

На правах рукописи
УДК

СУХОДАНОВА СВЕТЛАНА СЕРГЕЕВНА

**Создание 3D модели залежи с карбонатными трещиноватыми коллекторами
на основе комплексирования гидродинамических, геофизических,
сейсмических и промысловых данных (на примере нижнепермских
отложений Варандейского месторождения)**

Специальность 25.00.17 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва, 2016

Работа выполнена в ООО «ЛУКОЙЛ – Инжиниринг»

Научный руководитель: Сергей Григорьевич Вольпин, кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО «ЦГДИ «Информпласт», г. Москва; заведующий отделом гидродинамических исследований и моделирования ФНЦ НИИ системных исследований РАН, г. Москва.

Официальные оппоненты:

- **Сумбат Набиевич Закиров**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории газонефтеконденсатоотдачи Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ФГБУН ИПНГ РАН).

- **Петр Вадимович Пятибратов**, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных месторождений Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (НИУ) Российского государственного университета нефти и газа имени И.М.Губкина (ФГБОУВО РГУНГ (НИУ) имени И.М.Губкина).

Ведущая организация: Акционерное общество «Всероссийский нефтегазовый научно-исследовательский институт имени академика А.П.Крылова».

Защита состоится: « ____ » _____ 2016 г.

на заседании Диссертационного Совета Д.002.076.01 Института проблем нефти и газа Российской Академии Наук в зале Ученого Совета по адресу: 119333, г. Москва, ул. Губкина 3. Тел. 8(499) 135-54-67.

С диссертацией можно ознакомиться у ученого секретаря совета и на сайте ИПНГ РАН (<http://www.ipng.ru/>).

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Д.002.076.01, канд. техн. наук

М.Н. Баганова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

На сегодняшний день общеизвестно, что в условиях современных подходов к разработке месторождений углеводородов главным в критерии рациональности, по-прежнему, остается требование полной выработки утвержденных запасов нефти при максимальной экономической рентабельности. Одним из наиболее важных и основных инструментов управления разработкой месторождений углеводородов является компьютерное геолого-гидродинамическое моделирование коллекторов. Зачастую от качества построения геолого-гидродинамической модели во многом зависит применение той или иной системы разработки на каждом конкретном месторождении, система и технология разбуривания залежи, а также прогнозирование уровней добычи нефти, включая экономическую оценку эффективности проведения предполагаемых геолого-технологических мероприятий (ГТМ).

Основным требованием при построении геолого-гидродинамической модели является ее детализация. Совершенствование методов, технологий исследования и, как следствие, повышение достоверности результатов сейсмических, геолого-геофизических и промысловых данных ставит перед инженерами задачу расширения объема используемой входной информации. Это снижает неопределенности, связанные с геологическим строением коллекторов, что способствует совершенствованию системы выработки запасов в целом.

При проектировании разработки месторождения немаловажным является знание об интенсивности распространения и фильтрационных особенностях системы каналов и трещин в пласте. Особенно актуальным данный вопрос остается для карбонатных коллекторов, в которых наличие трещиноватости приурочено к естественному геологическому процессу формирования залежи. Показательным примером таких типов коллекторов являются нижнепермские отложения Варандейского месторождения.

Цель работы

В связи с необходимостью устранения имеющихся неопределенностей, связанных с фильтрационной неоднородностью залежи нижнепермских отложений Варандейского месторождения, обусловленной наличием развитой системы каналов и трещин, необходимо выработать и обосновать подход, повышающий достоверность геолого-фильтрационной модели такой залежи углеводородов на основе использования результатов анализа высокоинформативных ГДИС (гидродинамических исследований скважин), интерпретации сейсмических и геофизических данных в реальных промысловых условиях.

Основные задачи исследования

1. Определение зависимости между сейсмическими атрибутами и фильтрационными параметрами пласта, полученными по результатам комплексирования высокоинформативных ГДИС.
2. Выявление источников обводнения скважин на основании сопоставления результатов комплексных промысловых и сейсмических исследований.
3. Анализ и учет особенностей фильтрации жидкости в трещиноватом коллекторе нижнепермских отложений Варандейского месторождения.
4. Проведение гидродинамических расчетов на основе детализированной геолого-фильтрационной модели с целью оценки качества созданной модели трещиноватости в коллекторе по степени сходимости расчетных и фактических показателей работы скважин и залежи в целом.
5. Сравнительная оценка созданной и существующих фильтрационных моделей, а также сопоставление прогнозных дебитов вновь пробуренных скважин с их фактическими величинами.

Методологическая основа диссертационного исследования и методы исследования

Для решения поставленных задач применялись теоретические и экспериментальные методы исследования.

Теоретические методы исследования базировались на анализе

отечественного и зарубежного опыта в рамках выбранной области исследования, обобщении имеющегося математического описания соответствующих процессов, каким-либо образом связанных с решением поставленных задач. Специальные исследования применялись для интерпретации и изучения геолого-геофизической, промысловой и сейсмической информации, а также в процессе оценки результатов высокоинформативных гидродинамических исследований (ГДИС) скважин.

К экспериментальным исследованиям относились как построение детальной геолого-фильтрационной модели по результатам комплексирования теоретических и специальных исследований, так и последующее гидродинамическое моделирование и сопоставление не только динамики выработки запасов за историю разработки залежи, но и подтвержденных в процессе бурения прогнозируемых дебитов новых скважин. В рамках данных исследований использовались такие программные продукты как Irap RMS и Tempest MORE (ROXAR), Petrel (Schlumberger).

Достоверность полученных результатов

Положения, выводы и рекомендации работы не выходят за пределы современных методик, позволяющих обрабатывать большие массивы различных геолого-геофизических, гидродинамических и промысловых данных. Решение поставленных задач выполнялось в условиях соблюдения корректности применения необходимых методов математической статистики и теории распознавания образов, с полным использованием программных комплексов, позволяющих построить адекватные геолого-гидродинамические модели.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается использованием качественной входной информации, полученной путем применения высокоинформативных средств измерения и расчета. Достоверность предлагаемого подхода обоснована не только хорошей сходимостью расчетных и фактических показателей истории работы скважин и залежи в целом, но и подтверждением прогнозных показателей разработки по вновь пробуренным скважинам. Рассматриваемые положения работы стали основой

совершенствования системы разработки нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

Научная новизна работы

1. Предложен новый, нетрадиционный подход комплексирования геолого-геофизической, сейсмической и промысловой информации с целью детализации геологического строения и трассировки системы каналов и трещин в условиях нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

2. Впервые выявлена зависимость между параметром сейсмического атрибута и фильтрационными характеристиками коллектора для нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

3. Впервые в условиях карбонатных отложений Варандейского месторождения с помощью гидродинамической модели одинарной среды описана особенность фильтрации жидкости в системе «матрица-трещина».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Рекомендация по использованию зависимости между величинами сейсмического атрибута и проницаемостью, получаемой по результатам гидродинамических исследований, для уточнения распределения фильтрационных параметров в геолого-гидродинамической модели, обоснованное на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

2. Доказательство возможности использования не только модифицированных ОФП (относительных фазовых проницаемостей), но и распределения высокопроницаемых зон, выявляемых на основе комплексирования гидродинамических и сейсмических исследований, для описания интенсивности притока воды из нижележащего водоносного горизонта по системе каналов и трещин на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

Практическая значимость и внедрение результатов работы

Создана детальная геолого-фильтрационная модель сложно-построенного карбонатного коллектора Варандейского месторождения на основе комплексирования большого объема входных данных и использования их с целью уточнения геологического строения залежи. Скорректирована существующая

система разработки для обеспечения полной выработки извлекаемых запасов в пласте, спрогнозированы показатели работы вновь пробуренных скважин.

Полученные результаты активно используются на Варандейском месторождении при проектировании разработки, проведении ГТМ и выборе новых скважин для бурения. С помощью применяемого подхода к описанию геолого-фильтрационных свойств системы каналов и трещин удалось снизить показатели, связанные с неэффективностью выработки запасов, повысить качество работы формирующейся системы ППД и спланировать программу бурения и ГТМ для новых скважин. Разработанные в настоящей работе подходы к детализации фильтрационного пространства карбонатного коллектора начали успешно применяться на других месторождениях Тимано-Печорской провинции.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались на Ученом Совете ООО «ЛУКОЙЛ – Инжиниринг», Ученых Советах и совещаниях ООО «ЛУКОЙЛ – Западная Сибирь», ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, в ИПНГ РАН, а также на всероссийских и международных научно-технических конференциях и симпозиумах по совершенствованию подходов к разработке сложно построенных карбонатных коллекторов (Техническая конференция SPE "Разработка месторождений с карбонатными отложениями – новые рубежи», Москва 2015 г.; VIII Научно-практическая конференция «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений» Уфа, 2015 г.; V Международный научный симпозиум «Теория и практика применения методов увеличения нефтеотдачи пластов», Москва 2015г. и др.).

Благодарности

Огромная благодарность научному руководителю работы С. Г. Вольпину за неоценимую помощь и вклад при выполнении данной работы, а также коллегам ЗАО «ЦГДИ «Информпласт», которые с большим интересом разделяли стремления автора в данном исследовании. Особая благодарность Д. А. Метту, без которого данная работа была бы невозможна. Автор благодарит В.С.

Славкина, коллег ООО «ЛУКОЙЛ-Коми», И.Ю. Хромову, А.И. Чуйко за помощь, внимание и за ценные комментарии. Автор признательна сотрудникам ИПНГ РАН, доктору технических наук Э.С. Закирову, доктору технических наук И.М. Индрупскому, а также доктору технических наук А.М. Свалову за участие в завершении работы и полезные советы.

