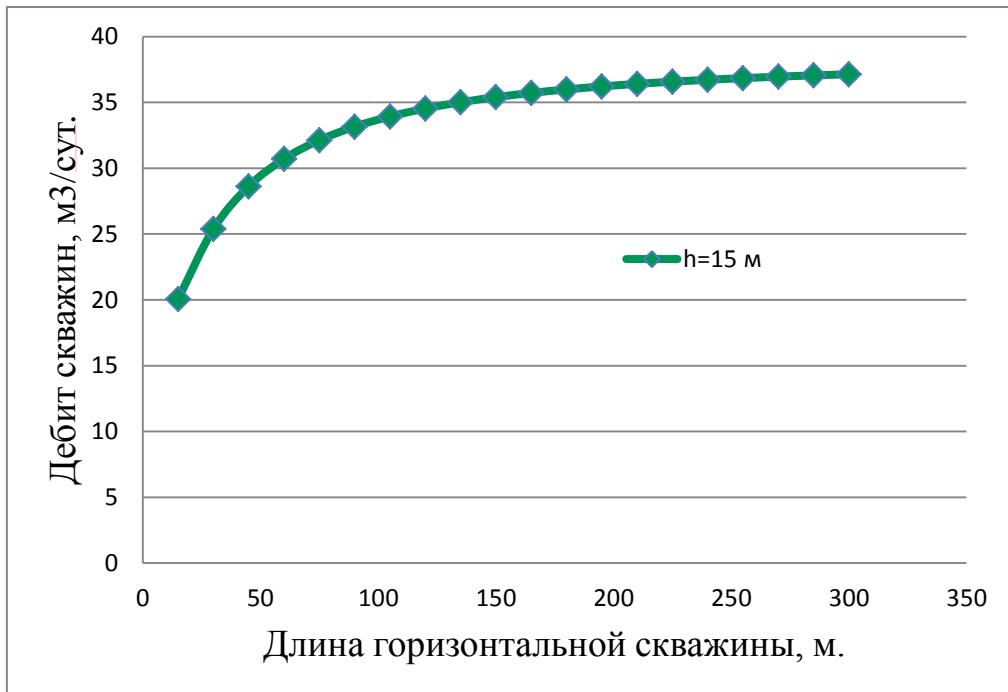


Рисунок 5 – Дебит горизонтальной скважины

Из рисунка 5 видно, что наиболее оптимальным соотношением длины ГС и дебита в примере, представленном выше, является длина ГС равной примерно 5-7 частям толщины пласта, после которого рост дебита скважины резко снижается. В то же время в момент планирования строительства ГС необходимо учесть, что при удлинении ствола ГС зона охвата не разрабатываемой части пласта, очевидно, растет, несмотря на то, что дебит будет оставаться постоянным. Таким образом, удлинение ГС может привести к уменьшению обводненности добываемой жидкости.

Апробация результатов на Коробковском участке Бавлинского месторождения

Для подтверждения правильности полученных результатов сравним их с фактическими дебитами скважин. Если учитывать, что обязательным условием для использования является равномерный параллелограмм заводнения, то наиболее приемлемым для апробации является Коробковский участок

Бавлинского месторождения, где в качестве элемента разработки используется модифицированный пятиточечный элемент заводнения (Рисунок 6Рисунок).

После сдвига элемента заводнения на начало координат получим следующие координаты мнимых добывающих скважин

$$q_n : \left(\frac{2 * a - L + h * (2 * n - 1)}{2}, 0 \right) n \in [0, N],$$

$$q_n : \left(0, \frac{2 * a - L + h * (2 * n - 1)}{2}\right) \quad n \in [0, N]$$

и одной нагнетательной скважины равной

$$q_0: (a, a),$$

где элемент заводнения равен $2 * a$, все остальные обозначения остаются прежними.

