

На правах рукописи

ФИЛИППОВ ЕВГЕНИЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ ПРОЦЕССА
ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ГИДРАВЛИЧЕСКОМ
РАЗРЫВЕ КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ**

**2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых
месторождений**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь, 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет».

Научный руководитель: **Пономарева Инна Николаевна**,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: **Попов Сергей Николаевич**,
доктор технических наук, заведующий лабораторией нефтегазовой механики и физико-химии пласта ФГБУН Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва

Щекин Александр Иванович,
кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений ФГАОУ ВО «Северо-Кавказский федеральный университет», г. Ставрополь

Ведущая организация: ГБОУ ВО «Альметьевский государственный нефтяной институт», г. Альметьевск

Защита диссертации состоится 06 декабря 2022 года в 13.00 часов на заседании диссертационного совета Пермского национального исследовательского политехнического университета Д ПНИПУ.05.15 по адресу: 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29, ауд.345.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат разослан 17 октября 2022 г.

Ученый секретарь,
кандидат технических наук, доцент

Мелехин А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Гидравлический разрыв пласта (ГРП) в настоящее время является одним из ключевых инструментов интенсификации добычи углеводородного сырья. Данный метод широко применяется в самых разнообразных геолого-физических условиях, в том числе в карбонатных коллекторах. Закономерности проведения ГРП в гранулярных терригенных коллекторах установлены в результате многочисленных экспериментальных и теоретических исследований. Сложное строение пустотного пространства, обусловленное вероятным наличием, помимо поровых каналов, неравномерной сети трещин и каверн, обуславливает отличия в геолого-технологических особенностях проведения рассматриваемого вида воздействия.

На территории Пермского края накоплен значительный опыт практической реализации нескольких технологий гидравлического разрыва карбонатных пластов, однако следует отметить значительную дифференциацию полученных значений показателей, относящихся к технологической эффективности (прирост дебита, дополнительная добыча нефти, продолжительность эффекта). Выделение условий, обеспечивающих эффективное проведение ГРП и, как следствие, экономическую рентабельность данного вида воздействия, является ключевым направлением совершенствования технологий управления производительностью скважин. Научный и практический интерес представляет изучение геометрии трещин, образовавшихся при гидравлическом разрыве карбонатного пласта, закономерности их пространственного размещения, а также связи между трещинообразованием и показателями технологической эффективности проведенных мероприятий.

Для Пермского края характерным является разнообразие геолого-физических условий процессов фильтрации. В частности, залежи нефти в карбонатных коллекторах выделены в пределах месторождений, расположенных как на юге, так и на севере региона. Однако в контексте решения самых различных нефтепромысловых задач к довольно обособленной группе относят карбонатные рифовые массивы турнейско-фаменского возраста месторождений, приуроченных к Соликамской депрессии. Выраженная литолого-

фациальная неоднородность залежей в значительной мере осложняет реализацию всех технологических процессов добычи углеводородов, что обуславливает целесообразность их выбора в качестве объектов исследования.

Освещенность проблематики исследования. Проблематика проведения гидравлического разрыва пласта с разных позиций рассмотрена в многочисленных отечественных и зарубежных научных работах, в том числе в трудах Р. Д. Каневской, С. И. Грачева, С. Ф. Мулявина, Р. И. Медведского, Р. Х. Гильмановой, О. В. Савенок, Ю. А. Кашникова, С. Г. Ашихмина, О. В. Салимова, И. Р. Ибатуллина, А. В. Насыбуллина, М. Economides, P. Valko, H. Mukherjee, Zheng-Xiao Xu, Song-Yan Li, Yuwei Li, Daobing Wang и др.

Однако вопросы проведения гидроразрыва в карбонатных коллекторах, характеризующихся сложным строением пустотного пространства, освещены в недостаточной степени. В частности, не в полной мере изучены особенности геометрии трещин, образующихся при разрыве карбонатных коллекторов порового и трещинно-порового типа. Также не освещена проблема оценки причин, определяющих пространственное расположение трещин, не выделены геолого-технологические условия, определяющие направление их приоритетного развития, что определило направление настоящего диссертационного исследования.

Целью работы является научно-методологическое обоснование особенностей формирования трещин гидравлического разрыва карбонатных коллекторов как основы эффективного планирования соответствующих технологических операций.

В соответствии с целью работы сформулированы следующие **основные задачи исследования:**

1. Обобщение опыта проведения геолого-технических мероприятий в скважинах, эксплуатирующих карбонатные залежи нефтяных месторождений Пермского края.
2. Разработка и анализ многомерных статистических моделей с целью исследования притока жидкости к скважинам в сложнопостроенных карбонатных коллекторах.