Структура и объем работы

Работа состоит из 4 глав, введения и заключения. Содержание диссертации изложено на 157 страницах, в том числе 75 рисунков и 10 таблиц. Библиография насчитывает 122 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложена актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и основные задачи исследования, научная новизна, практическая ценность и реализация результатов работы.

Первая глава «Состояние решаемой проблемы. Литературный обзор» представляет собой обзор и соответствующий анализ способов моделирования природных резервуаров углеводородов.

1.1. Классификация методов моделирования

Моделирование – это процесс, под которым понимается замещение изучаемого оригинала (в нашем случае пласта, скважины и т.п.) его условным представлением, которое на практике мы и называем моделью. По своей сути методы моделирования можно разделить на три большие группы: аналитические, статистические и численные.

1.2. Аналитические методы моделирования

При аналитическом моделировании его результаты представляются в виде аналитических математических уравнений, формул, выражений. С середины 19 века и до начала 20 века исследования, проводимые А.Дарси, Ж.Дюпюи были связаны с изучением фильтрации жидкостей в однородных средах с фиктивным грунтом. В начале 20 века в работах Н.Н. Павловского была подробно описана практическая и научная значимость числа Рейнольдса. Данный параметр позволил

обозначить границы применимости закона Дарси. Дифференциальные уравнения движения газа и газированной жидкости в пласте впервые получены Л.С.Лейбензоном в 1934 г., а эмпирическая формула фильтрации Козени-Кармана в 1927-1938 гг. К середине 20 века результаты исследования теории движения жидкостей в пласте сформировались в отдельную отрасль науки, называемую «подземная гидромеханика», основателем которой можно считать М.Маскета.

Начиная с 1950х гг. исследования постепенно делятся на два основных направления. Первое описывает подходы к описанию движения флюидов в пласте на базе законов сохранения массы, момента и энергии (Р.Б.Берд, В.Е.Стюарт, Е.Н.Лайтфут, Х.Шлихтинг, А.И.Лурье, и др.). Второе рассматривает многофакторные процессы движения различных флюидов в неоднородных коллекторах (В.Н.Щелкачев, Ю.И.Стклянин, А.П.Телков, И.А.Чарный, А.М.Пирвердян, Г.И.Баренблатт, Ю.П.Желтов, К.С.Басниев, В.Н.Николаевский, Г.Б.Пыхачев, А.Х.Мирзаджанзаде и др.).

1.3. Статистические методы моделирования

Статистическое моделирование представляет собой многомерный регрессионный анализ, который позволяет на базе обобщения накопленного опыта за период разработки месторождений установить статистическую связь исследуемого параметра с большим числом факторов, оказывающих на него существенное влияние. Существующие статистические методы прогноза можно классифицировать по трем направлениям: прогнозирование добычи нефти объемным методом, прогнозирование по характеристикам вытеснения, прогнозирование по результатам закономерностей, полученных в ходе анализа фактических данных по добыче нефти.

1.4. Численные методы моделирования

В основе всех современных методов прогнозирования показателей разработки месторождений природных углеводородов лежат численные методы интегрирования соответствующих дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих процессы двухмерной или трехмерной многофазной фильтрации. Численные модели стали разрабатываться в середине 50-х годов

Писманом и Рэкфордом. Упрощенное моделирование пластовой системы было начато в работах М.Маскета (1937г.), в научных трудах Фейем и Пратц (1951г.), Херст (1953г.), Хиггинс и Лейтон (1962г.), Хаубер (1964г.), Паттономидр (1971г.) и Ле Бланк (1971г.).

Первые численные модели описывали одномерную однофазную фильтрацию жидкости в пласте (Вахитов (1957), Лapidус (1962г.), Смит (1965г.), Розенберг (1969), Амикс (1969г.), Митчел (1969г.) и др.

Изучением многофазной фильтрации занимались Азиз, Ричардсон и Стоун (1973г.). Изучению особенностей расчета двумерной однофазной фильтрации посвящены труды Эрлафера, Писмана, Рэчфорда и Дугласа, Ларкина, Барахата, Кларка, Квона и Картера и др. Над численным моделированием процессов двумерной многофазной фильтрации работали Коутс, Макдональд, Бэр (1972г.) Нолен и Бэрри и др. В этот же период исследователями Прайсом, Коутсом, Уоттенбаргером и Тырнау, Уайнштейном, Суаресом, Фарук Али и др. публикуются подходы, в той или иной степени описывающие решения для численного моделирования трехмерной многофазной фильтрации в пласте. В развитии композиционного моделирования участвовали Кац, Сеттари, Зигмунд, Бэр, Форстер, Лантц, Тодд и Логстафф (1972г.), Ван Ки, Нолен, Редлих и Квонг, Пенг, Робинсон, Соув (1972г.), Уилсон и др. Создание и описание моделей трещиноватых коллекторов начинают свою историю в работах Баренблатта, Желтова, Уоррена и Рута в 1963 г. Крафт и Хокинс также предлагают матрицу и трещину описывать отдельно, задавая для них соответствующие значения средних проницаемостей и пористостей, вводя тем самым понятие моделирования двойной среды.

В начале XXI века существенное развитие получило специальное программное обеспечение (Irap RMS, Tempest, PETREL, ECLIPSE), которое по сегодняшний день активно используется для моделирования процессов разработки. Современные программные продукты предоставили возможность соединить разнообразные источники данных и методы в одной модели.

Во второй главе «Теоретическое и методическое обоснование подходов к моделированию сложно построенных коллекторов с развитой системой каналов и трещин» рассмотрены основные способы моделирования пластовых систем, осложненных интенсивной трещиноватостью, применяемых на сегодняшний день как с целью детализации строения залежи, так и для уточнения распределения потоков пластовых флюидов.

Первые упоминания о трещиноватых коллекторах уходят еще в середину 19 века. В 1861 г. Е.Б.Эндрюс писал, что, если имеются многочисленные трещины вдоль простирания антиклинали, то это является одним из основных признаков существования условий для аккумуляции углеводородов. Он также показал, что существует прямая зависимость между величиной добычи нефти и количеством трещин.

Существует два основных подхода к моделированию трещиноватости: геостатистический и геомеханический. Результаты и геостатистического, и геомеханического способов описания системы каналов и трещин активно применяются в качестве входной информации при создании геолого-гидродинамических моделей коллекторов.

2.1 Геостатистические методы моделирования трещиноватости коллекторов

На геостатистическом подходе к моделированию распределения трещин в коллекторе основано создание как эквивалентных моделей (так называемых моделей «одинарной пористости»), так и моделей двойной среды (модели двойной пористости или проницаемости). Геостатистический подход включает в себя методы детерминистического, полу-детерминистического и стохастического моделирования.

- Детерминистические методы базируются на интерполяции свойств в трехмерном пространстве согласно полученным скважинным данным, используя математические аппроксимации.

- Полу-детерминистические методы моделирования коллекторов основаны на методе так называемого «кригинга» (метод, обеспечивающий наименьшую

дисперсию ошибки), названного в честь южноафриканского горного инженера Дэни Криге. С одной стороны, это также является неким видом интерполяции. Однако, с другой стороны, если в детерминистическом подходе функция распределения задается явно, например, полиномом, то в рассматриваемом – неявно, используя математическое ожидание и вариограммный анализ.

- При стохастическом моделировании получают равновероятные пространственные представления того или иного параметра. Подобные подходы к моделированию могут быть использованы при сравнительно малой изученности объекта, при первичном подсчете запасов с целью вероятностной оценки. Безусловно, данный подход к описанию не только геологического строения залежи, но и распределения петрофизических свойств коллектора несут в себе немало ошибок, как, впрочем, и детерминистический метод.

Представленные выше методы описания распределения петрофизических свойств коллектора, в частности проницаемости для системы «матрица-трещина», вполне применимы как при построении модели одинарной пористости, так и при создании моделей двойной среды. Разница заключается в том, что в эквивалентной модели описание петрофизических свойств коллектора базируется на создании единого куба какого-либо свойства, который в полной мере описывал бы особенности как матрицы, так и трещин, тогда как в модели двойной среды свойства матрицы и трещины задаются отдельными геологическими кубами. В обоих случаях основной исходной информацией являются: каротажные кривые (АКШ, ВАК, FMI, кросс-дипольный каротаж и т.д.), геологическое строение пород, лабораторные исследования, результаты сейсмических, промысловых, геолого-геофизических исследований и др.

Анализ приведенных подходов позволяет отметить следующее:

- в существующих подходах к геостатистическому моделированию коллекторов отсутствует детальное описание локальных неоднородностей;
- учет сейсмической информации при создании ГГДМ является довольно посредственным и субъективным;
- зачастую выделение участков с высокой неоднородностью производится путем

локальной отрисовки полигонов, внутри которых задается определенное значение параметра коллектора, которое в большинстве случаев не отражает действительной картины распределения свойств в рассматриваемом пласте;

- ошибки при описании межскважинного пространства, что существенным образом влияет на распределение фильтрационных потоков и выработку запасов в целом.

2.2 Геомеханические методы моделирования трещиноватости коллекторов

Геомеханическое моделирование, в свою очередь, можно разделить на два основных направления: изучение природы распространения системы каналов и трещин в пласте путем исследования натуральных моделей, и путем палеореконструкций, примером которой может служить построение 3D модели трещиноватости на основе законов напряжений и стрессов. Основная задача такого подхода – оценка свойств горной породы по данным каротажей в совокупности с результатами лабораторных исследований керна.