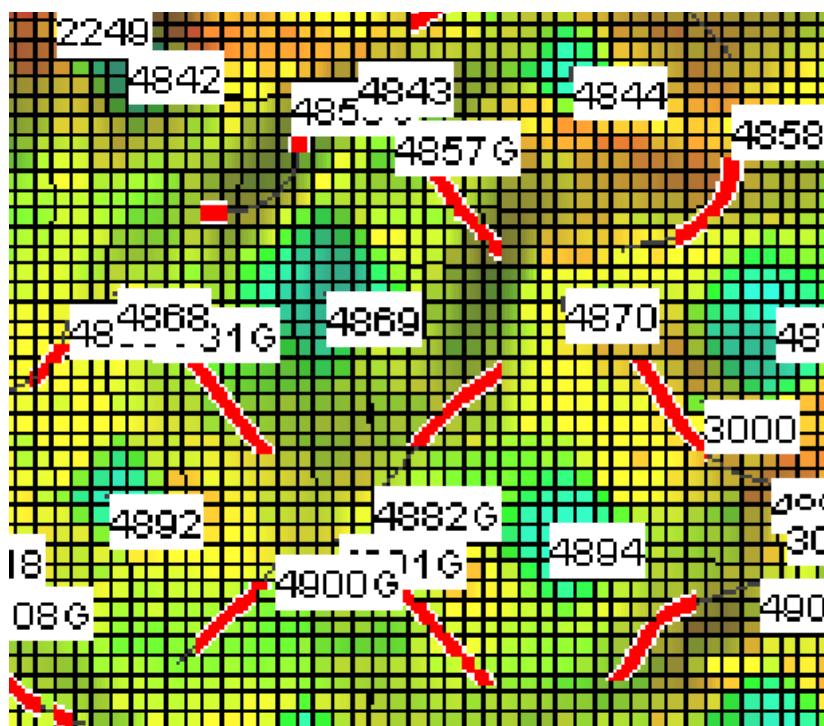


Рисунок 6 – Пятиточечный элемент заводнения в Коробковском участке
Бавлинского месторождения

Относительные фазовые проницаемости Коробковского месторождения Бавлинского месторождения приведены на рисунке 7.

В трудах М.И. Швидлера и А.В. Лифантьева показаны подробные формулы учета неоднородности проницаемости:

$$q = q_0(1 - \lambda), \quad (13)$$

где q – дебит неоднородного пласта; q_0 – дебит соответствующего однородного пласта; λ – безразмерное смещение дебита.

$$\lambda = \frac{1}{2} \left[1 - \varphi \left(\frac{l}{a} \right) \right] v^2, \quad (14)$$

где l – длина потока; a – ширина потока; ν – коэффициент вариации проницаемости. В трудах М.И. Швидлера исследованы различные фильтрационные потоки, приводятся формулы расчета для функции $\varphi(l/a)$.

