

На правах рукописи

ЧУХЛОВ АНДРЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**ДИНАМИКА ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
КАРБОНАТНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ С РАЗЛИЧНОЙ
СТРУКТУРОЙ ПУСТОТНОГО ПРОСТРАНСТВА**

1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Пермь 2024

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

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

Официальные оппоненты: **Жуков Виталий Семенович**, доктор технических наук, доцент, главный сотрудник лаборатории современной и прикладной геодинамики ФГБУН «Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН» (ИФЗ РАН), г. Москва

Закиров Тимур Рустамович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математических методов в геологии ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», г. Казань

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный нефтяной технический университет», г. Уфа

Защита диссертации состоится 18 июня 2024 года в 14.00 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 ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (www.pstu.ru).

Автореферат розослан 12 марта 2024 г.

Ученый секретарь,
кандидат технических наук, доцент

Мелехин А.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Карбонатные коллектора, содержащие значительные ресурсы углеводородов, характеризуются сложной структурой пустот и, как следствие, неоднородным распределением флюидов в пустотном пространстве. На территории Пермского края к сложнопостроенным принято относить коллектора турнейско-фаменского возраста, промышленно нефтеносные на различных тектонических территориях региона. Сложная тектоническая деятельность приводит к формированию в их пределах гетерогенного спектра пустот, варьирующегося от макропор до пор нанометрового размера (<1 мкм). В свою очередь, особенности строения, размеры и другие свойств пустот во многом определяют специфику практически всех процессов, протекающих при выработке запасов углеводородов. При этом необходимой является информация об особенностях строения и свойствах коллекторов разного масштаба, от микро- до макроуровней. На практике данную информацию получают при реализации различных методов исследования, и нередкой является ситуация, когда разные методы приводят к получению противоречивых результатов.

Перспективным следует считать комплексное использование методов исследования, позволяющее получить максимально возможный объем достоверной информации о структуре и свойствах пустотного пространства в динамике разработки залежей углеводородов, что, в свою очередь, позволит повысить качество их геологического и гидродинамического моделирования.

Освещенность проблематики исследования.

Проблемам изучения особенностей строения и разработки залежей нефти в карбонатных коллекторах посвящено значительное количество работ российских и зарубежных исследователей, в том числе Г. И. Баренблатта, Р. Д. Каневской, Ш. К. Гиматудинова, В. Д. Викторина, В. Д. Лысенко, К. И. Багринцевой, С.О. Денка, В.М. Добрынина, Е. М. Смехова, Н.П. Лебединца, В. С. Жукова, R. Aguilera, D. Tiab, E. C. Donaldson, H. Kazeni, P. Pollard и др. Несмотря на значительное количество ранее выполненных исследований, проблематика особенностей формирования

фильтрационных характеристик карбонатных коллекторов с различной структурой пустотного пространства в различных тектонических условиях рассмотрена в недостаточной степени.

Целью работы является комплексное исследование фильтрационных характеристик карбонатных коллекторов с различной структурой пустотного пространства в процессе эксплуатации приуроченных к ним нефтяных месторождений.

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

1. Аналитический обзор научно-технической литературы по проблематике изучения строения и свойств пустотного пространства карбонатных коллекторов.

2. Комплексная оценка строения и свойств пустотного пространства коллекторов.

3. Исследование изменения фильтрационных свойств карбонатных коллекторов с различным строением пустотного пространства в процессе разработки залежей.

4. Изучение особенностей формирования притока жидкости к скважинам, эксплуатирующим карбонатные коллектора с различной структурой пустотного пространства.

Объект исследования – залежи нефти, приуроченные к турнейско-фаменским карбонатным коллекторам территории Пермского края.

Предмет исследования – строение пустотного пространства карбонатных коллекторов и изменение их фильтрационных свойств.

Научная новизна и теоретическая значимость выполненной работы представлена следующими положениями:

1. Впервые выполнена комплексная разномасштабная оценка строения и фильтрационных характеристик карбонатных коллекторов турнейско-фаменского возраста нефтяных месторождений Пермского края, расположенных в разных тектонических регионах.

2. На основе комплексного анализа разномасштабных исследований (кern-ГИС-ГДИ) доказано, что при идентичном мономинеральном составе карбонатных коллекторов турнейско-фаменского возраста строение и размеры пустот являются

основными факторами, определяющими особенности изменения их фильтрационных свойств в динамике разработки месторождений углеводородов.

3. Установлены индивидуальные особенности формирования притока жидкости к скважинам, эксплуатирующим карбонатные коллектора турнейско-фаменского возраста с различным строением пустотного пространства.

Практическая значимость работы обусловлена повышением детальности геологического и гидродинамического моделирования залежей нефти в сложнопостроенных карбонатных коллекторах за счет учета установленных в диссертационной работе особенностей их строения и свойств в динамике разработки месторождений углеводородов (Акт внедрения филиала ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «ПермНИПИнефть» в г. Перми).

Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSNM-2024-0005).