Построение профиля напряжений происходит за счет различных эмпирических моделей, в соответствии с которыми калибруются лабораторные данные. Далее строится непрерывный профиль давления вышележащих пород, после которого переходят к прогнозированию порового давления, определению минимальных горизонтальных стрессов и величины давления разрыва. В силу отсутствия прямых методов измерения некоторой части входной информации и получения ее путем эмпирических вычислений, распределение системы каналов и трещин в результате расчетов может получиться весьма условное.

Следовательно, описание и прогнозирование системы каналов и трещин базируется на косвенном изучении особенностей дизъюнктивов в коллекторе.

В третьей главе «Особенность фильтрации жидкости в системе «матрица-трещина» в условиях карбонатных отложений Варандейского месторождения» приводится подход по повышению достоверности описания фильтрационных параметров при создании геолого-гидродинамической модели карбонатного резервуара путем учета сейсмической информации и результатов интерпретации высокоинформативных ГДИС.

На сегодня существует два основных подхода, на которых базируется распределение литологических и петрофизических свойств коллектора в геологической модели: вероятностно-стохастический способ и метод интерполяционный. И в том, и в другом случае моделирование межскважинного пространства на основе скважинных данных сохраняет в себе рукотворные неопределенности. Особенно, если коллектор осложнен системой развитой трещиноватости. Поэтому одной из наиболее значимых характеристик пласта, от которой напрямую зависит полнота выработки запасов углеводородов, остается параметр проницаемости.

Тематика данной главы определила следующие направления исследования:

- подтверждение достоверности сейсмической интерпретации с помощью данных высокоинформативных гидродинамических исследований;
- определение зависимости между сейсмическими параметрами и результатами высокоинформативных гидродинамических исследований скважин.

3.1 Подтверждение достоверности данных сейсмической интерпретации с помощью высокоинформативных гидродинамических исследований.

Принципиальное отличие высокоинформативных ГДИС от обычных гидродинамических исследований скважин заключается в следующем. Так, в первом случае, учитывается весь реальный период истории эксплуатации скважин, тогда как во втором – сравнительно небольшой. Немаловажной особенностью, которая выделяет высокоинформативные ГДИС, является радиус латерального охвата пласта исследованием. Погрешность результатов при выполнении измерений сравнительно мала. Проведение высокоинформативных ГДИС дает возможность наиболее адекватно определять фильтрационные особенности и параметры околоскважинной зоны пласта, а в случае гидропрослушивания – и межскважинные параметры пласта.

На начальных этапах настоящего исследования в попытке комплексирования имеющейся исходной информации стал процесс выбора сейсмического атрибута.

Данный этап заключался в сопоставлении аномалий, полученных по

результатам ГДИС и гидропрослушивания с картами различных сейсмических атрибутов.

Согласно данным интерпретации КВД было отмечено, что в районе скважин №1001 и №1002 текущая замеренная проницаемость коллектора равна 23 мД и 12 мД соответственно, тогда как в районе скважины №1006 – 9,3 Д. Наряду с полученными результатами, интерпретация КВД по скважине №1001 показала, что на расстоянии 680 м. проходит граница фильтрационной неоднородности. При изучении результатов интерпретации кривой восстановления давления по скважине №13G получены невысокие значения проницаемости, порядка 14,7 мД. Однако, согласно этим же данным, выявлено, что расстояние до границы фильтрационной неоднородности составляет всего 50 м.

Зафиксировав полученную информацию на схеме расположения скважин, необходимо было теперь приобщить к ней данные, полученные по результатам гидропрослушивания.

На рисунке 3.1 приведена схема промыслового эксперимента на нижнепермских отложениях Варандейского месторождения. В соответствие с промысловым экспериментом, гидропрослушивание проводилось в нескольких направлениях: от 1006 скважины к 13G, от 1006 – к 1002 и от 1006 – к 1001.

Результаты данного исследования показали, что в направлении скважин 1006-13G среднее значение проницаемости находится в пределах 806 мД, что в условиях рассматриваемого коллектора может говорить о наличии сети каналов и трещин на данном направлении. В свою очередь гидропрослушивание со стороны 1006 скважины в направлении 1002 показало отсутствие реакции, что при сопоставлении с результатами ГДИС в районе 1002 скважины предположительно свидетельствует об отсутствии высокопроводящих зон на этом участке залежи. Полученные замеры реакции между 1006 и 1001 скважинами показали их сообщаемость, с проницаемостью в 437 мД. Подобная неоднородность по фильтрационным параметрам пласта отмечалась еще при бурении скважин, когда рядом работающие добывающие скважины показывали заметную разницу в отборах жидкости. Таким образом, совмещение результатов ГДИС в скважинах и

данных, полученных по гидропрослушиванию межскважинного пространства, с сейсмическими атрибутами подтвердило наличие резкой фильтрационной неоднородности коллектора.

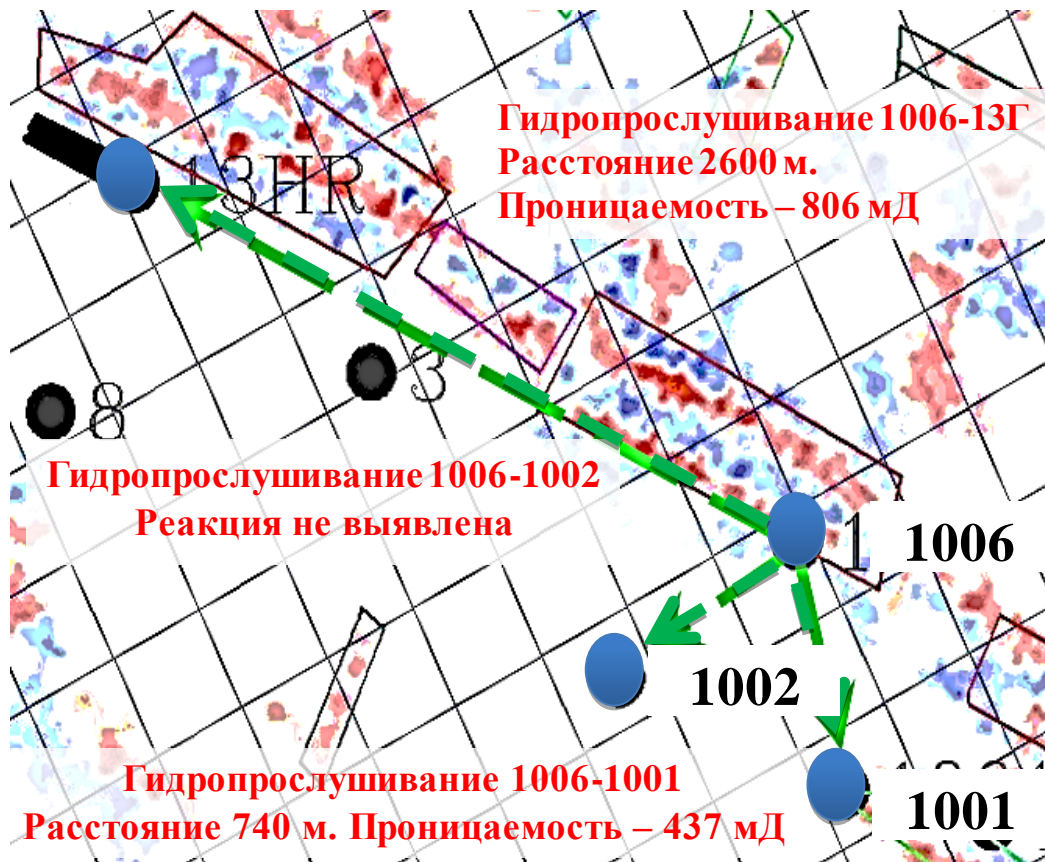


Рисунок 3.1 – Постановка промыслового эксперимента на Варандейском месторождении

Однако, наилучшее совмещение результатов интерпретации ГДИС, режимов работы скважин было отмечено с атрибутом дуплексных волн. Другими словами, главным критерием при выборе подходящего сейсмического атрибута являлся следующий принцип: если есть аномалия по результатам высокоинформативных ГДИС и она подтверждается при изучении сейсмического атрибута, значит атрибут заслуживает внимания. В публикациях Хромовой И.Ю. и Метта Д.А также можно ознакомиться с особенностями данного подхода.

Следующим шагом настоящего исследования стало взаимоувязывание данных сейсмической, геофизической и промысловой информации между собой и интегрирование их в геолого-гидродинамическую модель с целью повышения достоверности описания фильтрационной изменчивости рассматриваемого

коллектора.

3.2 Определение зависимости между сейсмическими параметрами и результатами высокоинформативных гидродинамических исследований скважин

В повседневной практике данные, полученные по керновому материалу и геофизическим исследованиям скважин, распределяются с помощью стохастических методов, что вносит значительные ошибки при описании межскважинного пространства. Наиболее перспективным методом с точки зрения описания распределения проницаемости в геолого-гидродинамических моделях представляется поиск зависимости между сейсмическим атрибутом и фильтрационными параметрами пласта.

Подход, рассматриваемый в настоящей работе, при правильно подобранном сейсмическом атрибуте позволяет довольно детально учесть характер изменения фильтрационных параметров коллектора. Согласно этому допущению, была принята во внимание гипотеза о наличии зависимости между интенсивностью фильтрационной неоднородности коллектора и сейсмическим атрибутом (в нашем случае атрибута дуплексных волн).