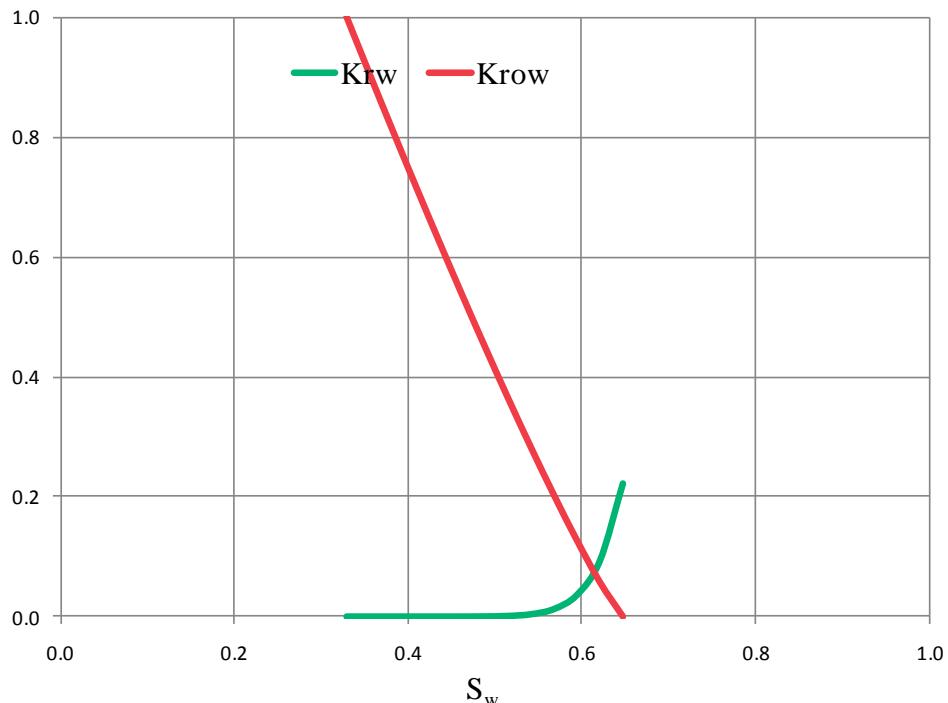


Рисунок 7 – Относительные фазовые проницаемости

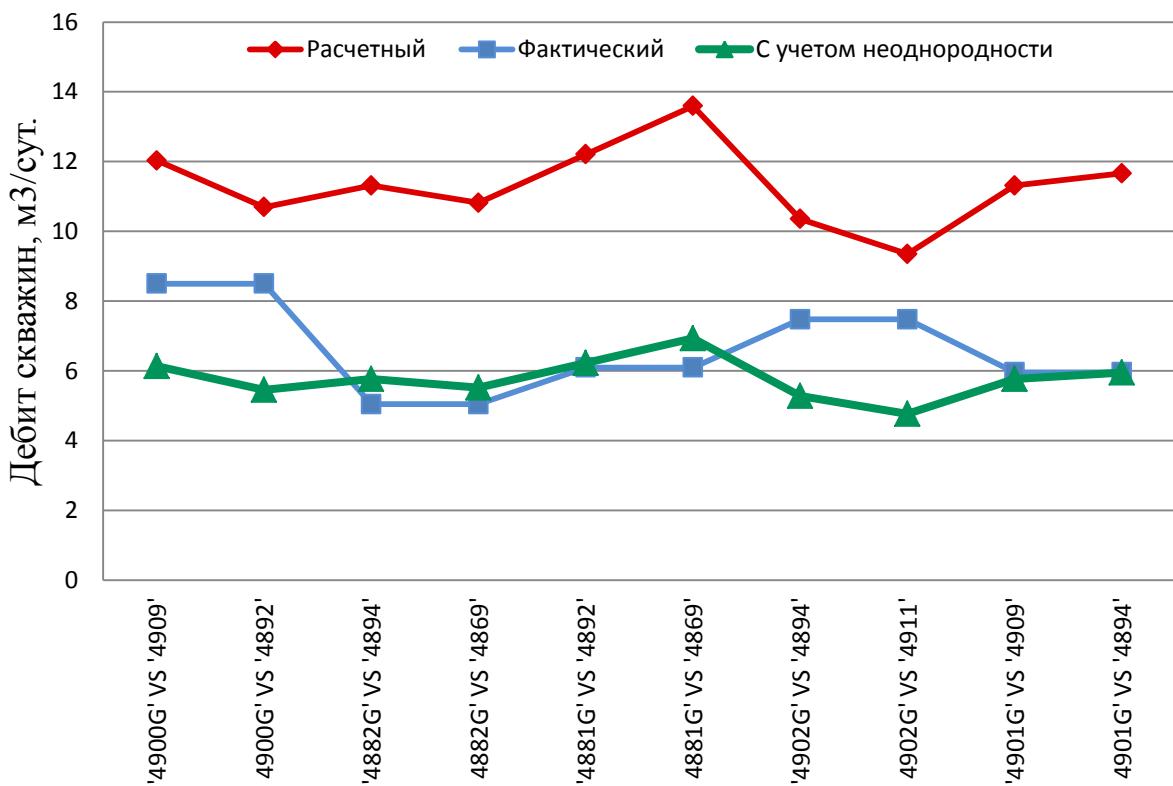


Рисунок 8 – Фактические и расчетные дебиты скважин Коробковского участка Бавлинского месторождения после учета неоднородности по проницаемости

Используя эти исследования и применив для условий разработки Коробковского участка получим, что $q = 0.51 * q_0$. Используя этот факт,

получаем приемлемое совпадение расчетных и фактических дебитов ГС в элементе заводнения (Рисунок 8).

В четвертой главе описывается теория построения области Вороного для ГС, разработанная автором диссертационной работы.

Кривая Безье – параметрическая кривая, задаваемая выражением

$$B(t) = \sum_{i=0}^n P_i b_{i,n}(t), \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (15)$$

Где P_i – функция компонент векторов опорных шин, а $b_{i,n}(t)$ – базисные функции кривой Безье, называемые также полиномами Бернштейна.

$$b_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i}$$

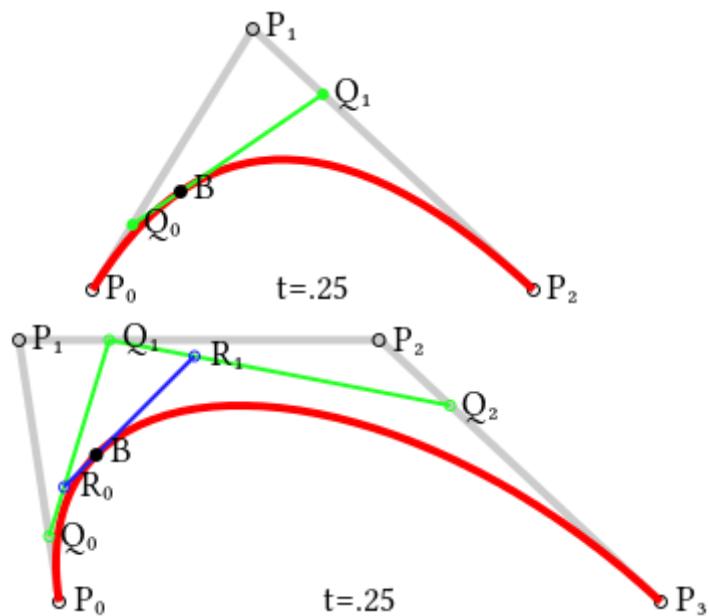
где

(16)

$$\binom{n}{i} = \frac{n!}{i! (n-i)!}$$

$\binom{n}{i}$ – число сочетаний из n по i , где n – степень полинома, i – порядковый номер опорной шины.