3. Изучение строения (геометрии) и пространственного размещения трещин, образовавшихся в результате выполненных операций по гидравлическому разрыву карбонатных коллекторов.
4. Разработка способа прогнозирования пространственной ориентации зон развития трещин гидроразрыва в карбонатных коллекторах, основанного на изучении фактического опыта проведения данного вида воздействия.
5. Изучение зависимости между показателями технологической эффективности ГРП и строением (геометрией) образовавшихся трещин.

Объект исследования – залежи нефти в карбонатных коллекторах месторождений Пермского края, подверженные гидравлическому разрыву пласта.

Предмет исследования – процесс образования трещин в ходе гидравлического разрыва карбонатных коллекторов.

Научная новизна и теоретическая значимость выполненной работы представлена следующими положениями:

1. Обоснованы диапазоны значений дебитов скважин, в пределах которых фильтрация происходит по индивидуальным особенностям. Выделен перечень геолого-технологических факторов, определяющих приток флюида для каждого из выделенных диапазонов дебитов.

2. Впервые доказано, что при гидравлическом разрыве карбонатных коллекторов нефтяных месторождений Пермского края образуются трещины различной (простой и сложной) геометрии, оказывающие влияние на значения показателей технологической эффективности мероприятий. Максимальная технологическая эффективность ГРП достигается при образовании в пласте трещин сложной геометрии.

3. Впервые для рассматриваемых объектов определено пространственное размещение зон развития трещин, образовавшихся в ходе выполненных операций по гидравлическому разрыву пласта. Установлено, что трещины, образовавшиеся в результате гидравлического разрыва, формируются в направлении максимальных для участка залежи текущих пластовых давлений.

Практическая значимость работы заключается в следующем:

1. Установленные закономерности формирования дебитов позволяют выбирать эффективные инструменты для управления

производительностью скважин в индивидуальных геолого-технологических условиях.

2. Установленная зависимость между расположением зоны трещинообразования и энергетическим состоянием залежи в пределах элементов системы разработки – основа способа прогнозирования пространственной ориентации зон развития трещин гидроразрыва в карбонатных коллекторах, практическое применение которого позволяет эффективно планировать геолого-технические мероприятия, обоснованно выбирать скважины в качестве потенциальных объектов воздействия, снизить риски неполучения технологического и экономического эффекта.

3. Поведение давления на выкиде насосного агрегата в процессе проведения гидроразрыва является косвенным инструментом оценки геометрии образовавшихся трещин.

Результаты диссертационного исследования используются при проектировании мероприятий по гидравлическому разрыву карбонатных коллекторов (Акт внедрения филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми).

Методология и методы исследования. В работе использованы современные методы интерпретации материалов гидродинамических исследований скважин, статистической обработки промысловых материалов – цифровых баз данных. Все методы использованы обосновано, достоверность полученных выводов подтверждена результатами их комплексного анализа.

Положения, выносимые на защиту:

1. Индивидуальные многомерные статистические модели дебитов скважин, эксплуатирующих турнейско-фаменских отложения Гагаринского месторождения, позволяют с высокой степенью достоверности определять и исследовать индивидуальные условия формирования притока жидкости в осложненных геолого-технологических условиях объекта разработки.

2. Геометрия (строение) трещин, образующихся при гидравлическом разрыве карбонатных коллекторов, отличительные признаки ее формирования. Различия в технологической эффективности ГРП при образовании в пласте трещин различной геометрии (строения).

3. Установленная зависимость пространственного размещения трещин при гидравлическом разрыве карбонатных коллекторов от величины динамического пластового давления в пределах элемента системы разработки.

Степень достоверности результатов работы обусловлена корректным применением методов обработки экспериментальных данных – промысловых материалов значительного объема. Достоверность построенных моделей оценена при вычислении их статистических оценок, а также при сопоставлении расчетных и фактических значений определяемых параметров.

Апробация результатов исследований. Основное содержание работы доложено на международной научно-практической конференции «Интегрированное научное сопровождение нефтегазовых активов: опыт, инновации, перспективы» (г. Пермь, 2019); Форуме «Современные методы исследования скважин и пластов для эффективности разработки нефтегазовых месторождений», (г. Москва, 2020); международной научно-практической конференции «Решение Европейского союза о декарбонизации и новая парадигма развития топливно-энергетического комплекса России», (г. Казань, 2021); ежегодной научно-практической конференции «Трудноизвлекаемые запасы – настоящее и будущее» им. Н. Н. Лисовского, (г. Москва, 2021).

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 6 научных работах, в том числе 4 работы опубликовано в изданиях, входящих в международные базы цитирования (Scopus и/или Web of Science), получен один патент.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 119 наименований, два приложения. Работа изложена на 122 страницах машинописного текста, содержит 55 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает благодарность за поддержку и ценные советы в период проведения диссертационного исследования С. С. Черепанову, В. И. Галкину, Б. Г. Алексееву, а также научному руководителю – И. Н. Пономаревой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обозначена актуальность проблематики диссертационного исследования, его цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость.