Как известно, при гидродинамических исследованиях определяется параметр гидропроводности. К сожалению, напрямую задать величину гидропроводности в геолого-гидродинамической модели не представляется возможным. Как следствие, при дальнейших расчетах для получения значения проницаемости в формулу Перрина вводится ряд параметров: нефтенасыщенная толщина, вязкость нефти, вязкость воды и, вместе с этим, текущие фазовые проницаемости по нефти и по воде.

Результаты пересчетов величин проницаемости по имеющимся параметрам гидропроводности приведены в таблице 3.1. Согласно представленной таблице 3.1, получена следующая искомая зависимость (рисунок 3.2). Логарифмируя величины на оси ординат, представленная экспоненциальная зависимость между величинами амплитуд дуплексных волн и проницаемостью принимает следующий вид на рисунке 3.3. По данным амплитуд дуплексных волн, согласно экспоненциальной зависимости, приведенной на рисунке 3.2, были определены

значения проницаемости в межскважинном пространстве.

Таблица 3.1

Результаты пересчетов величин проницаемости по имеющимся значениям гидропроводности, полученные по результатам интерпретации высокоинформативных ГДИС.

№ Сква.	Нэф, м	K _{ro}	K _{rw}	Гидропроводность, Д*см/сПз	Амплитуда дуплексной волны	Проницаемость по формуле, мД
11G	32	0.33	0.16	11.8	432	14.5
13G	42	0.38	0.11	12.5	448	14.7
1001	23	0.13	0.18	11.4	1120	23
1002	35	0.52	0.12	11.3	320	12
1006	16	0.01	0.37	6000	19082	9393
1003*	17	0.25	0.24	678	12053	1262

* - переинтерпретирована по результатам предшествующих ГДИ

Представленное на рисунке 3.4 поле проницаемости позволило наиболее адекватно описать особенности фильтрационной неоднородности рассматриваемого коллектора. Это внесло более четкое представление о характере распространения зон высоких проницаемостей на рассматриваемом объекте [2]. Необходимо также отметить, что информация, полученная по керновым данным, зачастую не отражает истинных значений проницаемости системы «порода-трещина».

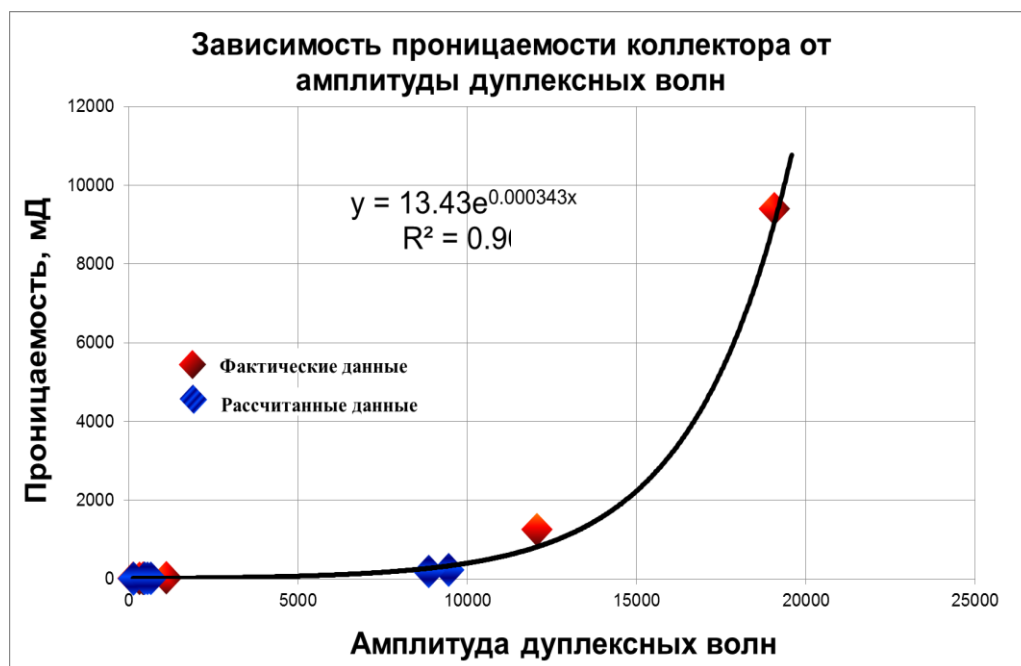


Рисунок 3.2 – графическая зависимость проницаемости коллектора от амплитуды дуплексных волн

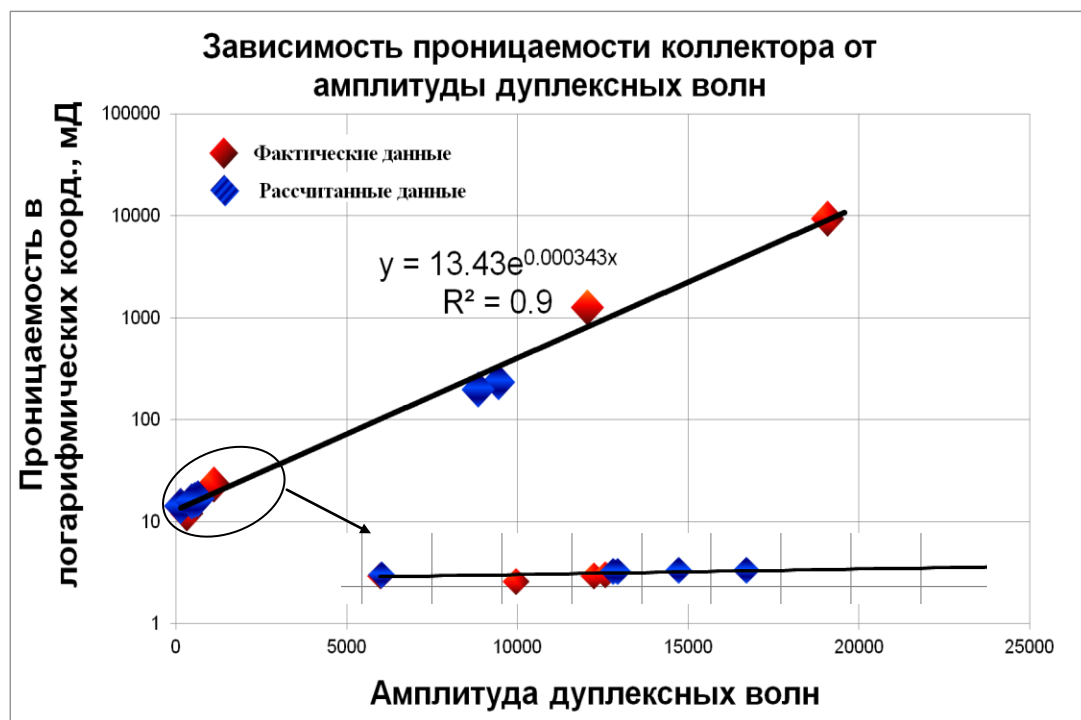


Рисунок 3.3 – графическая зависимость проницаемости коллектора от амплитуды дуплексных волн в полу-логарифмических координатах

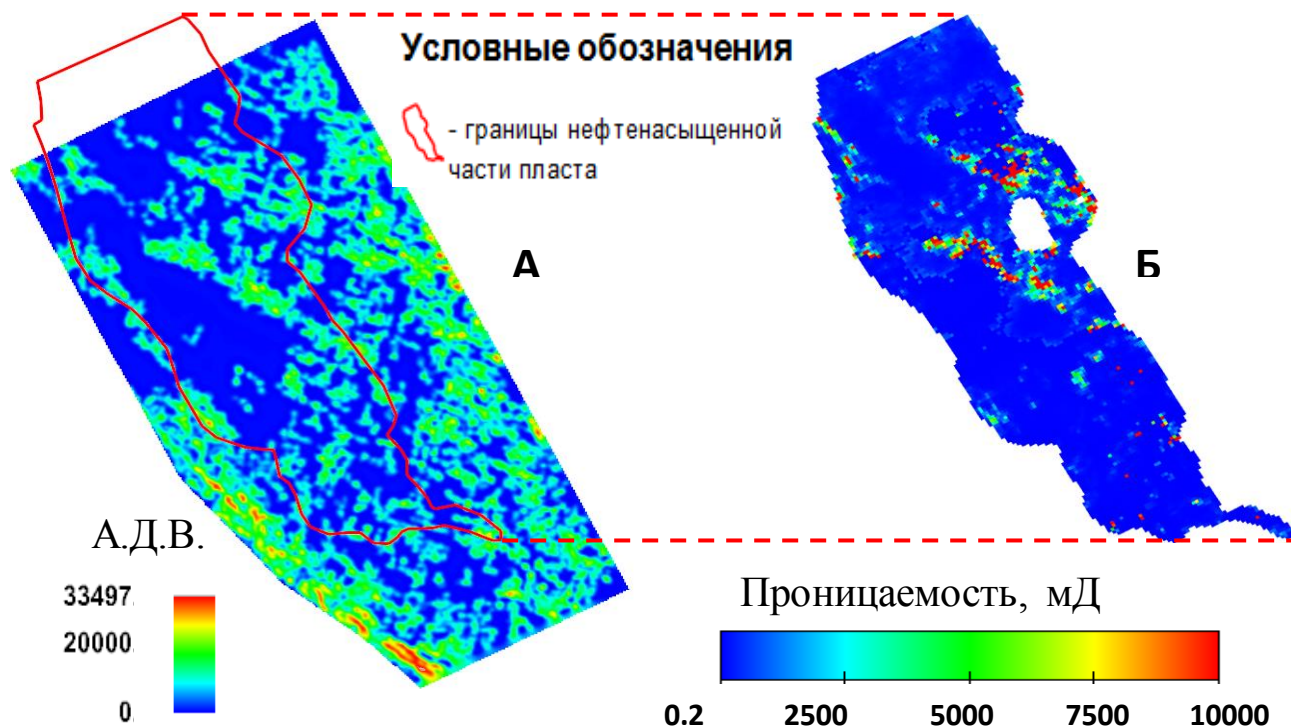


Рисунок 3.4 – Поле проницаемости, построенное согласно полученной зависимости между амплитудами дуплексных волн и проницаемостью

А)- карта амплитуд дуплексных волн

Б)- куб проницаемости

В результате, полученные средние значения коэффициентов проницаемости

по керну существенно отличаются от оценок проницаемости по гидродинамическим исследованиям скважин и не подтверждаются результатами эксплуатации скважин и энергетическим состоянием залежи в целом. Сказанное объясняется точечным характером керновых данных. Таким образом, в рамках данной главы можно отметить следующие моменты.