Методология и методы исследования. В работе использованы методы исследования образцов керна, в том числе методами сканирующей электронной микроскопии и рентгеновской микротомографии; стандартные и специальные методы геофизических исследований скважин; данные гидродинамических исследований скважин, интерпретированные в современном программном комплексе Carra Workstation; цифровые базы промысловых данных, обработанные с применением методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту:

1. Индивидуальные зависимости проницаемости от эффективного давления позволяют прогнозировать снижение фильтрационных свойств карбонатных коллекторов с различным строением пустотного пространства при их разработке.

2. Реализованный разномасштабный подход позволяет количественно оценить темпы снижения проницаемости карбонатного коллектора с различным строением пустотного пространства.

3. Дифференцированные условия формирования притока жидкости к скважинам в карбонатных коллекторах с различным строением пустотного пространства, установленные на основе многоуровневого многомерного статистического моделирования.

Степень достоверности результатов работы обусловлена комплексным применением прямых и косвенных методов определения искомых параметров и характеристик, подтверждаемостью выводов промысловыми данными. Достоверность построенных моделей установлена на основании анализа их статистических оценок, а также при сопоставлении расчетных и фактических значений моделируемых параметров. Выполнено лабораторное изучение 40 образцов керна и шлифов, привлечены заключения по 67 геофизическим исследованиям скважин стандартными и специальными методами, выполнена интерпретация материалов 170 гидродинамических исследований скважин методом восстановления давления.

Апробация результатов исследований.

Материалы диссертационных исследований апробированы на Всероссийском конкурсе «Новая идея» на лучшую научно-техническую разработку среди молодежи организаций и предприятий топливно-энергетического комплекса (г. Москва, 2017 г.), XI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Геология в развивающемся мире» (г. Пермь, 2018 г.), Международной научно-практической конференции «Теория и практика разведочной и промысловой геофизики» (г. Пермь, 2017–2021 гг.), Конкурсе молодых работников ООО «ЛУКОЙЛ-ПЕРМЬ» на лучшую научно-техническую разработку (2017–2021 гг.).

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 8 научных работах, в том числе 4 работы опубликовано в изданиях, входящих в международные базы цитирования (Scopus и Web of Science).

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 141 наименование, приложение. Работа изложена на

133 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка и 29 таблиц.

Автор выражает благодарность за поддержку и ценные советы в период проведения диссертационного исследования И. А. Черных, В. И. Галкину, Д. А. Мартюшеву, а также научному руководителю – И. Н. Пономаревой.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе выполнен сравнительный анализ методов изучения структуры и свойств пустотного пространства горных пород-коллекторов нефти и газа на основе аналитического обзора научной литературы. Выделены три основные группы методов, позволяющие оценивать характеристики пустотного пространства коллекторов на различных уровнях: исследования ядра позволяют детально оценивать структуру и свойства коллекторов на микроуровне, ГИС – в околоскважинной пространстве (мезоуровень), ГДИ – в пределах всей зоны дренирования пласта исследуемой скважиной (макроуровень). Комплексирование всех трех методов позволит реализовать многоуровневый (разномасштабный) подход к решению.

Вторая глава диссертации посвящена выбору объектов исследования. Обоснована целесообразность изучения характеристик коллекторов в различных геологических (тектонических) условиях. В качестве объектов выбраны турнейско-фаменские залежи нефти месторождений, приуроченных к двум представительным геологическим территориям края – Башкирскому своду (Винниковское и Софьинское), находящемуся в платформенных условиях, а также Соликамской депрессии (им. Сухарева), находящейся в условиях Предуральяского прогиба. Для указанных месторождений характерно наличие опыта проведения геофизических и гидродинамических исследований, а также кернового материала, что позволило реализовать разномасштабный подход к изучению структуры и свойств пустотного пространства. Данные о

значениях глубин и фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коллекторов представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл.1, показывает, что изучаемые параметры близки для месторождений Башкирского свода (БС), и значительно отличаются от характеристик для месторождения, приуроченного к Соликамской депрессии (СолД).

Таблица 1 – Средние значения глубин и ФЕС объектов

Показатель	Софьинское	Винниковское	им. Сухарева	$\frac{t^*}{p}$	$\frac{\chi^{2**}}{p}$
Глубина залегания, м	1637±51	1602±20		$\frac{2,02}{0,59}$	$\frac{3,50}{0,17}$
	1637±51		2469±221	$\frac{-10,98}{0,00}$	$\frac{37,3}{0,00}$
		1602±20	2469±221	$\frac{-12,29}{0,00}$	$\frac{44,4}{0,00}$
Коэф-т пористости, %	10,4±1,7	10,4±0,9		$\frac{0,08}{0,94}$	$\frac{0,41}{0,98}$
	10,4±1,7		8,9±2,5	$\frac{1,52}{0,14}$	$\frac{3,53}{0,17}$
		10,4±0,9	8,9±2,5	$\frac{1,69}{0,11}$	$\frac{4,00}{0,13}$
Коэф-т прониц-ти, мД	25,4±20,2	27,9±6,1		$\frac{-0,19}{0,85}$	$\frac{0,50}{0,89}$
	25,4±20,2		182,9±1461	$\frac{-2,25}{0,03}$	$\frac{4,18}{0,01}$
		27,9±6,1	182,9±1461	$\frac{-2,35}{0,02}$	$\frac{4,00}{0,13}$

Примечание: * - критерий Стьюдента; ** - критерий Пирсона.