Первая глава посвящена аналитическому обзору исследований, направленных на изучение закономерностей образования трещин в процессе гидравлического разрыва карбонатных пластов.

Во второй главе диссертации выполнен детальный анализ накопленного в Пермском крае опыта проведения гидравлического разрыва пласта при эксплуатации скважин в карбонатных коллекторах. На основании выполненного анализа обоснована целесообразность выбора в качестве основного объекта дальнейших исследований турнейско-фаменской залежи нефти Гагаринского месторождения, что обусловлено наличием значительного опыта проведения данного вида воздействия, обширного материала по гидродинамическим и геофизическим исследованиям скважин, а также выраженной дифференциацией достигнутых показателей технологической эффективности и их отрицательной динамикой во времени.

Третья глава посвящена изучению структуры пустотного пространства карбонатных коллекторов и ее влиянию на приток флюидов к скважинам. Сложное строение рифовых карбонатов месторождений Пермского края, отмеченное в работах многих специалистов, в том числе И. С. Путилова, С. С. Черепанова, С. О. Денка, Д. А. Мартюшева, оказывает существенное влияние на разработку приуроченных к ним залежей нефти. В этой связи в диссертационной работе выполнены исследования, направленные на установление индивидуальных условий притока жидкости к скважинам, эксплуатирующим турнейско-фаменскую залежь Гагаринского месторождения.

Процессы фильтрации на рассматриваемом объекте осложнены высокой газонасыщенностью пластовой нефти и наличием зон ее разгазирования, а также неравномерной кавернозностью и трещиноватостью коллекторов. В этой связи применение аналитических решений – известных уравнений притока, для решения поставленной задачи, затруднительно. В условиях невозможности точного аналитического описания сложных многофакторных процессов

представляется целесообразным использование вероятностно-статистических методов (многомерного регрессионного анализа).

Для построения многомерных статистических моделей дебитов жидкости ($Q_{ж}$) привлечен комплекс геолого-промысловых данных ($n=61$), таких, как обводненность (W , %); толщина пласта (h , м); газовый фактор ($\Gamma_{ф}$, м³/т); пластовое давление ($P_{пл}$, МПа); забойное давление ($P_{заб}$, МПа); коэффициент проницаемости (k , мД); скин-фактор (S); трещиноватость пласта (T_p); радиус дренирования ($R_{др}$, м).

Многомерное моделирование притока, выполненное по всей выборке данных, позволило получить уравнение с высокими статистическими оценками. Модель и ее характеристики в полном объеме приведены в тексте диссертации. Сопоставление расчетных и фактических значений дебитов представлено на рис.1 (а). В ходе анализа данного корреляционного поля установлено, что несмотря на высокие статистические оценки модели, ее работоспособность не является достаточной. Дальнейшие исследования, в том числе пошаговое моделирование дебита по убывающей выборке и дискриминантный анализ, в полном объеме приведенные в тексте диссертации, позволили обосновать наличие четырех характерных диапазонов дебитов, в пределах которых условия притока жидкости к скважинам различны. Соответственно, следует считать некорректным использованием одних и тех же формул дебита для изучения притока на разных его диапазонах. Для четырех выделенных диапазонов построены индивидуальные модели дебитов, в полном объеме представленные в тексте диссертации. Характеристика всех построенных моделей, включающая перечень включенных параметров, их вклад в обеспечение результирующего коэффициента множественной корреляции R , представлена в таблице 1.

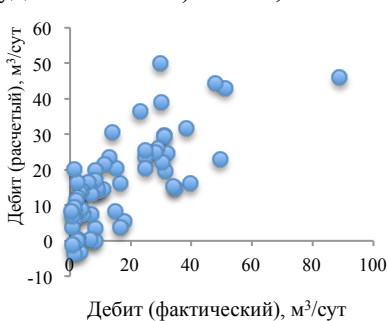
Таблица 1 – Характеристика многомерных статистических моделей притока жидкости к скважинам

Шаг	Характеристика моделей для диапазонов дебитов									
	Весь диапазон		> 28 м ³ /сут		28...16 м ³ /сут		16...4 м ³ /сут		<4 м ³ /сут	
	Пар-р	R	Пар-р	R	Пар-р	R	Пар-р	R	Пар-р	R
1	$P_{пл}$	0,53	$P_{заб}$	0,56	k	0,64	W	0,45	R	0,62
2	h	0,59	$R_{др}$	0,87	$P_{заб}$	0,86	$P_{пл}$	0,54	k	0,68
3	$R_{др}$	0,65	S	0,88	$\Gamma_{ф}$	0,97	T_p	0,60	$P_{заб}$	0,72
4	$\Gamma_{ф}$	0,67			$P_{пл}$	0,98			h	0,81
5	S	0,69			S	0,99			$\Gamma_{ф}$	0,84
6	k	0,71							$P_{пл}$	0,85
7	W	0,73								

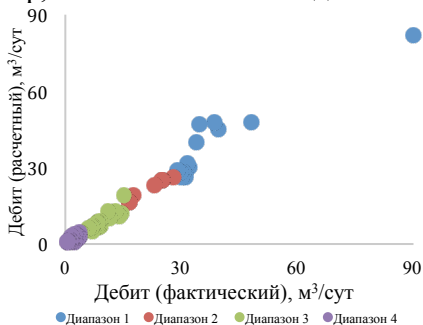
Корреляционное поле, сопоставляющее расчетные (по индивидуальным для диапазонов моделям) и фактические значения дебитов, представлено на рис.1 (б).