Кривые Безье строятся так, что кривая не будет проходить через контрольные точки. Это означает, что траектория скважины, построенная с помощью этой методики, не будет проходить через точки представленные данными телеметрии. Но кривые Безье имеют очень большую точность при большом количестве опорных точек и когда опорные точки расположены так, что кривизна минимальна, коими являются ГС. На рисунке 9 представлены кривые для 3-х, 4-х и 5-ти точек при $t = 0,25$.



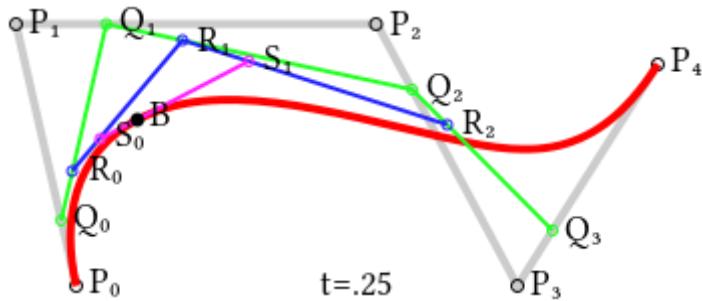


Рисунок 9 – Построение кривых Безье

Метод моделирования

Отличительной особенностью от других способов построения кривых по заданным точкам является простота и высокая производительность реализации в программных модулях. А также наибольшую ценность представляет возможность определения координат в любой точке используя только длину кривой через параметрическую переменную $0 \leq t \leq 1$, что упрощает решение задачи нахождения мнимой скважины в любой точке движения ГС и для любых промежуточных данных телеметрии. В частности данные телеметрии в ПАО «Татнефть» встречаются с шагом 5, 20 метров. Толщина пласта продуктивной части в среднем варьируется от 5 до 40 метров. Таким образом, разбивание ГС на мнимые скважины традиционными геометрическими методами становятся очень громоздкими от точки к точке. К тому же геометрические методы не могут учесть кривизну расположения ГС. Ниже показано (Рисунок 10), с какими трудностями можно столкнуться при решении этой задачи геометрическими методами для ГС с данными телеметрии по $\Delta = 20$ метров и толщиной пласта $h = 15$ метров уже при нахождении координат третьей мнимой BC.

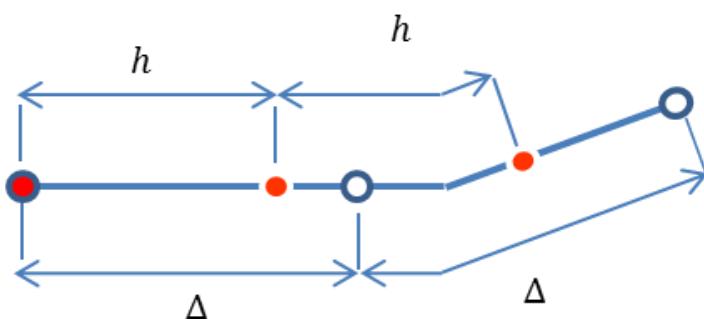


Рисунок 10 – Модель горизонтальной скважины

На рисунке 11 представлена траектория расположения ГС по фактическим данным и кривой Безье. Для наглядности от X вычтено 60000, а Y умножено на (-1) . В ходе работы написана программа ЭВМ для расчета траектории кривой Безье.