Выполненный таким образом выбор объектов исследования позволит изучить особенности строения пустотного пространства коллекторов залежей нефти, приуроченных к различным тектоническим территориям (прогиб и платформа), а также особенности изменения их фильтрационных характеристик в процессе разработки, чему посвящены следующие главы диссертационной работы.

В третьей главе выполнен анализ разномасштабных исследований структуры и свойств пустотного пространства коллекторов рассматриваемых залежей нефти.

Микроуровень оценен по данным лабораторных исследований керна, в ходе которых выполнено его литолого-петрофизическое описание, рентгенофазный анализ (РФА), сканирующая электронная микроскопия (СЭМ), рентгеновская компьютерная микротомография (КТ). Исследования керна позволили установить значимые различия в строении пустотного пространства изучаемых коллекторов, что демонстрируют данные КТ (табл.2).

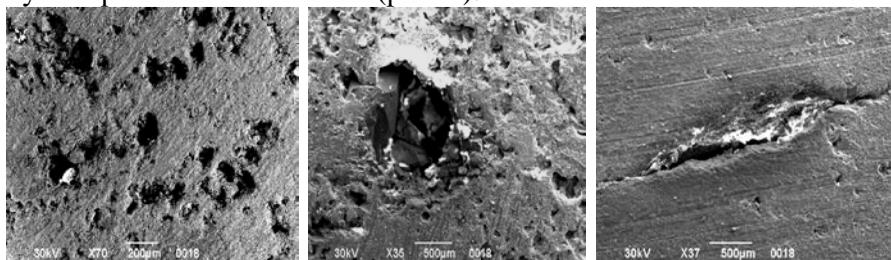
Таблица 2 – Распределения размеров пустот (КТ)

Месторождение	Размеры пустот, мкм						
	< 25	25-70	70-140	140-210	210-280	280-350	>350
Винниковское	0,17	52,58	39,86	6,84	0,48	0,07	
Софьинское	0,02	25,78	44,68	19,37	5,68	2,52	1,52
им. Сухарева	0,01	30,69	37,67	19,39	5,84	3,18	4,22

При сравнительном анализе данных КТ керна установлен ряд различий в размерах пустот рассматриваемых коллекторов. Для Винниковского и Софьинского месторождений наблюдаются резко выраженные моды значений в интервалах низких размеров пустот, тогда как для месторождения им. Сухарева мода по распределению размеров пустот не так рельефно выражена. Наличие некоторых смещений относительно друг друга модальных интервалов и наличие достаточно значительного интервала с высокими значениями частот, вероятно, свидетельствуют о том, что для Софьинского месторождения характерно наличие как первичных (сингенетических), так и вторичных (эпигенетических) пустот, тогда как в керне Винниковского месторождения, в основном, выделены первичные межкристаллические поры. В коллекторе Софьинского месторождения вторичная пустотность выражена незначительно (1,5 %), тогда как для месторождения им. Сухарева пустоты размером > 350 мкм присутствуют в значительно большем количестве (4,2 %). Вероятно, присутствие

более крупных пустот в коллекторе месторождения им. Сухарева связано с интенсивным проявлением эпигенетических процессов. По данным КТ установлены также существенные отличия по общему количеству пустот: Винниковское – 964 477, Софьинское – 703 537, им. Сухарева – 451 816. Таким образом, пустотное пространство изучаемых коллекторов отличается и по суммарному количеству пустот, и по плотностям распределений их размеров.

Результаты сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) подтверждают наличие в породах изучаемых месторождений пустот различного генезиса (рис. 1).



Винниковское

Софьинское

им. Сухарева

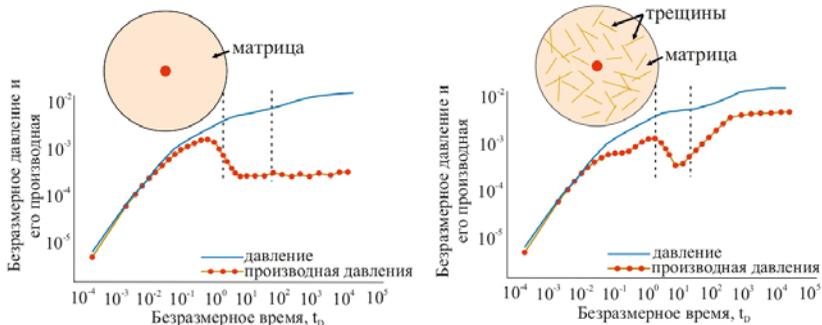
Рис.1. Результаты сканирующей электронной микроскопии

Обобщая результаты лабораторных исследований керн и их статистической обработки, можно сделать вывод о том, что при одинаковом мономинеральном составе горных пород строение их пустотного пространства характеризуется принципиальными отличиями на микроуровне, что, вероятно, объясняется их генетическими особенностями.