Интерес представляет анализ структуры построенных статистических моделей: параметры, включенные в модель, контролируют дебит жидкости. Параметры, оказывающие наибольшее влияние на дебит, включаются на более раннем шаге. При анализе данных таблице 1 получены следующие основные выводы об условиях формирования притока жидкости на рассматриваемом объекте:

1. Приток к высокодебитным скважинам ($Q_{ж} > 28 \text{ м}^3/\text{сут}$) зависит от забойного давления, радиуса зоны дренирования и состояния призабойной зоны.
2. Приток жидкости к скважинам с дебитом от $28 \text{ м}^3/\text{сут}$ до $16 \text{ м}^3/\text{сут}$ подчиняется другому закону. Формирующими его факторами являются свойства пласта и в удаленной, и в призабойной зонах, пластовое и забойное давление, газовый фактор.
3. Отличительной особенностью притока к скважинам с дебитом от 16 до $4 \text{ м}^3/\text{сут}$ является его зависимость от структуры пустотного пространства (наличия трещин).
4. Дебиты скважин четвертой группы зависят, в основном, от радиуса зоны дренирования. Так же его формируют толщина и проницаемость (в удаленной зоне) пласта, газовый фактор, пластовое и забойное давление.



а) модель обобщенная



б) модели индивидуальные

Рис.1. Сопоставление расчетных и фактических дебитов жидкости

Таким образом, установлено, что скважины можно разделить на четыре группы, для каждой из которых характерна особая, отличная от других групп, специфика притока жидкости и набор факторов,

формирующих его дебит. Данные факторы следует рассматривать как эффективный инструмент управления притоком.

Установлено, что для довольно большой группы скважин дебит определяется структурой и свойствами коллектора. Соответственно, эффективным способом интенсификации притока следует считать проведение геолого-технических мероприятий, влияющих на эти факторы. Как следствие, научный и практический интерес представляют исследования, направленные на изучение изменения структуры и свойств пустотного пространства в результате проведения специальных мероприятий, например, гидравлического разрыва пласта, что выполнено в ходе дальнейших исследований.

В соответствии с классической теорией ГРП принято считать, что проведение операции способствует формированию в пласте трещины в виде двух крыльев, вертикально распространяющихся в противоположных от скважины направлениях. Данное представление следует считать обоснованным и соответствующим практике проведения ГРП в терригенных коллекторах. В карбонатных коллекторах трещина ГРП в процессе развития может встретиться с пустотами различного масштаба, например, естественными трещинами и др. В таких случаях может происходить изменение геометрии формирующейся трещины. Следовательно, проведение ГРП в сложнопостроенных карбонатных коллекторах может привести к образованию сложной сети трещин. Таким образом, изучение геометрии трещин, образовавшихся после фактически проведенных операций по гидроразрыву карбонатных коллекторов, является одной из ключевых задач анализа данного вида воздействия. В настоящей диссертации данная задача решена посредством интерпретации кривых восстановления давления, полученных при исследовании скважин в период продолжающегося эффекта после ГРП, в соответствии с алгоритмами Saphir. В случае образования в пласте простой трещины гидроразрыва, график КВД имеет вид, представленный на рис 2 (а). Вид графика, соответствующий рис.2 (б) свидетельствует об образовании в пласте сложной сети трещин. Также на рисунке визуализированы представления о простой и сложной геометрии трещин.

Для всех скважин, эксплуатирующих турнейско-фаменские отложения Гагаринского месторождения, систематизированы и

первого гидроразрыва интерпретирована с использованием модели «двойная пористость», что свидетельствует об образовании в пласте в результате его разрыва системы трещин сложной геометрии.