1) Комплексирование исходных геофизических, гидродинамических и сейсмических данных позволяет повысить степень описания распределения фильтрационной неоднородности в коллекторе, учитывая особенность перехода низко проницаемой матричной части пласта к высокопроницаемой.

2) Для повышения корректности описания параметра проницаемости в межскважинном пространстве целесообразно определять зависимость между сейсмическим атрибутом и результатами интерпретации гидродинамических исследований скважин.

В четвертой главе «Обоснование фильтрационных свойств системы каналов и трещин на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения» представлены особенности модификации относительных фазовых проницаемостей (ОФП) в условиях карбонатных трещиноватых коллекторов на примере объекта Р₁ Варандейского месторождения, а так же учтены закономерности влияния водоносного горизонта на показатели разработки залежи. В рамках настоящей главы также приведено обоснование наличия вертикальной трещиноватости, способствующей интенсивному притоку воды из водоносной области залежи к забоям добывающих скважин.

4.1 Выявление источников обводнения скважин на основании комплексирования результатов сейсмических, промысловых и керновых исследований.

Целью настоящего исследования было подтверждение наличия вертикальной составляющей системы каналов и трещин для нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

Разработка нижнепермских отложений ведется с 1999 года. В 2004 году, после проведения оптимизации системы разработки путем перевода скважин на

механизованную добычу (в основном на ЭЦН-45-1300) с высокими величинами депрессии на пласт (рисунок 4.1), был зафиксирован резкий рост обводненности по добывающему фонду скважин.

Детальное изучение результатов периодически выполняющегося комплекса промыслово-геофизических исследований показало, что нарушения герметичности эксплуатационной колонны были выявлены только в одной скважине. По результатам замеров, доля дополнительного притока воды с других горизонтов составила всего 12%, остальное – пластовая вода нижнепермских отложений. Как уже отмечалось выше, закачка на нижнепермском объекте организована только в 2012 году, и представлена только одной скважиной (№1006). В силу особенности ее расположения, в приразломной зоне залежи, особого влияния на добычу воды в соседних добывающих скважинах не наблюдалось.

Поэтапный анализ всей имеющейся информации позволил выдвинуть допущение о возможном прорыве воды по выявленной, в ходе комплексирования данных, системе развитой трещиноватости в коллекторе и последующем подтягивании конуса воды к ПЗП (призабойной зоне пласта) в силу высоких депрессий на забоях добывающих скважин. Согласно описанному подходу по уточнению интенсивности распространения зон трещиноватости в рассматриваемом коллекторе, утверждение о том, что резкое обводнение, связанное с продвижением воды по каналам и трещинам в пласте, является вполне обоснованным.

Керновые исследования показывают, что система каналов и трещин на месторождении характеризуется не только горизонтальной, но и вертикальной направленностью, что способствует притоку воды из водоносного пласта по высокопроводимой трещине в матрично-трещиноватую среду.

Дополнительно к сказанному, была выполнена оценка источников обводнения скважинной продукции на базе промысловых данных по характеристическим кривым Чена.

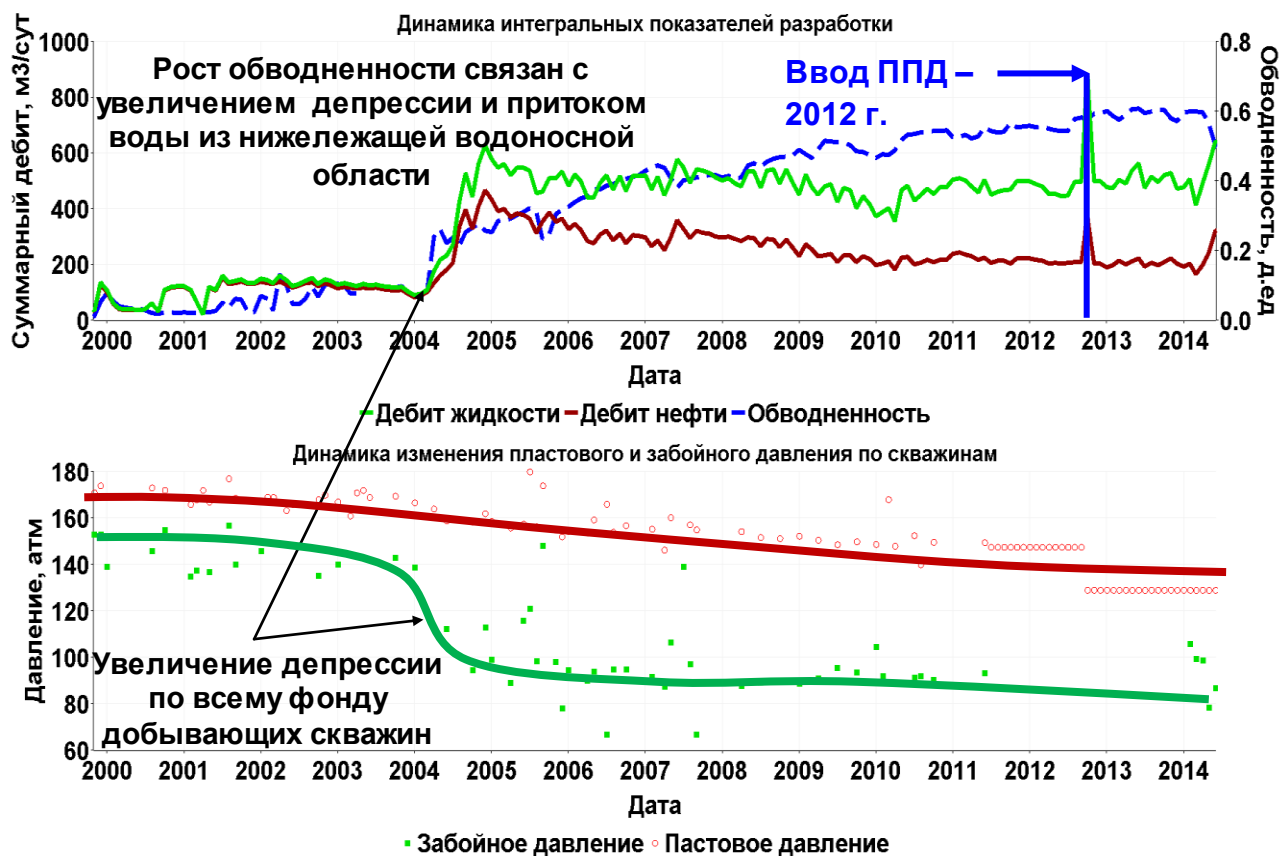


Рисунок 4.1 – Динамика изменения обводненности, дебитов, пластовых и забойных давлений за период разработки объекта P1 Варандейского месторождения

На рисунке 4.2 на примере скважины 1001 приведен анализ влияния водонапорного режима на работу добывающего фонда скважин. Приведенный на рисунке 4.2 график показывает, что до 2004 года скважина работала с безводной добычей, тогда как после 2004 года наблюдается резкий прирост в накопленном водонефтяном факторе. Опираясь на промышленную информацию, свидетельствующую о смене режима эксплуатации скважины и увеличении депрессии на пласт, можно заключить, что произошло довольно быстрое подтягивание воды из водоносного горизонта. Последующее сохранение высокой депрессии на пласт привело к выравниванию объемов притока пластовой воды, о чем говорит относительное постоянство производной от накопленного ВНФ, изображенного на рисунке 4.2 розовыми маркерами.

На базе характеристических графиков Чена была проведена аналогичная оценка всех добывающих скважин с целью определения или подтверждения основного источника обводнения скважинной продукции.