Сравнительный анализ строения коллекторов на мезоуровне выполнен по данным стандартных и специальных методов ГИС, материалы которых свидетельствуют о поровом типе коллектора Винниковского месторождения, порово-каверновой и каверновой структуре пустотного пространства для Софьинского месторождения. Для коллектора месторождения им. Сухарева характерно наличие пустот порового, смешанного и каверно-трещинного типа. Отмечено, что пересчет пористости по ГИС в проницаемость через петрофизическую зависимость сопровождается неточностями, что подчеркивает актуальность

гидродинамических исследований методом восстановления давления (КВД) как надежного инструмента изучения фильтрационных свойств коллекторов.

Первые после ввода скважин в эксплуатацию кривые восстановления давления, характерные для скважин рассматриваемых месторождений, приведены на рис.2.



Винниковское и Софьинское

им. Сухарева

Рис.2. Характерные кривые восстановления давления скважин рассматриваемых месторождений

Графики КВД скважин Винниковского и Софьинского месторождений имеют вид, свидетельствующий о поровом строении пустотного пространства коллекторов. Кривые восстановления давления большинства скважин месторождения им. Сухарева имеют вид, соответствующий модели коллектора «двойная пористость», что подтверждает полученный ранее вывод о наличии в объеме породы вторичных (эпигенетических) пустот, в том числе проводящих трещин.

Таким образом, наличие вторичных пустот значительного размера является характерной особенностью коллекторов месторождения им. Сухарева, что подтверждено на микро- (керна), мезо- (ГИС) и макроуровнях (ГДИ) и обусловлено, вероятно, его принадлежностью к Предуральскому прогибу.

Гидродинамические исследования, в отличие от керна и ГИС, позволяют оценить и начальные фильтрационные характеристики коллектора, и их изменение в процессе разработки месторождений. С этой целью по скважинам рассматриваемых месторождений привлечены и интерпретированы все ГДИ, в

результате установлен факт непрерывного снижения проницаемости коллекторов рассматриваемых месторождений в процессе их разработки, что, вероятно, обусловлено деформацией пустотного пространства. Для рассматриваемых месторождений установлен различный характер снижения проницаемости.

Для изучения данного явления выполнен анализ совместного (комплексного) влияния на величину текущей проницаемости (k_t) следующих геолого-технологических показателей эксплуатации скважин: $Q_{жт}$ – дебит жидкости; T – продолжительность эксплуатации скважины; h – толщина пласта; $P_{заб}$, $P_{пл}$ – забойное и пластовое давления; $I_{гр}$ – индекс наличия границ; $R_{др}$ – радиус зоны дренирования; W – обводненность; k_0 – начальная проницаемость (определенная по первому ГДИ). По этим данным построены многомерные модели, исследование которых позволило изучить процесс формирования проницаемости рассматриваемых коллекторов в динамике разработки приуроченных к ним залежей. Полученные многомерные статистические модели приведены ниже:

Винниковское месторождение:

$$k_t = 2,82Q_{ж\Box} - 0,02T + 3,11h - 53,93; \quad (1)$$

формирование результирующего коэффициента детерминации R в процессе построения модели происходит следующим образом: 0,487→0,652→**0,748**

Софьинское месторождение:

$$k_t = 5,84P_{заб} - 0,01T - 3,59h + 2,33P_{пл} - 6,0I_{гр} + 54,91; \quad (2)$$

R: 0,478→0,595→0,701→0,789→**0,809**

Месторождение им. Сухарева:

$$k_t = 0,57R_{др} + 0,19k_0 - 36,57h - 7,52W - 0,09T - 4,98Q_{ж\Box} + 21,31P_{пл} + 69,16 \quad (3)$$

R: 0,350→0,481→0,597→0,697→0,777→0,837→**0,874**

Модели (1)–(3) являются статистически значимыми (во всех случаях уровень значимости $p < 0,05$). Формирование моделей происходило в последовательности, приведенной в уравнениях регрессии.

Анализ представленных уравнений позволяет выполнить сравнительную оценку закономерностей изменения

проницаемости на рассматриваемых месторождениях. В каждой модели использовано время T с отрицательным знаком, что свидетельствует о снижении проницаемости коллектора в процессе разработки всех трех залежей. Необходимо отметить факт снижения проницаемости коллектора в процессе разработки Винниковского и Софьинского месторождений, для которых ни на одном из уровней исследования не установлена трещиноватость. Очевидно, деформация пустотного пространства характерна для коллекторов не только трещинного, но и порового типа, что подчеркивает актуальность ее исследований и учета при геологическом и гидродинамическом моделировании залежей нефти в карбонатных коллекторах.

В научно-технической литературе (Bernabe Y., 1986; Жуков В.С. и др., 2019) приводятся данные о влиянии структуры пустотного пространства на изменение проницаемости коллектора, согласно которым признаком деформации пустотного пространства является наличие зависимости нормированной проницаемости (отношение текущей проницаемости к значению, соответствующему атмосферным условиям) от эффективного давления (рис.3). При этом числовое значение показателя степени в аппроксимирующем уравнении для каждого типа пустот находится в своем характерном диапазоне.