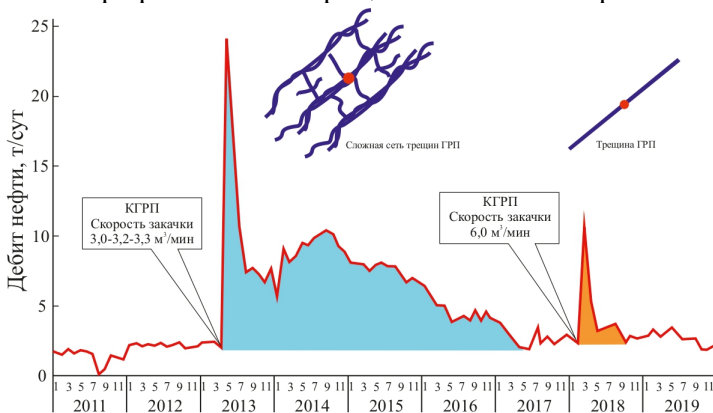


Рис.3. Динамика показателей эксплуатации скважины в период проведения ГРП

Аналогичные исследования выполнены для всех мероприятий по гидравлическому разрыву, реализованных на объекте. Сопоставление геометрии образовавшихся трещин и средних значений параметров технологической эффективности ГРП, а также скорости закачки жидкости разрыва, представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Влияние скорости закачки жидкости разрыва на геометрию трещин и технологическую эффективность ГРП

Геометрия трещин	Скорость закачки, м³/мин	Дополнительная добыча нефти, тыс. тонн
Сложная	1 – 3,5	6,2 – 13,0
Простая	4,5 – 6,0	0,1 – 5,8

Полученные результаты свидетельствуют о более значительных объемах дополнительно добываемой нефти в случае создания в процессе гидроразрыва сложной системы трещин. При этом в условиях рассматриваемой залежи сложная сеть трещин формируется при проведении операций по гидроразрыву на малых скоростях закачки агента.

В настоящее время в ходе проведения операций по ГРП практически всегда регистрируют динамику давления на выкиде насосного агрегата в процессе воздействия. В ряде научных работ отмечен факт зависимости динамики давления закачки от геометрии образующихся трещин, при этом считается, что пересечение формирующейся в процессе гидроразрыва трещины с естественными трещинами сопровождается характерными колебаниями давления закачки в процессе гидроразрыва и сложным видом соответствующего графика. В ходе диссертационного исследования выполнен детальный анализ всех отчетов по проведению ГРП, результаты которого в полной мере подтвердили данное предположение. В качестве иллюстрации на рис.4 представлен график динамики давления и скорости закачки на рассматриваемой ранее скважине с двумя гидроразрывами.

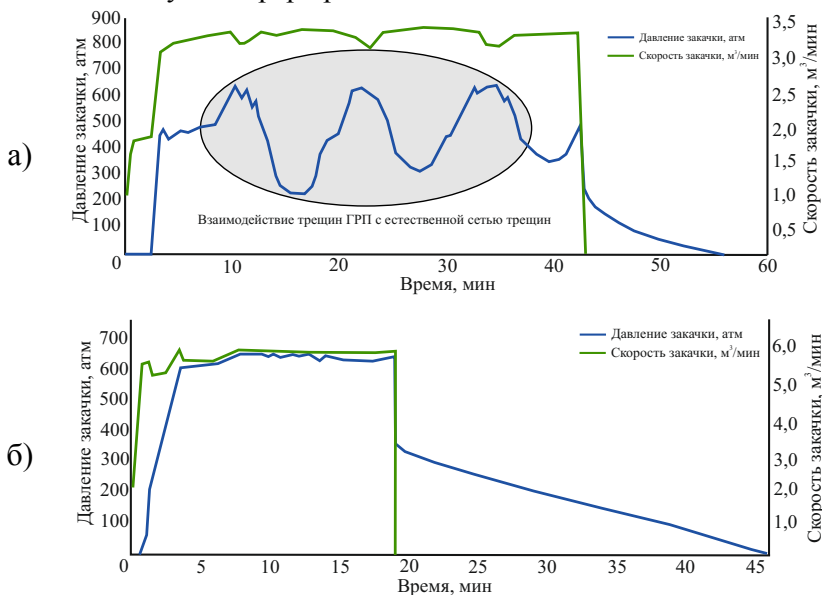


Рис.4. Кривая динамики давления и скорости закачки: а) при проведении первого ГРП; б) при проведении второго ГРП

В ходе проведения первой операции, проведение которой привело к развитию в пласте сложной системы трещин, динамика давления имеет сложный характер. И наоборот, проведение второго ГРП с более простой динамикой давления привело к образованию трещины ГРП

простой геометрии. Сопоставление графиков КВД и динамики давления на выкиде насосного агрегата по другим скважинам представлено в тексте диссертационной работы, и во всех случаях получен аналогичный результат.

Обобщая выполненные исследования, можно сделать вывод, что оптимальная технология проведения ГРП в рассматриваемых условиях должна обеспечивать создание сети трещин разрыва сложной геометрии, что достигается при невысоких скоростях закачки используемой жидкости. Признаком образования сети трещин сложной геометрии являются интенсивные колебания давления закачки и выделение нескольких экстремумов на графике, отражающем его динамику.