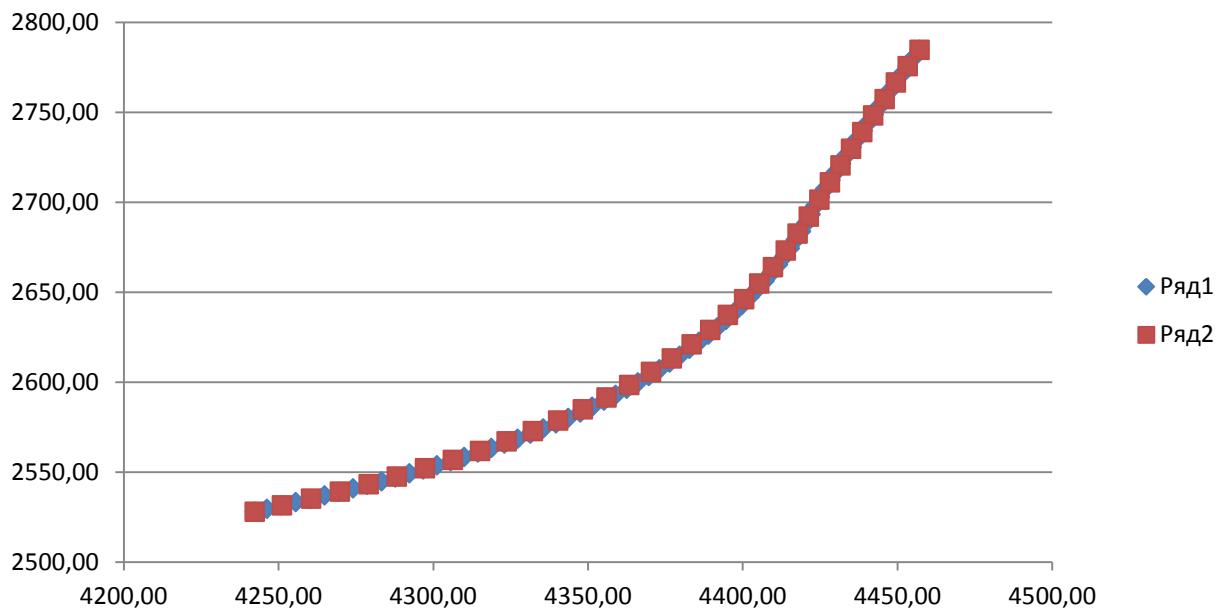


Рисунок 11 – Траектория расположения горизонтальной скважины №3009G продуктивной части Коробковского участка Бавлинского месторождения ПАО «Татнефть». Ряд 1 – фактические данные, Ряд 2 – кривая Безье.

После нахождения координат расположения мнимых ВС с помощью кривых Безье, области Вороного для каждой вертикальной мнимой скважины рассчитывается отдельно. Области Вороного строятся следующим образом:

- 1) Определяем граничащие скважины.

Для мнимой j -й ВС граничащим от ГС, которой оно принадлежит, будут только соседние скважины с номерами $j - 1$ и $j + 1$.

- 2) Находим угол α_i для каждой граничащей скважины относительно прямой параллельной оси 0X (Рисунок 12).

3) С помощью оконных функций сортируя полученный набор данных относительно угла α_i определяем родительские и дочерние строки по возрастанию угла α_i (расчеты велись на SQL СУБД PostgreSQL).

4) Используя иерархические запросы (SQL СУБД PostgreSQL) определяем все необходимые вершины треугольников для расчета области Вороного.

5) Вычисляем граничные точки области Вороного и относительно возрастания угла α_i соединяем отрезки и получаем область Вороного (Рисунок 12).

6) Области Вороного мнимых ВС принадлежащих одной ГС объединяем в одну область.

Преимуществом данной методики является то, что исключаются из рассмотрения такие треугольники как $\Delta 042$, $\Delta 036$, т. е. те, которые включают

внутри себя другие треугольники (Рисунок 12), что, безусловно, положительно влияет на производительность и сокращает время расчетов для больших месторождений при реализации программных продуктов.

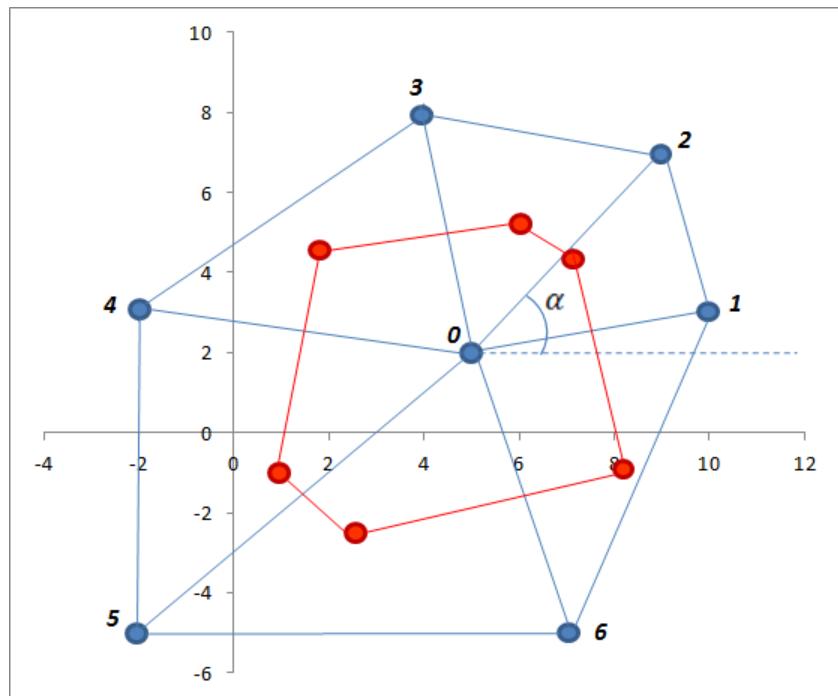


Рисунок 12 – Построение области Вороного

Пример: рассмотрим пример расчета области Вороного для скважин 3030, 3025, 4933G, 4935, 4936G и 3027 Бавлинского месторождения:

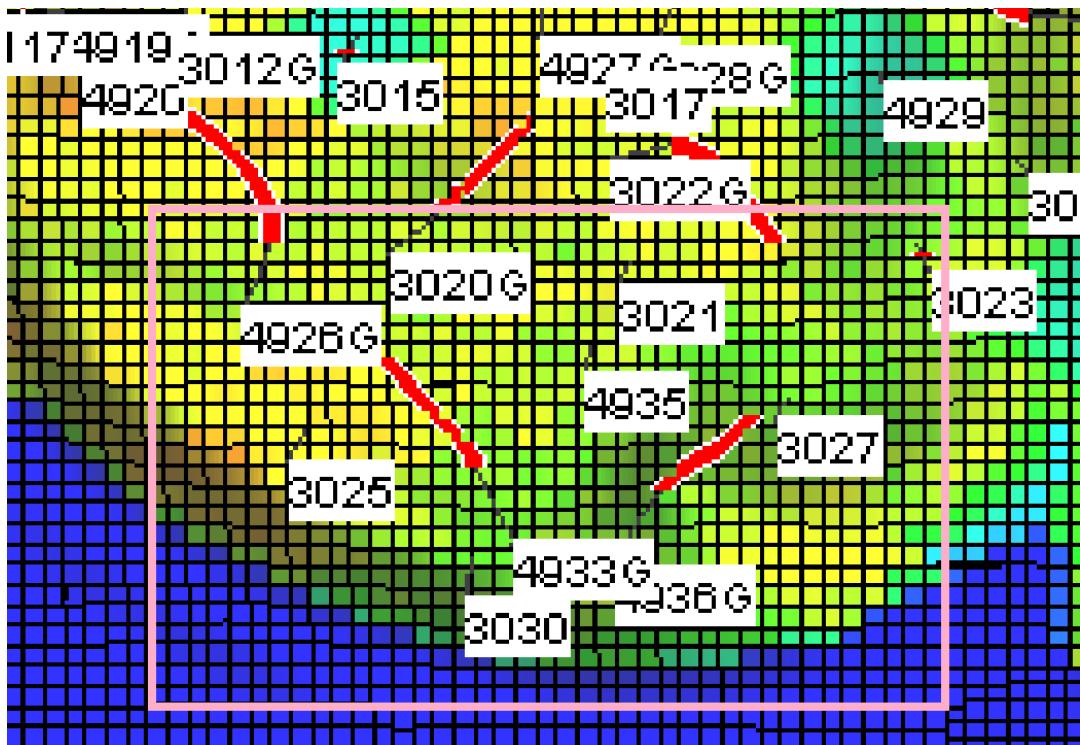


Рисунок 13 – Рассматриваемый участок

Скважины 4933G и 4936G являются горизонтальными.

Область Вороного, рассчитанный по забоям скважин приведен на рисунке 14:

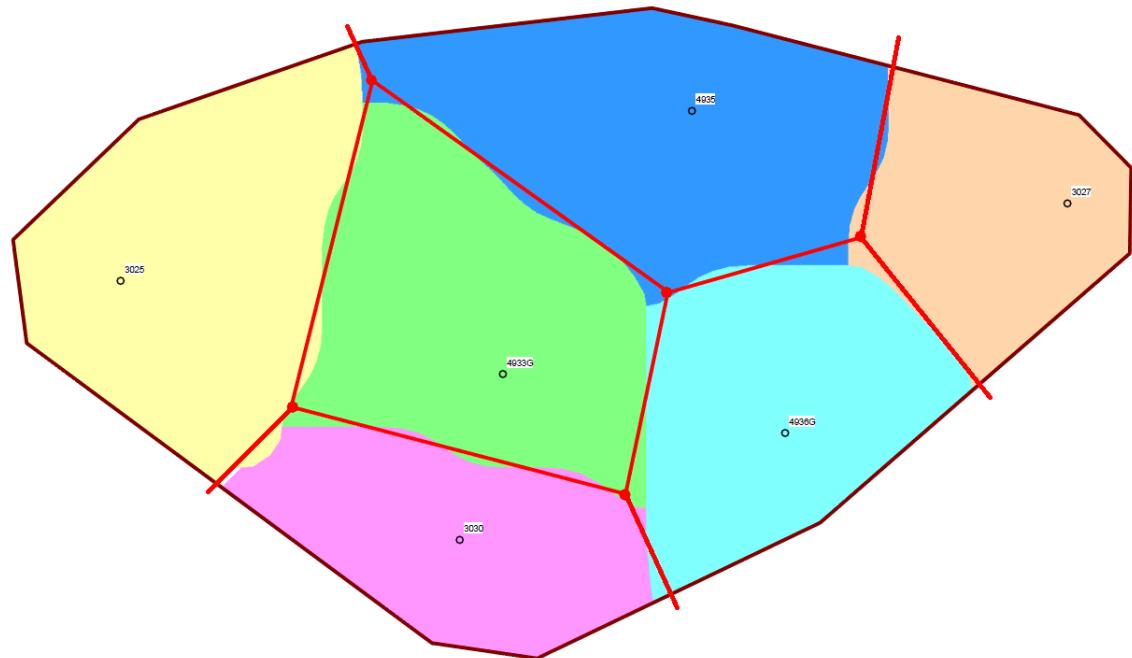


Рисунок 14 – Область Вороного по забоям скважин

Область Вороного, рассчитанный через кривые Безье для ГС изображен на рисунке 15:

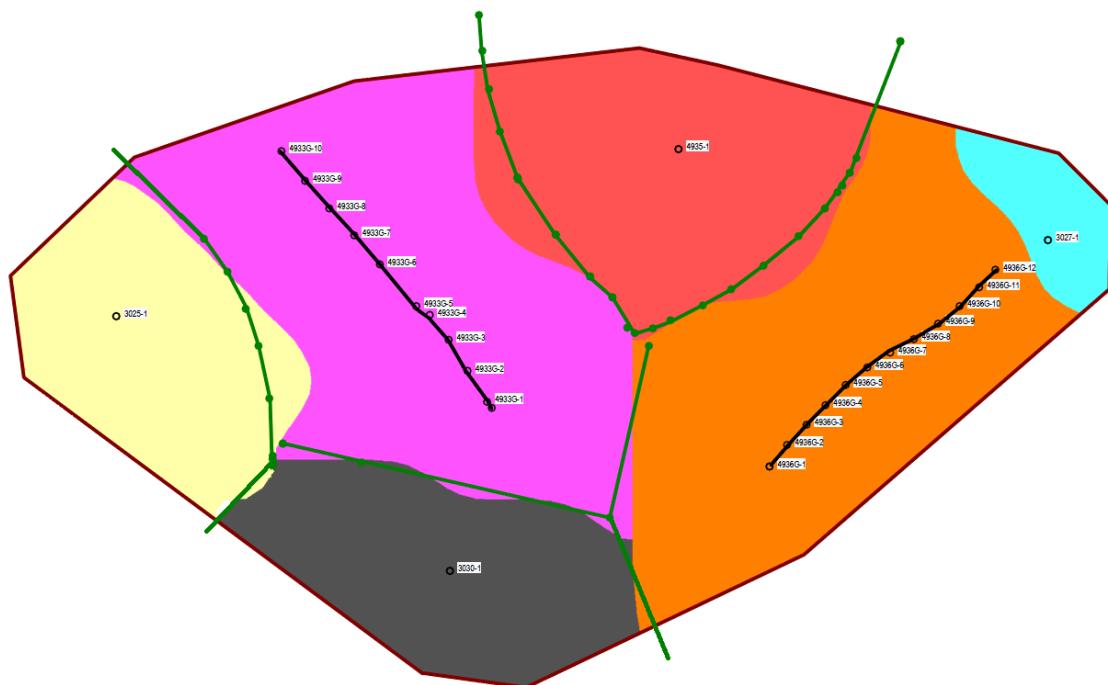


Рисунок 15 – Область Вороного построенный через кривые Безье

<i>Метод расчета области Вороного</i>	<i>Площадь</i>
По одной точке	105 728
MapManager	154 105
По кривой Безье	165 334

Приведенный пример отражает большую точность полученных результатов с практической точки зрения и в то же время выявляет недостатки используемых программных продуктов и рекомендует себя как более совершенный инструмент при разработке нефтяных месторождений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана новая методика определения комплексного потенциала течения совместно с уравнением фильтрации однородной жидкости через прямолинейную макротрещину для ГС при площадных системах заводнения, отличающийся возможностью обоснования заложения ГС на любых стадиях разработки. На данной основе показан пример расчета дебита одной ГС в пятиточечном элементе заводнения, где модель ГС не является периодически повторяемым.

2. Создана новая методика моделирования элемента заводнения при разработке месторождения ГС и/или ВС, где ГС представляются как мнимые ВС, расположенные вдоль траектории скважины с расстоянием между ними равной толщине пласта. Полученная методика позволяет моделировать любой элемент заводнения с регулярным расположением ГС.

3. Получена аналитическая формула для определения дебита в пятиточечном элементе заводнения при разработке с ВС и ГС.

4. Исследованы особенности притока к ГС для различных соотношений толщины пласта и длины ствола скважины. Показано, что наиболее оптимальным соотношением длины ГС и дебита для рассматриваемого примера является длина ГС равной примерно 5-7 частям толщины пласта, после которого рост дебита скважины резко снижается.

5. Усовершенствована методика построения области дренирования ГС с использованием сетки Вороного и кривых Безье для построения карт разработки нефтяных месторождений.

6. Полученные результаты апробированы на Коробковском участке Бавлинского месторождения. Показано, что результаты расчетов с большой точностью близки к фактическим данным.