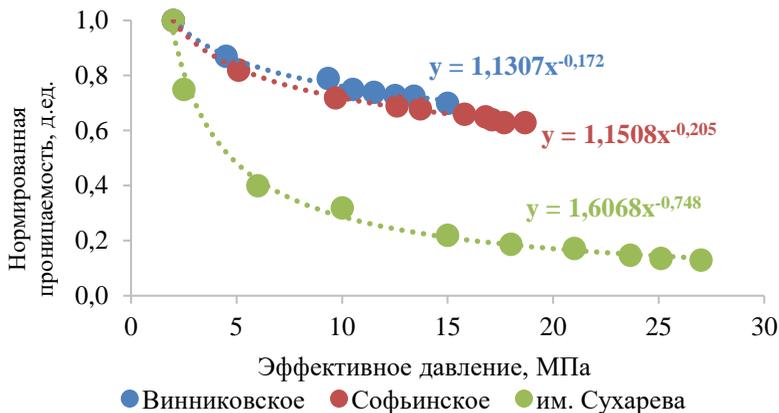


Рис. 3. Зависимость нормированной проницаемости от эффективного давления

Во всех случаях график нормированной проницаемости от эффективного давления аппроксимируется зависимостью, значения показателя степени составляют: для Винниковского месторождения - 0,172, для Софьинского - 0,205, для месторождения им. Сухарева - 0,748. Значительно отличающийся показатель для месторождения им. Сухарева свидетельствует о более выраженном изменении проницаемости коллектора, что, в свою очередь, объясняется установленными ранее особенностями строения его пустотного пространства – наличием значительного количества крупных вторичных пустот. Данные, представленные на рис.3, подтверждают полученные ранее выводы о различиях в строении пустотного пространства и характере изменения проницаемости коллектора месторождений в различных тектонических условиях.

Отмеченное явление о вероятной деформации пустотного пространства карбонатных коллекторов как порового, так и трещинно-порового типа, обусловило необходимость его более детального исследования, и с этой целью построены и в полном объеме приведены в тексте диссертационной работы зависимости проницаемости коллектора от пластового давления, также характеризующего период проведения каждого ГДИ. Во всех случаях установлены тесные корреляционные связи между проницаемостью и пластовым давлением. Угловые коэффициенты аппроксимирующих линейных уравнений по своему смыслу характеризуют темпы снижения проницаемости при снижении пластового давления. В данной работе этот параметр обозначен как коэффициент деформации (k_d) – изменение проницаемости, приходящееся на единицу снижения пластового давления. Сопоставление уравнений, аппроксимирующих полученные зависимости, позволило установить следующую закономерность: при снижении пластового давления на 1 МПа проницаемость коллектора на месторождении им. Сухарева уменьшается на 34 мД, на Софьинском месторождении – на 5,44 мД, на Винниковском – на 0,64 мД. То есть максимальное изменение пустотного пространства характерно для коллектора месторождения

им. Сухарева, минимальное – для Винниковского. Таким образом, темп снижения проницаемости коллектора при уменьшении давления определяется размером пустот. Наиболее интенсивно снижается проницаемость коллектора, пустотное пространство которого представлено крупными вторичными пустотами, как для месторождения им. Сухарева. Для иллюстрации данного вывода на рис.4 представлена диаграмма, отражающая зависимость коэффициента деформации от эффективного диаметра пустот, определенного по данным КТ. Также на диаграмме представлен вычисленный показатель сферичности пустот (отношение размеров длинной и короткой осей). При построении диаграммы привлечены материалы по скважинам, эксплуатирующим турнейско-фаменские отложения других месторождений Пермского края. Сложность указанного исследования заключается в необходимости одновременного привлечения значительного количества материалов: керн из части разреза, обеспечивающей приток, и не менее пяти проведенных высокоинформативных ГДИ по этой же скважине.

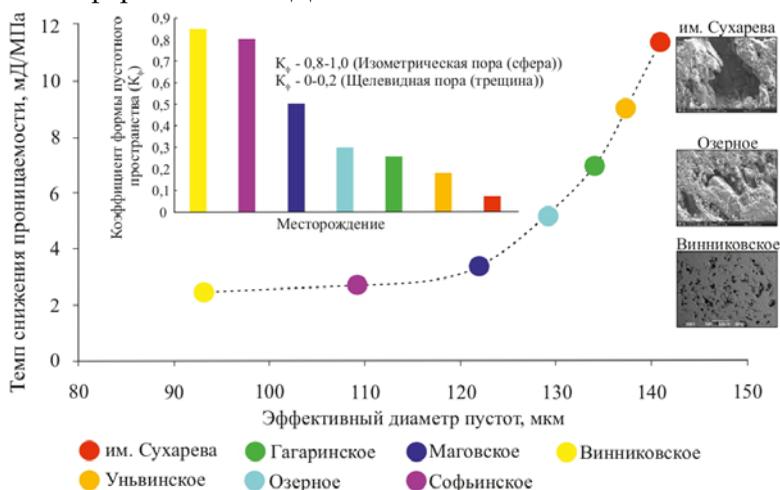


Рис.4. Зависимость темпа снижения проницаемости от эффективного диаметра пустот

Таким образом, размер пустот является основным фактором, определяющим темп снижения проницаемости

коллектора при уменьшении внутриворонного давления. Установленные особенности строения и изменения фильтрационных свойств рассматриваемых коллекторов, вероятно, значительно влияют на формирование притока флюидов. Исследованию данного вопроса посвящена следующая глава настоящей диссертационной работы.