Четвертая глава диссертации посвящена установлению закономерностей пространственного размещения трещин гидроразрыва на основе изучения накопленного опыта проведения ГРП и использовании их в основе способа прогнозирования ориентации зон развития трещин гидроразрыва в карбонатных коллекторах. Основными методами контроля за развитием трещин являются микросейсмический мониторинг (МСМ) и волновой акустический каротаж (ВАК-Д). Однако массовое применение этих методов затруднено по причинам технологического и экономического характера. В данной работе для оценки пространственного размещения фактических трещин гидроразрыва использовалась известная и апробированная ранее косвенная методика, основанная на сравнительном анализе взаимодействия между скважинами. Направление трещинообразования оценено по изменению степени взаимодействия между скважинами исходя из предположения, что в результате гидравлического разрыва пласта в зоне трещинообразования изменяется проницаемость, что, безусловно, отражается на наличии и степени гидродинамической связи между скважинами. В качестве меры взаимодействия между скважинами используется коэффициент корреляции между дебитами жидкости скважины – объекта воздействия, и скважин, расположенных в непосредственной близости.

Практическое применение косвенной методики определения пространственного направления трещинообразования

проиллюстрировано на примере скв.423, характеризующейся наличием материалов волнового акустического каротажа (ВАК-Д).

Для всех скважин в пределах элемента системы разработки, включающего скв.423, рассчитаны значения коэффициентов корреляции r между дебитами жидкости до и после ГРП, вычислена их разница и построена схема изменения параметра Δr по площади элемента (рис.5а). Как следует из анализа рис.5а, максимальное изменение коэффициента корреляции между дебитами отмечается в направлении скв.433 и скв.427, что в полной мере подтверждается результатами ВАК-Д (рис.6).

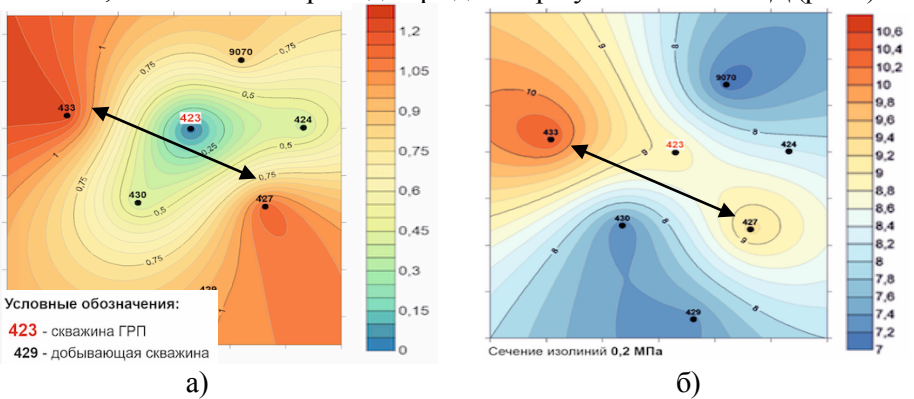


Рис. 5. Схема изменения параметра Δr на площади элемента системы разработки (а); схема распределения пластового давления в пределах элемента системы разработки до проведения ГРП (б)

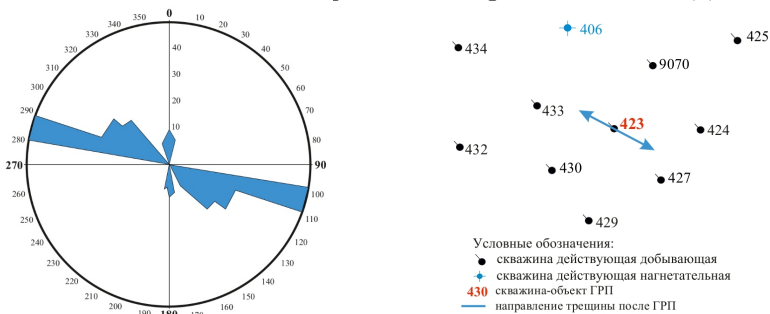


Рис. 6. Пространственное положение трещины ГРП по ВАК-Д

Всего на рассматриваемом объекте выполнено 30 операций по гидроразрыву пласта, и для каждой из них оценено направление трещинообразования. Следует отметить полное соответствие

полученных результатов материалам ВАК (для скважин, на которых ГРП сопровождался данным методом контроля).

Следующий этап работы заключался в выделении факторов, определяющих пространственную ориентацию трещин ГРП. В ходе анализа научной литературы установлено, что все существующие подходы к изучению направления трещины ГРП в качестве одного из показателей используют пластовое (внутипоровое) давление. В этой связи в ходе настоящего диссертационного исследования изучено влияние текущего пластового давления в пределах элемента системы разработки залежи, включающего скважину – объект ГРП, на пространственное размещение зоны трещинообразования. Для решения поставленной задачи потребовались данные о значениях пластового давления в зонах дренирования всех скважин на один момент времени, предшествующий гидроразрыву. Как отмечено ранее, гидродинамические исследования с определением пластового давления на скважинах объекта проводятся регулярно, но не одномоментно. Для воссоздания значений пластового давления во всех скважинах в один момент времени использованы методы искусственного интеллекта, реализованные в специальном модуле сервиса контроля разработки нефтяных месторождений Data Stream Analytics (DSA). Анализ достоверности расчетов выполнен с использованием соответствующих статистических критериев (коэффициент и график корреляции, уровень значимости и др.). В качестве иллюстрации на рис. 7 приведена динамика фактического и рассчитанного пластового давления по одной из скважин рассматриваемого объекта.