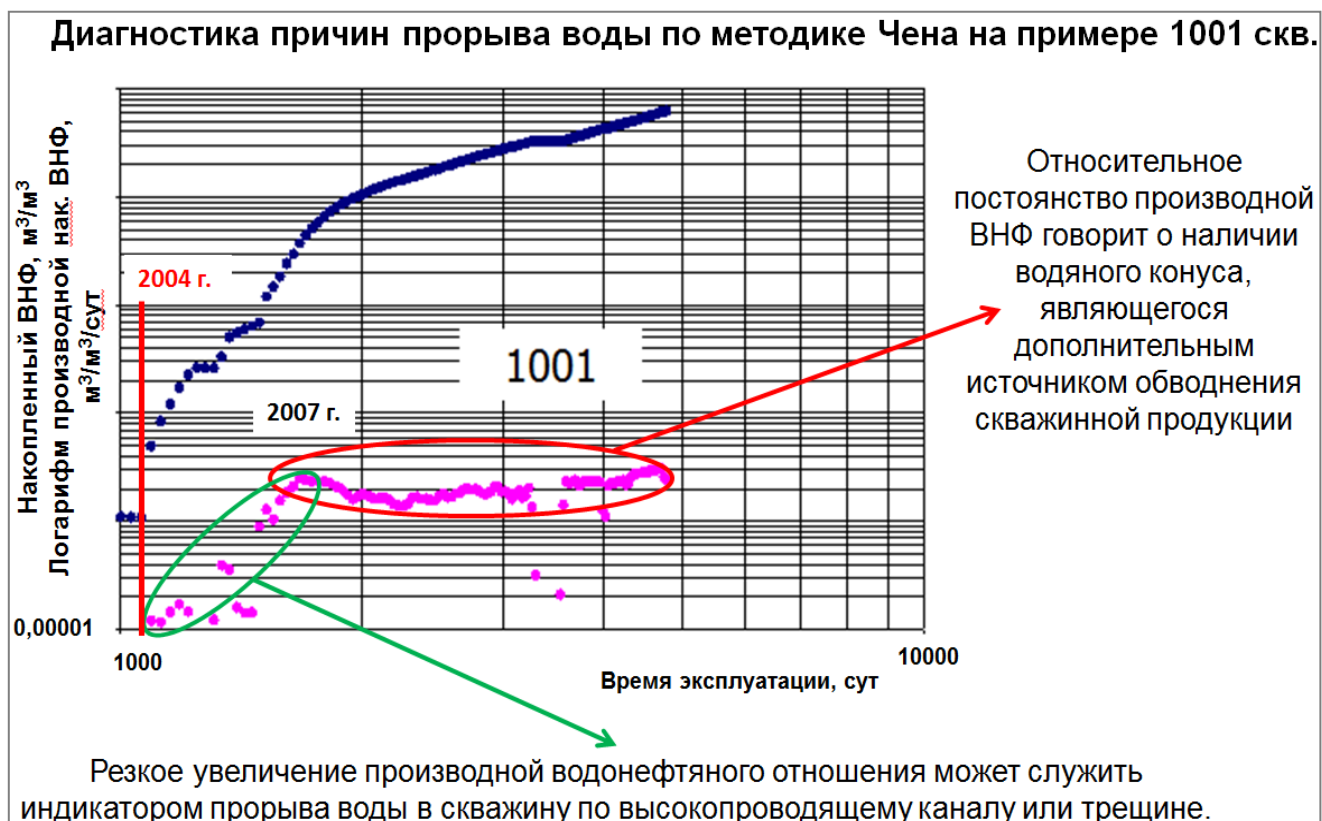


Рисунок 4.2 – Характер притока воды к забою добывающей скважины 1001.

Результаты позволили сформулировать следующий вывод: рост объемов добычи воды напрямую связан с увеличением депрессии на пласт, что в свою очередь является основной причиной притока воды в виде конусов по системе развитой трещиноватости к забоям скважин [3].

Опираясь на полученные результаты о характере геологического строения коллектора и об источниках притока воды к забоям добывающих скважин, при моделировании рассматриваемой залежи необходимо было решить вопрос описания интенсивности притока воды из нижележащего водоносного горизонта и особенностей совместной фильтрации флюидов в пласте, повсеместно осложненном системой развитой трещиноватости.

4.2 Обоснование водонапорного режима и описание закономерности фильтрации жидкости в трещиноватом коллекторе Варандейского месторождения.

Появление воды в скважине не только осложняет процесс эксплуатации самой скважины, но и приводит к неравномерной выработке запасов нефти

непосредственно в пласте, особенно в условиях резко неоднородного коллектора. Учитывая показатели работы эксплуатационного фонда скважин рассматриваемого объекта, а также проведенные на Варандейском месторождении сейсмические исследования, результаты которых были опубликованы в статьях [1,2], возникла необходимость поиска путей для наиболее детального воспроизведения особенностей влияния подстилающего водоносного горизонта на состав добываемой продукции эксплуатационных скважин.

При настройке фильтрационной модели на историю разработки стандартным подходом при установлении степени активности водонапорного горизонта подключается, так называемый, аквифер. Зачастую, в понятие аквифера вкладывается слой ячеек, который геометрически и фильтрационно воспроизводит интенсивность притока воды (подтягивания конусов обводнения) к забоям добывающих скважин.

Опираясь на полученные данные о возможных источниках обводнения скважин, и принимая во внимание атрибут дуплексных волн, была получена зависимость (рисунок 4.3), отражающая проявления нижележащего водоносного горизонта в различных зонах интенсивности трещиноватости, локализованных согласно результатам сейсмических исследований рассматриваемого объекта.

В данном случае полученная зависимость имеет экспоненциальный характер, который позволяет, в условиях отсутствия точного представления о геометрических размерах водонапорного горизонта, описать характер его влияния на водонапорный режим залежи путем введения понятия эквивалентной проводимости.

Серия пробных расчетов показала, что при условном задании толщины водонапорного горизонта равной 10 метрам, скорость притока воды в скважину коррелировалась с зонами повышенной трещиноватости, выявленной по карте амплитуд дуплексных волн. В результате, согласно нескольким итерационным расчетам, получено, что при определенных величинах эквивалентной проницаемости водоносного горизонта удастся воспроизвести время и скорость прихода воды по системе каналов и трещин к забоям добывающих скважин.

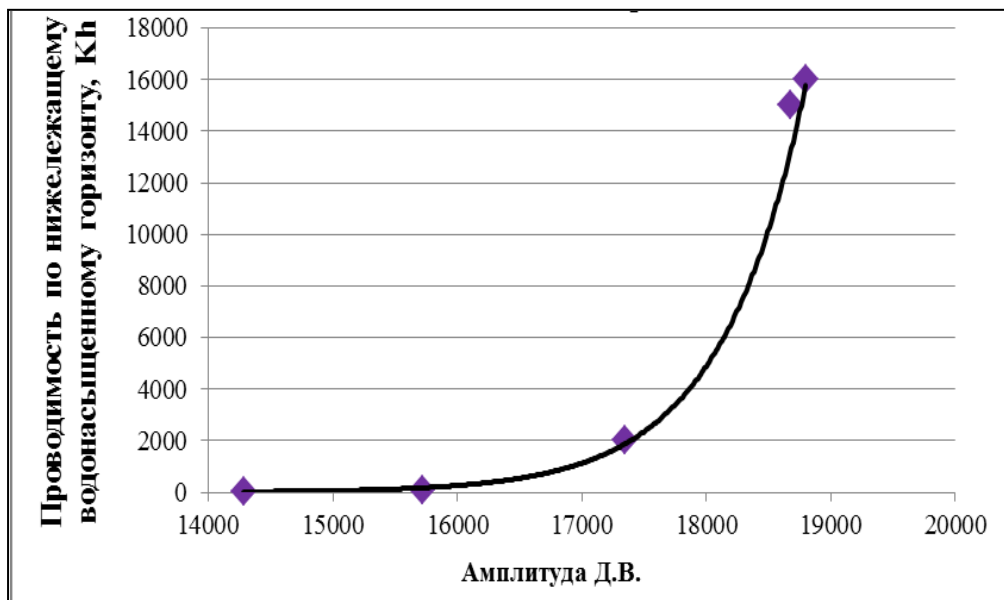


Рисунок 4.3— Зависимость фильтрационной активности водонасыщенного горизонта в различных зонах от интенсивности трещиноватости

После полученных оценочных расчетов была выдвинута гипотеза о существовании взаимосвязи между интенсивностью и особенностями проявления водонапорного режима и неоднородностями, отмеченными на сейсмическом атрибуте амплитуд дуплексных волн. При нанесении значения амплитуды дуплексной волны в точку и сопоставлении ее с величиной подобранной при настройке аквифера проницаемости, выявили характерную экспоненциальную зависимость. Данная зависимость позволила распространить характер проявления водонасыщенного горизонта в масштабе всей залежи.

Такой подход дал возможность, при условности учета геометрических размеров подстилающего водонасыщенного пласта, адекватно задать его активность по всей площади моделируемого объекта в зависимости от величин амплитуд дуплексных волн. Такая гипотетическая особенность проявления водонасыщенного горизонта позволила не только воспроизвести время появления воды на забоях добывающих скважин, но и спрогнозировать момент притока воды в зависимости от величины депрессии на пласт со стороны всех добывающих скважин.

На рисунке 4.4 приведены примеры, полученные путем гидродинамического моделирования, интенсивности прихода воды в добывающие скважины (№№ 3, 12) в трещиноватом карбонатном коллекторе нижнепермских

отложений Варандейского месторождения. Результаты расчетов показывают на существование взаимосвязи между снижением забойного давления и пропорциональным ростом обводненности скважинной продукции. Другими словами, если скважина №12, расположенная вблизи зоны повышенных фильтрационных свойств, работает на высоких и невысоких депрессиях, то приток воды в данном случае примерно одинаков. Однако по скважине №3 картина выглядит иначе. При её расположенности в матричной части коллектора, эксплуатация на небольших депрессиях позволило бы оттянуть приток воды на некоторое время и более того снизить его интенсивность [3].

Необходимо отметить, что зависимость, представленная на рисунке 4.3, была выявлена в условиях рассматриваемого объекта Варандейского месторождения. Поэтому применительно к карбонатным трещиноватым коллекторам других месторождений требуется дополнительная процедура верификации.