Четвертая глава посвящена изучению особенностей формирования притока жидкости к скважинам в рассматриваемых коллекторах посредством многомерного регрессионного анализа. Решение поставленной задачи осуществляется при построении многомерных статистических моделей дебита жидкости в зависимости от следующего комплекса геолого-технологических показателей (170 определений): $H_{кр}$ – глубина кровли пласта; h – толщина пласта; $P_{заб}$, $P_{пл}$ – забойное и пластовое давления; $R_{др}$ – радиус зоны дренирования; W – обводненность; k – проницаемость коллектора, определенная по ГДИ; S – скин-фактор; Γ_{ϕ} – газовый фактор; $I_{гр}$, $I_{тр}$, $I_{ств}$ – индексы, характеризующие наличие границ, трещин и конструкцию ствола скважин. При построении моделей использован многоуровневый принцип.

Моделирование первого уровня нацелено на получение универсального уравнения, описывающего приток флюида для всех рассматриваемых объектов ($Q_{ж}^{M0}$):

$$Q_{ж}^{M0} = 0,06H_{кр} + 1,54P_{заб} - 4,70I_{гр} + 1,74P_{пл} + 0,01R_{др} + 0,92h - 0,81S - 0,15\Gamma_{\phi} - 0,01k + 6,92I_{тр} - 5,66I_{ств} \quad (4)$$

R: 0,669→0,773→0,794→0,806→0,815→0,822→0,828→0,836→0,842→0,848→**0,850**

Уравнение (4) является статистически значимым ($p < 0,05$). В качестве формирующих показателей модель включает обширный комплекс геологических и технологических параметров, что свидетельствует об их совместном влиянии на дебит жидкости в условиях рассматриваемых коллекторов. Несмотря на высокие статистические оценки уравнения (4), анализ корреляционных полей, сопоставляющих модельные и фактические дебиты,

позволил установить различную прогностическую способность модели для разных месторождений, что обусловило необходимость дальнейшего моделирования.

На втором уровне выполнено моделирование индивидуально для каждого из трех месторождений (в полном объеме представлено в тексте диссертации). Характеристики моделей представлены в табл.3.

Таблица 3 – Характеристики моделей второго уровня

Перечень используемых показателей для месторождений		
Винниковское	Софьинское	им. Сухарева
$R_{др}, k, \Gamma_{\phi}, I_{гр},$ $I_{гр}, P_{заб}, W, P_{пл}, S$	$R_{др}, S, h, P_{пл},$ $H_{кр}, \Gamma_{\phi}$	$P_{заб}, k, S, P_{пл},$ $I_{ств}, R_{др}, h, H_{кр}$
Формирование коэффициента детерминации		
R: 0,63→0,81→0,86→ →0,88→0,89→0,90→ 0,910→0,913→ 0,915	R: 0,65→0,75→0,82→ →0,86→ 0,88	R: 0,720→0,760→ 0,790→0,812→0,820→ 0,831→0,836→ 0,839

Примечание: для всех моделей $p < 0,05$

Как следует из анализа табл.3, формирование моделей для рассматриваемых месторождений происходило по различающейся совокупности показателей. Дебит скважин на месторождении им. Сухарева формируется по принципиально иному сценарию, чем для скважин Винниковского и Софьинского месторождений, что подчеркивает целесообразность индивидуального подхода к изучению и управлению притоком жидкости при разработке месторождений, расположенных в различных тектонических регионах.

При анализе корреляционных полей, сопоставляющих фактические и рассчитанные по моделям второго уровня дебиты, установлена недостаточная работоспособность данных моделей, особенно в диапазонах более высоких дебитов. В этой связи выполнено детальное статистическое исследование – пошаговое многомерное моделирование по нарастающей выборке (в полном объеме представленное в тексте диссертационной работы), при котором первая модель построена по минимальному количеству предварительно отранжированных данных ($n=3$), далее выборка пошагово увеличивалась, и на каждом шаге строилась модель с

оценкой ее статистических характеристик. Анализ моделей в динамике их построения, включающий изучение используемых параметров, шагов их включения и статистических оценок, позволил оценить особенности формирования притока на различных диапазонах дебитов. В качестве иллюстрации на рис.5 приведены графики изменения одной из основных характеристик многомерных моделей – коэффициента детерминации, на различных диапазонах дебитов.