7. Созданные программные модули интегрированы в программный продукт «Нефтяной калькулятор» и внедрены во все НГДУ ПАО «Татнефть» для поддержки задач регулирования и управления разработкой.

8. Материалы диссертации используются в учебном процессе Альметьевского государственного нефтяного института для подготовки студентов по направлению «Нефтегазовое дело».

Основные результаты работы опубликованы в следующих научных трудах:

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

1. Насыбуллин, А.В. К определению дебита горизонтальной скважины на установившемся режиме в элементе заводнения [Текст] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Георесурсы. – 2015. – № 4, т. 2. – С. 35-38.

2. Насыбуллин, А.В. Дебит горизонтальной скважины в пятиточечной системе заводнения [Текст] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – № 5. – С. 41-44.

3. Насыбуллин, А.В. Определение дебита горизонтальной скважины на установившемся режиме в элементе заводнения [Текст] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Экспозиция Нефть Газ. – 2016. – № 6. – С. 77-79.

Свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

4. **Свидетельство 2016610774, Российская Федерация.** Horizontal_Debit [Текст] / Войкин В.Ф., Насыбуллин А.В., Саттаров Р.З. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. – № 2015661452 ; заявл. 25.11.2015 ; зарег. 19.01.2016, Реестр программ для ЭВМ.

5. **Свидетельство 2017619126, Российская Федерация.** ProdFractHorizWellFivePoint [Текст] / Войкин В.Ф., Насыбуллин А.В., Миахтакова К.В. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. – № 2017616330 ; заявл. 28.06.2017 ; зарег. 15.08.2017., Реестр программ для ЭВМ.

6. **Свидетельство 2016614736, Российская Федерация.** Расчет области Вороного с использованием кривых Безье [Текст] / Войкин В.Ф., Насыбуллин А.В., Ситникова В.М., Миахтакова К.В. ; заявитель и патентообладатель ПАО «Татнефть» им. В.Д. Шашина. – № 2016611993 ; заявл. 10.03.2016 ; зарег. 04.05.2016, Реестр программ для ЭВМ.

Публикации в других научно-технических изданиях:

7. Войкин, В.Ф. Формула дебита горизонтальной скважины при площадном заводнении [Электронный ресурс] / В.Ф. Войкин // Аспирант. – 2015. – № 10 (15). – С. 81-83. – Режим доступа: <http://nauka-prioritet.ru/wp-content/uploads/2016/09/%D0%9D%D0%BE%D1%8F%D0%B1%D1%80%D1%8C-2015.pdf>. – Загл. с экрана.

8. Насыбуллин, А.В. Дебит многозабойной горизонтальной скважины в пяти и семи точечном элементах [Электронный ресурс] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Нефтяная провинция. – 2015. – № 3. – Режим доступа:

http://media.wix.com/ugd/2e67f9_b26dea485f5b4926b27c1c007e33fb7a.pdf. – Загл. с экрана.

9. Насыбуллин, А.В. О расчете области Вороного для горизонтальных скважин с помощью кривых Безье [Текст] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Развитие науки в XXI веке : сб. ст. XV междунар. заоч. конф., г. Харьков, Украина, 15 июля 2016 г. – Харьков : НИЦ «Знание», 2016. – Ч. 1. – С. 84-88.

10. Войкин, В.Ф. Методика расчета области Вороного для горизонтальных скважин с помощью кривых Безье [Электронный ресурс] / В.Ф. Войкин, Д.Т. Киямова // Молодежная научно-практическая конференция института «ТатНИПИнефть» : Секция № 1 «Геология, разработка нефтяных и нефтегазовых месторождений». – Бугульма, 2016. – 8 с. – Режим доступа: <http://10.2.1.52/upload/sms/2016/geol/004.pdf>. – Загл. с экрана.

11. Войкин, В.Ф. Дебит горизонтальной скважины в регулярных системах размещения скважин [Текст] / В.Ф. Войкин // Энергия молодежи для нефтегазовой индустрии : сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. молодых ученых, приуроченной к 60-летию высшего нефтегазового образования в Республике Татарстан, 26-29 сент. 2016 г. – Альметьевск : АГНИ, 2016. – С. 77-78.

12. Насыбуллин, А.В. Уравнение комплексного потенциала течения к макротрещине бесконечной проницаемости в площадной системе закачки [Текст] / А.В. Насыбуллин, В.Ф. Войкин // Нефть. Газ. Новации. – № 12. – С. 39-41.

13. Войкин, В.Ф. Формула дебита горизонтальной скважины при площадном заводнении [Текст] / В.Ф. Войкин, А.В. Насыбуллин // Инновации в разведке и разработке нефтяных и газовых месторождений : материалы Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 100-летию со дня рождения В.Д. Шашина, 7-8 сент. 2016 г., г. Казань : в 2 т. – Казань : Ихлас, 2016. – Т. 1. – С. 224-225.