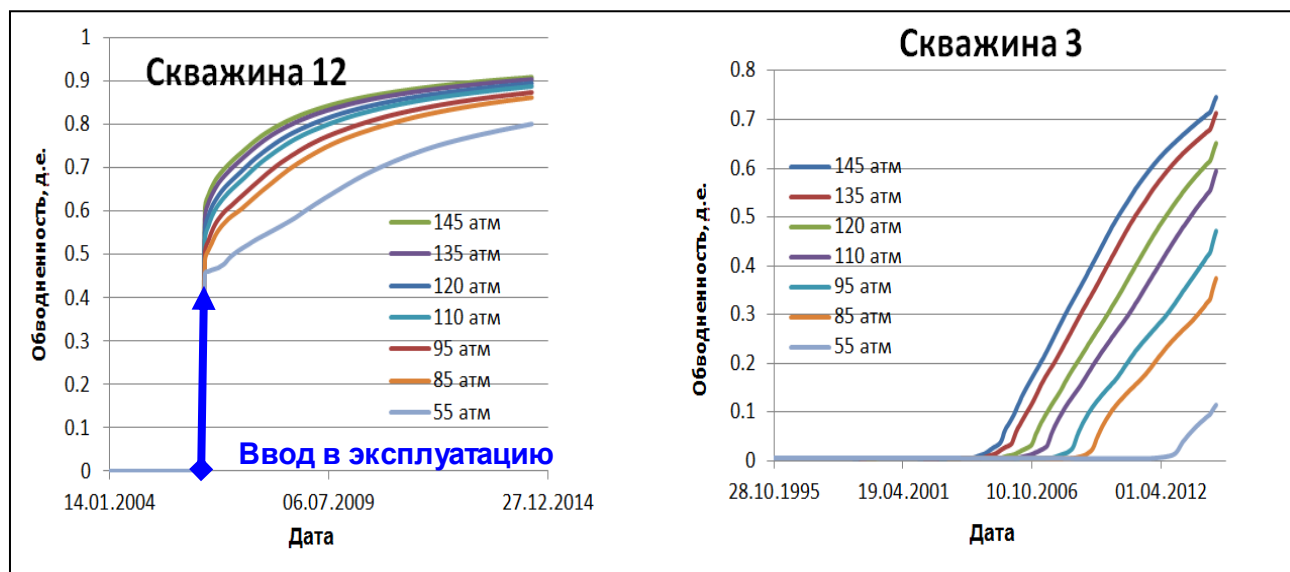


Рисунок 4.4 – Динамика обводнения скважин в зависимости от интенсивности и направленности системы каналов и трещин в нижнепермских отложениях Варандейского месторождения

4.3 Лабораторные исследования керна. Обоснование фазовых проницаемостей для гидродинамической модели объекта Plar+a+s Варандейского месторождения

В ходе описания характера совместной фильтрации жидкостей в

рассматриваемом пласте и опираясь на полученную в процессе лабораторных испытаний информацию относительно ОФП по объекту Р1 Варандейского месторождения пришлось отметить, что реальная оценка проницаемости по геологическим данным отсутствует. В данных условиях важно было, учитывая полное отсутствие фильтрационных данных трещин и специальных геофизических исследований, найти способ, который бы позволил описать совместное движение флюидов как в матрице, так и в трещине. Выходом стало обобщение имеющейся информации, а именно: сейсмических атрибутов, результатов интерпретации высокоинформативных ГДИС, особенностей расположения и режимов работы скважин на объекте, адаптации гидродинамической модели на историю разработки; оценок изменения энергетического состояния пласта, анализа результатов фильтрационных исследований керна. Это предоставило возможность определить вид ОФП и перейти от строения залежи в целом непосредственно к строению отдельной ячейки. На рисунке 4.5 приведено схематичное обоснование особенностей фильтрации жидкостей в трещиноватом коллекторе в условиях Варандейского месторождения. Зависимости ОФП фактически могут быть далеки от прямых линий, часто используемых в фильтрационных моделях трещиноватых коллекторов. Каждое месторождение необходимо исследовать отдельно. Суть предлагаемого подхода [1] заключается в следующей последовательности действий:

- построение зависимостей ОФП, имеющих форму прямых линий, соответствующих фильтрации в трещинах;
- адаптация формы кривых ОФП к фильтрации в системе трещина-пласт за счет увеличения отклонения фазовых проницаемостей от прямолинейной формы.

При проведении подобной процедуры предполагалось, что в случае увеличения отклонения от взаимной ортогональности увеличивается матричная фильтрация. Сохранение местоположения концевых точек осуществлялось в соответствии с керновыми исследованиями.

Таким образом, при построении геолого-гидродинамической модели были

выявлены следующие особенности фильтрации в системе каналов и трещин нижнепермских отложений Варандейского месторождения:

- 1) наличие высокопроводящих каналов, характер расположения которых, согласно атрибуту амплитуд дуплексных волн, свидетельствует о присутствии как крупных трещин, имеющих протяженность более 300 метров, так и трещин, с протяженностью в 10-300 метров, а также зон микротрещиноватости;
- 2) присутствие трещин, характеризующихся высокими значениями проводимости не только по латерали, но и по разрезу, что является немаловажным фактором обоснования причин и темпов обводненности скважинной продукции;
- 3) выявление интенсивности проявления нижележащего водонапорного резервуара позволяет оптимизировать работу добывающих скважин для снижения негативного эффекта от конусообразования;

Фазовые проницаемости нижнепермских отложений

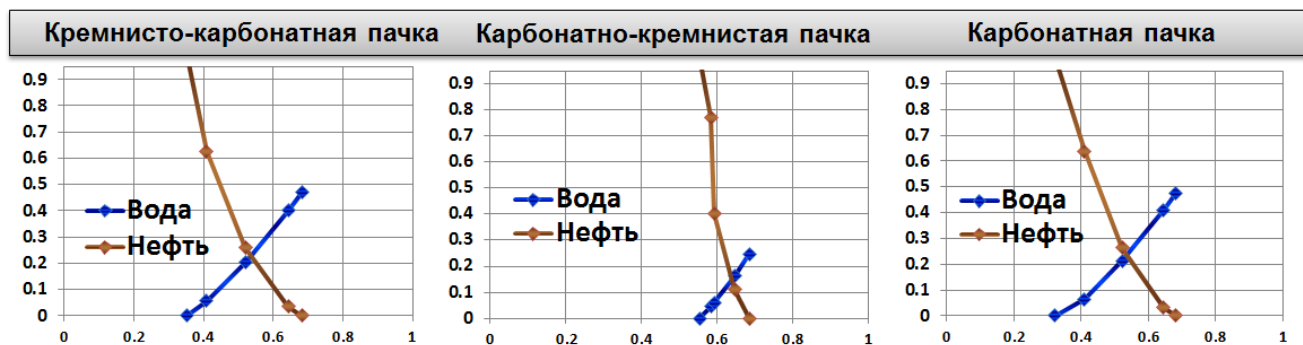
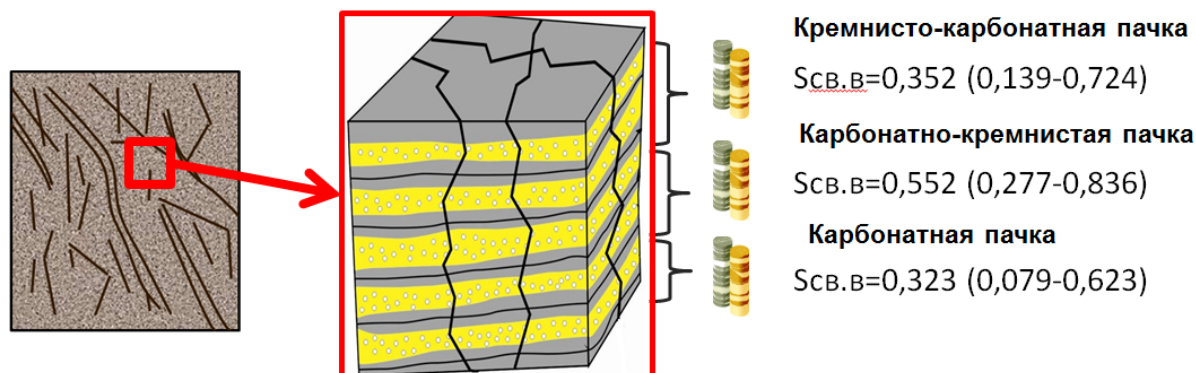


Рисунок 4.5 – Обоснование ОФП в трещиноватом коллекторе на объекте Р1 Варандейского месторождения

- 4) режимы работы скважин и динамика энергетического состояния объекта позволяют скорректировать ОФП залежи согласно выявленным данным о наличии не только локальных зон скопления высокопроводящих трещин, но и

матричной трещиноватости;

5) полученная модель не только показывает высокую сходимость с историческими данными, но и позволяет прогнозировать показатели разработки по новым скважинам.

4.4 Верификация полученных результатов настройки геолого-гидродинамической модели.

В настоящей работе использовался подход, позволяющий определить корректность полученной геолого-фильтрационной модели. Суть подхода заключается в решении обратной задачи, согласно которой сопоставляются расчетные КВД, снятые по результатам построенной геолого-гидродинамической модели, и реальные КВД, полученные при исследовании скважин. Подобное сравнение показывает, как ни странно, полное совпадение расчетных и фактических кривых производной КВД (рисунок 4.6).