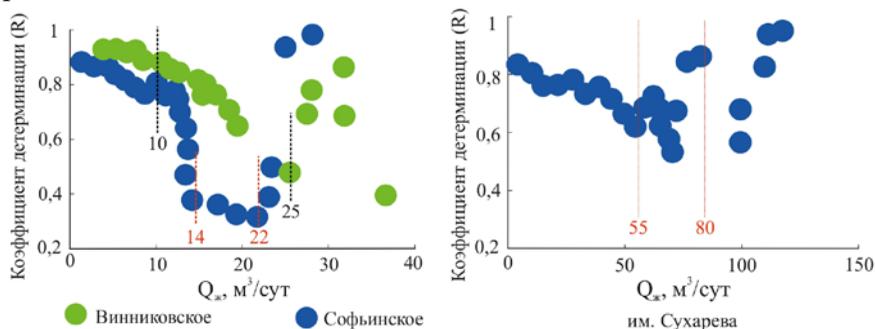


Рис.5. Изменение коэффициента детерминации при пошаговом регрессионном анализе на различных диапазонах дебитов жидкости

Характерное поведение коэффициента детерминации на различных диапазонах дебитов свидетельствует об индивидуальных принципах формирования прогнозируемого параметра в этом диапазоне. При анализе графиков для каждого месторождения выделены три диапазона характерного изменения коэффициента R (табл.4). Разделение выборки на диапазоны подтверждено результатами линейного дискриминантного анализа. Необходимо отметить, что диапазоны дебитов для Винниковского и Софьинского месторождений близки, но весьма отличаются от диапазонов для месторождения им. Сухарева.

Установленное разделение данных обусловило необходимость третьего уровня моделирования, дифференцированно для каждого из диапазонов дебитов (табл.4). Анализ характеристик данных моделей, позволяет оценить индивидуальные условия притока в пределах каждого из диапазонов дебитов рассмотренных месторождений. Сопоставление фактических и

модельных дебитов, полученных на всех уровнях статистического моделирования, приведено на рис.6.

Таблица 4 – Характеристики моделей третьего уровня

Диапазон	Характеристики моделей для месторождений		
	Винниковское	Софьинское	им. Сухарева
1	$< 10 \text{ м}^3/\text{сут}$	$< 14 \text{ м}^3/\text{сут}$	$< 55 \text{ м}^3/\text{сут}$
	$I_{гр}, I_{тр}, \Gamma_{ф}, H_{кр}, S$	$H_{кр}, h, P_{пл}, R_{др}$	$h, P_{пл}, W, R_{др}, \Gamma_{ф}, H_{кр}$
	$R = 0,997$	$R = 0,999$	$R = 0,999$
2	$10 \dots 25 \text{ м}^3/\text{сут}$	$14 \dots 22 \text{ м}^3/\text{сут}$	$55 \dots 80 \text{ м}^3/\text{сут}$
	$k, P_{заб}, \Gamma_{ф}, W, R_{др}$	$m, P_{пл}, \Gamma_{ф}, I_{тр}, I_{гр}, W, k, S$	$W, S, P_{пл}, \Gamma_{ф}, h, k, S, I_{ств}$
	$R = 0,901$	$R = 0,999$	$R = 0,850$
3	$> 25 \text{ м}^3/\text{сут}$	$> 22 \text{ м}^3/\text{сут}$	$> 80 \text{ м}^3/\text{сут}$
	$S, W, \Gamma_{ф}, P_{пл}, R_{др}, h, k, m, H_{кр}, P_{заб}$	$H_{кр}, R_{др}, h, S, P_{пл}, m, I_{гр}, W, \Gamma_{ф}$	$P_{пл}, S, P_{заб}, h, W$
	$R = 0,999$	$R = 0,949$	$R = 0,821$

Примечание: для всех моделей $p < 0,05$

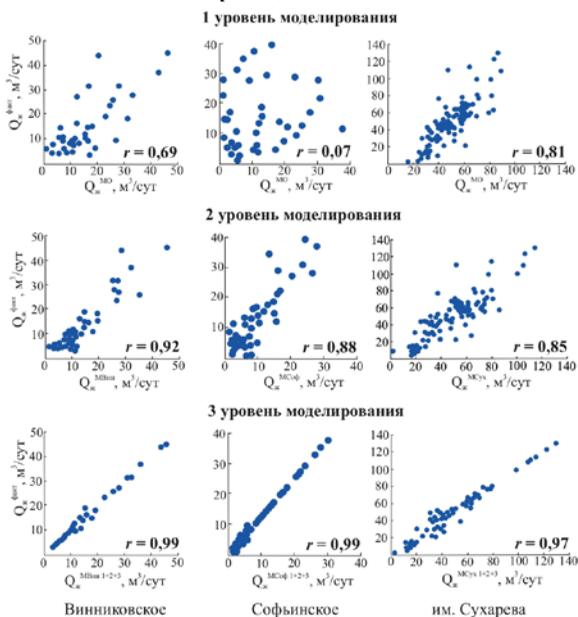


Рис. 6. Сопоставление модельных и фактических дебитов скважин рассматриваемых месторождений для трех уровней моделирования

Анализ данных полей показывает, что для Винниковского месторождения с наиболее простым строением пустотного пространства, на всех уровнях статистического моделирования наблюдаются тесные корреляционные связи между фактическими и рассчитанными дебитами. Более сложное строение коллектора Софьинского месторождения, выражающееся в наличии первичных и вторичных пустот, обусловило отсутствие корреляционной связи между фактическими и рассчитанными по модели первого уровня дебитами. Моделирование второго и третьего уровней позволило улучшить данную корреляционную связь. Превалирование крупных вторичных пустот в коллекторе месторождения им. Сухарева в некоторой степени упрощает его строение по сравнению с Софьинским месторождением. В результате все три уровня статистического моделирования для месторождения им. Сухарева обеспечивают тесную корреляционную связь между фактическими и рассчитанными дебитами.