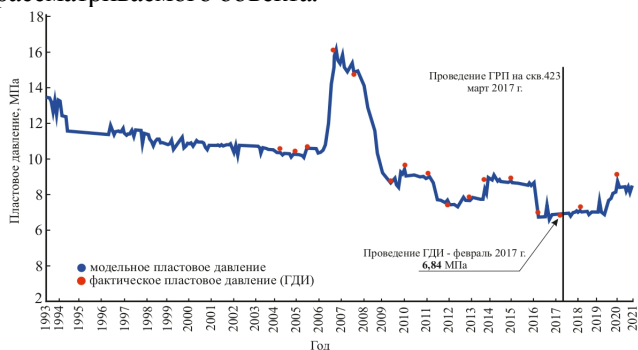


Рис. 7. Динамика фактического и модельного пластового давлений при эксплуатации скв.9070

Как следует из представленной диаграммы, методы искусственного интеллекта с высокой достоверностью воспроизводят значения пластового давления для скважин рассматриваемого объекта. Высокая достоверность используемого косвенного метода определения пластового давления позволила оценить энергетическое состояние элемента системы разработки непосредственно перед проведением гидравлического разрыва на скв.423, расположенной в пределах этого элемента. Результаты расчетов представлены в виде схемы распределения пластового давления – карты изобар, построенной для фрагмента залежи (рис.5б).

Как следует из анализа представленной на рис.5б схемы, максимальные для элемента значения пластового давления характерны для зон отбора скважин 433 и 427. В то же время, именно в направлении этих скважин установлено приоритетное развитие трещин (рис.5а, б). То есть в пределах рассматриваемого участка залежи трещины гидравлического разрыва сформировались в направлении зон с максимальным пластовым давлением. Совпадение пространственного размещения трещин ГРП и зон с наиболее высокими пластовыми давлениями (в пределах элементов системы разработки) установлены для 29 мероприятий из 30, выполненных на объекте, а также для нескольких десятков скважин расположенного в непосредственной близости Озерного месторождения (подтверждающие материалы приведены в тексте диссертации).

Таким образом, в ходе выполненного анализа установлено, что в пределах турнейско-фаменской залежи нефти рассматриваемого месторождения в результате гидравлического разрыва в пласте образуются трещины, ориентированные в зону с максимальным для участка пластовым давлением. Логичность данного вывода подчеркивает также классическая теория притока – дополнительно добываемый в результате воздействия флюид должен поступать из зоны большего давления в зону меньшей его величины.

Установленная закономерность формирования трещин ГРП в зоны с наиболее высокими пластовыми давлениями предложено использовать в качестве основы соответствующего способа. Сущность способа заключается в оценке энергетического состояния элемента системы разработки, в пределах которого размещена скважина – объект

планируемого гидроразрыва. При отсутствии актуальной информации о фактических пластовых давлениях их значения предлагается воспроизводить с использованием методов искусственного интеллекта, например, в ПО DSA. Предполагаемое направление зоны формирования трещины ГРП совпадает с максимальным для элемента пластовым давлением. На разработанный способ получен патент РФ.

Пятая глава диссертации посвящена изучению влияния геометрии трещин на технологическую эффективность выполненных ГРП на основе математической обработки соответствующего фактического промыслового материала, в том числе: дополнительной добычи нефти $Q_{\text{доп}}$, продолжительности эффекта $T_{\text{эф}}$, пластового давления в зоне отбора скважины – объекта воздействия до ГРП $P_{\text{пл}}$, скорости закачки жидкости разрыва в процессе ГРП $V_{\text{зак}}$, характеристика технологии гидроразрыва (без проппанта $I_{\text{пр}}=0$, проппантный $I_{\text{пр}}=1$), относительная емкость трещин после ГРП ω и др. Перечисленные показатели использованы в качестве исходных данных в корреляционном и регрессионном анализе.

Корреляционный анализ, в полном объеме представленный в тексте диссертационной работы, выполнен дифференцировано для мероприятий с простой и сложной геометрией образовавшихся трещин, подтвердил полученные ранее выводы о более высокой технологической эффективности ГРП при образовании в пласте сложной системы трещин и о непосредственном влиянии величины пластового давления, а также о нецелесообразности наращивания скоростей закачки жидкости разрыва.

В рамках выполненного регрессионного анализа построены многомерные статистические модели, демонстрирующие формирование дополнительной добычи нефти в результате проведения ГРП с образованием трещин простой и сложной геометрии.