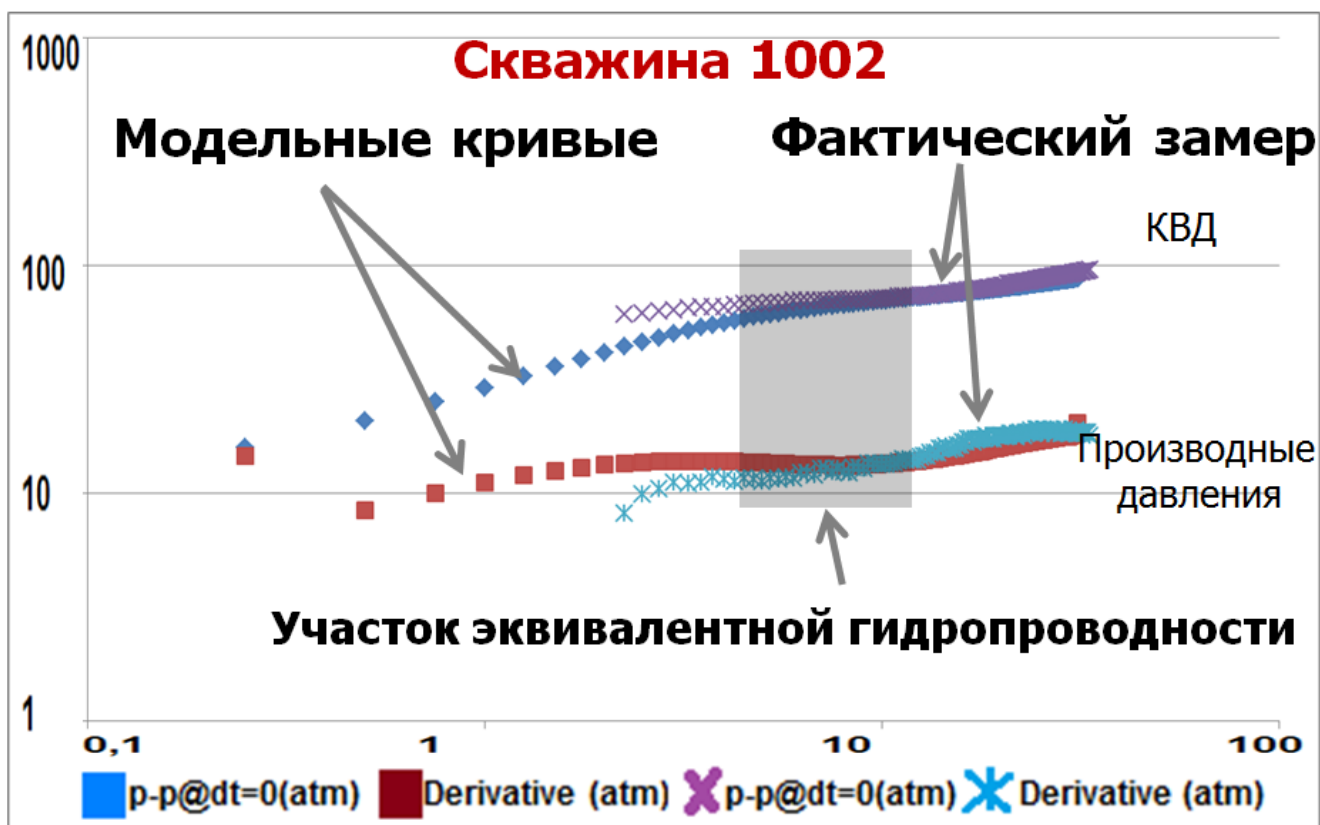


Рисунок 4.6 – Сопоставление расчетной и фактической КВД в трещиноватом коллекторе на объекте P1 Варандейского месторождения

Область совпадения расчетных и фактических КВД и их производных выделена серым цветом. Она дает основания полагать, что качество построенной

модели отличается приемлемой достоверностью, и она может быть использована с целью прогнозирования бурения новых скважин на нижнепермских отложениях Варандейского месторождения.

Помимо оценки сходимости результатов гидродинамических исследований скважин в работе отмечается сходимость фактических и прогнозных показателей работы вновь пробуренных скважин. На рисунке 4.7 представлена сравнительная характеристика расчетных и фактических показателей эксплуатации для скважины 1027, пробуренной после завершения работ по созданию геолого-фильтрационной модели нижнепермских отложений Варандейского месторождения.

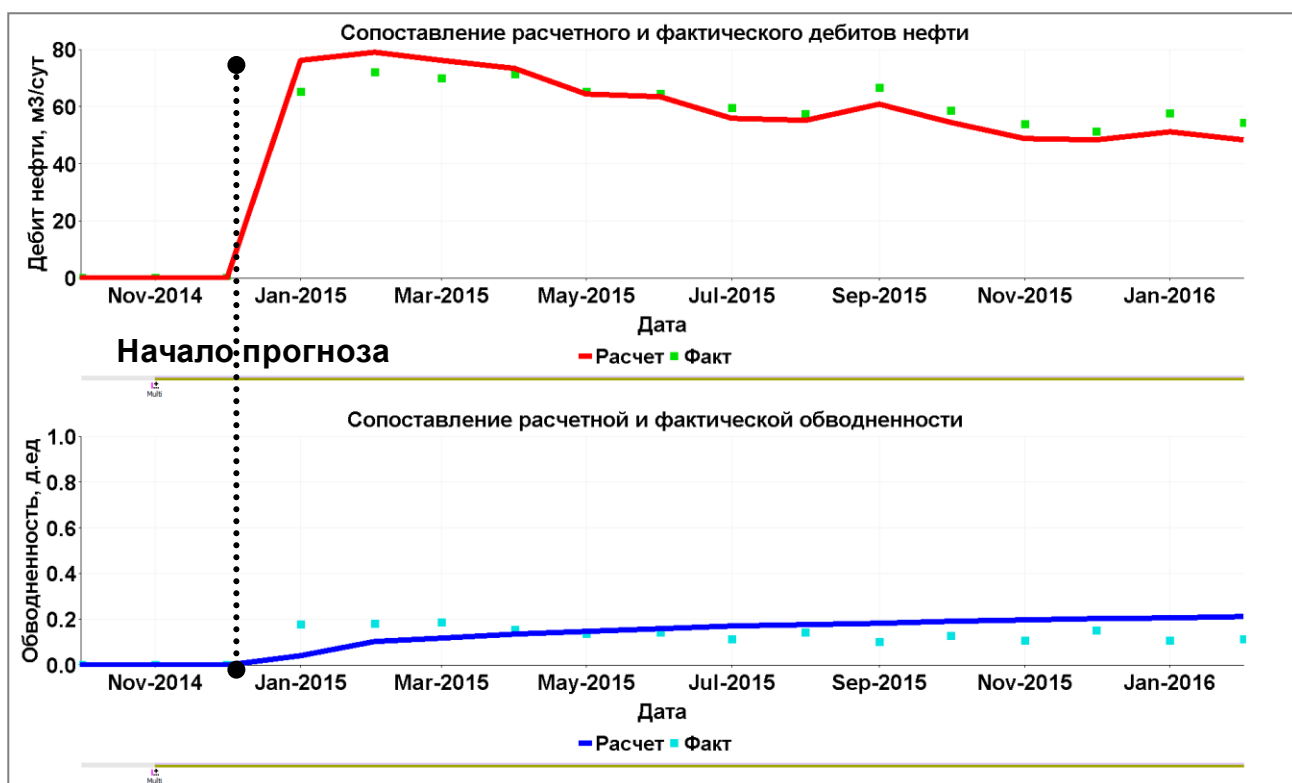


Рисунок 4.7 – Сопоставление расчетных и фактических показателей эксплуатации пробуренной скважины на объекте P1 Варандейского месторождения

В заключении представлены общие выводы и рекомендации по результатам диссертационного исследования.

1. На примере Варандейского месторождения впервые выявлена зависимость между фильтрационными параметрами и сейсмическими данными.
2. На основе комплексирования разнохарактерной информации обоснована геолого-гидродинамическая модель, которая на сегодняшний день адекватно

отражает фильтрационно-емкостные свойства системы каналов и трещин на объекте Р₁ Варандейского месторождения и наиболее вероятным образом учитывает притоки воды к скважинам из водоносного горизонта.

3. Представленные подходы к построению геолого-гидродинамической модели позволили не только оптимизировать систему разработки, но и повысить точность прогноза показателей разработки для новых скважин.

Основные публикации по теме диссертационной работы

По результатам выполненных исследований опубликованы 3 статьи в научных журналах списка ВАК РФ и включенных в международную реферативную базу данных Scopus.

1. Чертенков М.В., Чуйко А.И., Метт Д.А., Суходанова С.С. «Обоснование фильтрационных свойств системы каналов и трещин на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения» //Нефть, газ и бизнес. 2015. - №2. С. 38-43.
2. Чертенков М.В., Чуйко А.И., Метт Д.А., Суходанова С.С. «Определение зависимости между фильтрационными параметрами и сейсмическими данными на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения» //Нефтяное хозяйство. 2014. - №10. С. 80-81.
3. Чуйко А.И., Метт Д.А., Суходанова С.С. «Некоторые подходы к описанию процесса обводнения добывающих скважин в условиях недостатка информации, резко неоднородных карбонатных трещиноватых коллекторов на примере нижнепермских отложений Варандейского месторождения» //Нефтяное хозяйство. 2015. - №12.
4. Суходанова С.С., Метт Д.А. Тезисы VII Научно-практической конференции «Математическое моделирование и компьютерные технологии в процессах разработки месторождений», г. Уфа, 2015 г.
5. Суходанова С.С., Метт Д.А. Тезисы технической конференции SPE «Разработка месторождений с карбонатными отложениями – новые рубежи», г. Москва, 2015 г.