Таким образом, наличие в объеме коллектора и первичных, и вторичных пустот в сопоставимых количествах в значительной степени усложняет процессы фильтрации (притока) жидкости в карбонатных коллекторах.

Заключение

В ходе выполненного диссертационного исследования получены следующие выводы:

1. Выполненный аналитический обзор научно-технической литературы позволил установить, что известные методы изучения свойств демонстрируют неустойчивые результаты при их проведении в сложнопостроенных карбонатных коллекторах. Направлением решения указанной проблемы следует считать комплексирование применяемых методов, что обеспечит получение информации о строении и свойствах коллектора в разном масштабе.

2. Проведение лабораторных исследований керн позволило установить значимые различия в строении пустотного пространства (при схожем мономинеральном составе). Коллектор Винниковского месторождения характеризуется наличием первичных межкристаллических пор, Софьинского – наличием первичных и вторичных пустот. Для месторождения им. Сухарева характерно

наличие крупных вторичных пустот. Уставленные особенности подтверждены материалами ГИС и ГДИ.

3. Установлено, что инструментом достоверного определения фильтрационных свойств рассматриваемых коллекторов являются гидродинамические исследования. По данным специально выполненной интерпретации всех ГДИ продемонстрирован факт снижения проницаемости коллекторов рассматриваемых месторождений в процессе их эксплуатации. Применение разномасштабных методов изучения структуры и свойств пустотного пространства методов позволило доказать, что размер пустот является основным фактором, объясняющим различную динамику проницаемости коллекторов в процессе выработки запасов. На основе промысловых данных получены индивидуальные зависимости проницаемости карбонатных коллекторов с различным строением пустотного пространства от эффективного давления. Установлено наличие обобщенной зависимости темпа снижения проницаемости карбонатного коллектора от эффективного диаметра пустот.

4. Выполненное многоуровневое многомерное статистическое моделирование позволило получить работоспособные модели дебитов и установить выраженные различия в формировании притока жидкости для карбонатных коллекторов с различной структурой пустотного пространства. Установлено, что наличие в объеме горной породы первичных и вторичных пустот в сопоставимом количестве в значительной степени усложняет процессы фильтрации (притока).

Следует считать целесообразным использование индивидуального подхода к изучению и управлению притоком флюидов к скважинам, эксплуатирующим карбонатные коллектора, что успешно решается при использовании многомерного многоуровневого статистического моделирования, основанного на комплексном использовании материалов разномасштабных методов исследования коллекторов и геолого-технологических показателей эксплуатации скважин.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

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

1. Martyushev D.A., Ponomareva I.N., **Chukhlov A.S.**, et al. Study of void space structure and its influence on carbonate reservoir properties: X-ray microtomography, electron microscopy, and well testing // Marine and Petroleum Geology. 2023. Vol. 151. 106192. (Scopus, WoS).
2. Мартюшев Д.А., Пономарева И.Н., Осовецкий Б.М., Казымов К.П., Томилина Е.М., Лебедева А.С., **Чухлов А.С.** Изучение особенностей строения и разработки залежей нефти в карбонатных коллекторах с использованием промысловых данных и рентгеновской микрофотографии // Георесурсы. 2022. Т. 24. № 3. С. 114-124. (WoS).
3. **Chukhlov, A.S.**, Galkin, V.I., Ponomareva, I.N., Chernykh, V.I. Study of the reliability of the determination of reservoir characteristics of productive formations in the Stretenskoye field using correlation analysis // IOP Conference. 2022. 1021(1), 012049. (Scopus).
4. Ismagilov R.F., Chernykh I.A., **Chukhlov A.S.** et al. Optimization of the reservoir pressure maintenance system in a low-permeability carbonate field // Society of Petroleum Engineers. 2021, RPTC 2021. (Scopus).

Публикации в ведущих рецензируемых научных изданиях

5. **Чухлов А.С.** Сравнительный анализ структуры пустотного пространства карбонатных коллекторов фаменских отложений // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 2023. № 2. С.42-48. (перечень ВАК).
6. **Чухлов А.С.**, Сальникова О.Л., Черных В.И. Оценка влияния геолого-физических характеристик залежей со сложным геологическим строением на условия притока углеводородов // Недропользование. 2022. Т. 22. № 1. С. 9-14. (перечень ВАК).
7. Сальникова О.Л., **Чухлов А.С.**, Луппов В.И. Эффективность разработки коллекторов со сложнопостроенной структурой порового пространства на месторождениях Пермского края // Геофизика. 2021. № 5. С. 60-67. (перечень ВАК).
8. Горбачева А.П., Сальникова О.Л., Серкина А.В., Савич А.Д., **Чухлов А.С.** Повышение эффективности проведения ГИС за счет использования новых технологий и методов // Геофизика. 2018. № 5. С. 70-80. (перечень ВАК).