Для скважин с образовавшимися трещинами ГРП простой геометрии уравнение регрессии имеет следующий вид:

$$Q_{\text{доп}}^{\text{M1}} = 96,44 - 11,74V_{\text{зак}} + 2,08P_{\text{пл}} + 3,70I_{\text{пр}}, \quad (6)$$

при $R=0,960$, $p < 0,036$. На первой позиции в модель включается скорость закачки, при этом знак параметра отрицательный, что означает приоритетное обратное его влияние на величину дополнительной добычи нефти от фактически проведенных ГРП. Положительный знак и

вторая позиция в модели также подтверждает установленный в диссертации факт влияния пластового давления на результаты гидроразрыва.

Для скважин со сложной геометрией образовавшихся трещин дополнительная добыча формируется в соответствии со следующей моделью:

$$Q_{\text{доп}}^{M2} = -2,325 + 192,61\omega - 0,84 I_{\text{пр}}, \quad (7)$$

при $R=0,966$, $p < 0,00000$.

Анализ модели (7) демонстрирует приоритетное прямое влияние емкости образовавшейся системы трещин на дополнительную добычу нефти.

Детальный анализ моделей (6) и (7), включающий описание процесса их формирования и статистические оценки работоспособности, в полном объеме приведены в тексте диссертационной работы.

Заключение

Таким образом, в ходе выполненного диссертационного исследования получены следующие выводы:

В условиях выбранного объекта исследования – турнейско-фаменской залежи Гагаринского месторождения, приоритетной технологией интенсификации добычи нефти является гидравлический разрыв пласта.

Детальный корреляционно-регрессионный анализ промысловых данных позволил обосновать четыре характерных диапазона дебитов, в пределах которых формирование притока происходит по индивидуальным законам. Для значительной доли скважин действующего добывающего фонда структура и свойства пустотного пространства являются факторами, формирующими дебит скважин и управляющими его величиной.

В условиях сложнопостроенных карбонатных коллекторов проведение ГРП не всегда приводит к образованию в пласте трещины в ее классическом представлении (простой трещины). Зачастую формируется сложная сеть трещин, которая описывается известной моделью «двойная пористость».

Сложная система трещин формируется при невысоких скоростях закачки жидкости разрыва. Признаком ее формирования является сложное поведение давления закачки (давления на выкиде насосного

агрегата). При этом сложная система трещин обеспечивает большие показатели технологического эффекта, по сравнению с трещинами простой геометрии.

Направления преимущественного трещинообразования в условиях рассматриваемого объекта совпадает с зонами максимальных для элемента системы разработки пластовых давлений.

Выполненные исследования отражают образование трещин при проведении ГРП в условиях одного объекта разработки – сложнопостроенной турнейско-фаменской карбонатной залежи Гагаринского месторождения. В настоящее время данные исследования тиражируются и подтверждаются в других геолого-физических условиях, что также продемонстрировано в работе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах цитирования Scopus и/или Web of Science

1. Dmitriy A. Martyushev, Inna N. Ponomareva, **Evgenii V. Filippov**. Studying the direction of hydraulic fracture in carbonate reservoirs: Using machine learning to determine reservoir pressure // Petroleum Research. – 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ptlrs.2022.06.003> (Scopus).

2. Д. А. Мартюшев, И. Н. Пономарева, **Е. В. Филиппов**, Л. Ювэй. Образование трещин гидравлического разрыва пласта в карбонатных сложнопостроенных коллекторах с естественной трещиноватостью // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 1. – С. 85–94 (Web of Science, Scopus, Перечень ВАК).

3. В. И. Галкин, И. Н. Пономарева, С. С. Черепанов, **Е. В. Филиппов**, Д. А. Мартюшев. Новый подход к оценке результатов гидравлического разрыва пласта (на примере бобриковской залежи Шершневого месторождения) // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – № 4. – С. 107–114 (Web of Science, Scopus, Перечень ВАК).

4. Ю. А. Кашников, С. Г. Ашихмин, С. С. Черепанов, Т. Р. Балдина, **Е. В. Филиппов**. Опыт создания ориентированной трещины

гидроразрыва пласта на месторождениях ООО "ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ" // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 6. – С. 40–43 (Scopus, Перечень ВАК).

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

5. **Филиппов Е. В.** Исследование закономерностей трещинообразования в сложнопостроенных карбонатных коллекторах по данным гидродинамических исследований скважин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 10 (358). – С. 47–52 (Перечень ВАК).

Авторские свидетельства и патенты

6. Пат. Рос. Федерации Способ прогнозирования пространственной ориентации трещин гидравлического разрыва пласта: пат. 2771648 RU / И. Н. Пономарева, Д. А. Мартюшев, **Е. В. Филиппов**; заявитель и патентообладатель: ФГАОУ ВО ПНИПУ. – № 2021118157; заявл. 21.06.2021, опубл. 11.05.2022.