На правах рукописи

МОСКАЛЕНКО НАТАЛЬЯ ЮРЬЕВНА

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННО-ЕМКОСТНЫХ СВОЙСТВ И НАСЫЩЕННОСТИ КОЛЛЕКТОРОВ СЕНОМАНА ПО КОМПЛЕКСУ КЕРН-ГИС НА ОСНОВЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СЛАБОСЦЕМЕНТИРОВАННОГО КЕРНА

Специальность 1.6.9 – Геофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Тюмень – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тюменский индустриальный университет»

Научный руководитель: **Мамяшев Венер Галиуллинович** – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры прикладной геофизики ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», г. Тюмень

Официальные оппоненты: **Коваленко Казимир Викторович** – доктор геолого-минералогических наук, доцент, профессор кафедры геофизических информационных систем, ФГАОУ ВО «Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина», г. Москва

Зубков Михаил Юрьевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, директор ООО «Западно–Сибирский геологический центр», г. Тюмень

Ведущая организация: ООО «Тюменский нефтяной научный центр» ПАО НК «Роснефть», г. Тюмень

Защита состоится 10 февраля 2023 г. в 16:00 на заседании диссертационного совета Д 24.2.419.04 на базе Тюменского индустриального университета по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 56, Институт геологии и нефтегазодобычи, аудитория 113.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотечно-информационном центре ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет» по адресу: 625039, г. Тюмень, ул. Мельникайте, 72, и на сайте ТИУ www.tyuiu.ru.

Отзывы, заверенные печатью учреждения, в двух экземплярах просим направлять по адресу: 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, ученому секретарю диссертационного совета Д 24.2.419.04.
Факс: 8(3452) 39-03-46, e-mail: semenovatv@tyuiu.ru
Автореферат диссертации разослан 17 декабря 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета, Д 24.2.419.04, к.г.-м.н. Семенова Татьяна Владимировна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Комплекс терригенных осадочных отложений сеноманского возраста Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции содержит в себе уникальные по объемам запасы газа и нефти. Продуктивность этих отложений установлена на обширной территории от северных районов Ханты-Мансийского автономного округа и практически на всей территории Ямало-Ненецкого автономного округа. Примерами являются Уренгойское, Ямбургское, Мессояхское, Пякяхинское, Находкинское, Русское и другие месторождения.

Залежи газа и нефти сеноманского осадочного комплекса приурочены к пластам $ПК_{1-3}$ покурской свиты, сложенным преимущественно слабосцементированными песчано-алевритовыми породами. Слабая цементация пород-коллекторов стала причиной серьёзных трудностей в изучении и освоении приуроченных к ним залежей и месторождений.

Несмотря на развитие технологий, результаты петрофизических исследований, результаты и оценки, представляемые разными организациями и авторами, существенно различаются между собой. Это обусловлено особенностями методик и технологий лабораторных исследований в разных организациях. Поэтому важно установить и исключить факторы, снижающие достоверность петрофизических исследований сеноманского керна, предложить усовершенствованные методики, обосновать критерии контроля качества результатов исследований и обеспечить их приведение к единым условиям. Особенно актуально это для новых разведываемых и вводимых в разработку месторождений, в частности, на территории Большехетской зоны и всего Гыданского полуострова.

Степень разработанности темы исследования

Необходимость целенаправленных исследований слабосцементированных пород-коллекторов газа и нефти в нашей стране стала очевидной ещё в начале 70-х годов XX в. в связи с открытием крупных и гигантских залежей газа в комплексе пород сеноманского возраста на севере Западной Сибири. Рассмотрение первых же отчетов по оценкам запасов, представленных в середине 70-х годов в ГКЗ СССР, выявило проблемы в применяемых технологиях работ. Прежде всего, был отмечен крайне низкий вынос керна, в среднем составлявший около 30-35 %, а также невозможность изготовления образцов из слабосцементированных песчаников.

Решением обнаруженных проблем занимались не только подразделения Главтюменьгеологии (ТЦЛ, ЗапСибНИГНИ, ЗапСибВНИИГеофизика, ЗапСибБурНИПИ), но и отраслевые институты (ВНИИГаз, ВНИИБТ, ВНИИГеофизика, ВНИГНИ и другие). Они продолжили разработку методик исследования слабосцементированных пород, начало которой положено в нашей стране трудами М. К. Калинко, Ф. И. Котяхова, А. А. Ханина. Впоследствии в эти исследования внесли вклад специалисты таких предприятий, как ООО «Арктик-ГЕРС», ФГБУ «ВНИГНИ», ООО «ЗапСибГЦ», ООО «Корэтест сервис», ЦИКиПФ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг», «РГУ нефти и газа имени И. М. Губкина», ООО «СИБКОР», АО «СибНИИНП», НПЦ «Тверьгеофизика», ЦИК ООО «ТННЦ», ООО «ТюменНИИгипрогаз» и других. Наиболее известные результаты исследований слабосцементированных пород сеноманского возраста содержатся в работах В. Х. Ахиярова, Н. Н. Богданович, А. М. Будимирова, В. В. Бухтиярова, М. Ю. Зубкова, А. М. Верховского, К. В. Коваленко, В. Г. Мамяшева, Я. Р. Морозовича, В. В. Паникаровского, В. И. Петерсилье, Н. А. Пих, Е. А. Полякова, Е. А. Романова, С. Ю. Рудаковской, Г. В. Таужнянского, В. Г. Топоркова, В. В. Федорцова и др.

Существенное развитие работы по изучению сеноманского комплекса получили благодаря целевой программе строительства в Западной Сибири скважин специального назначения с применением нефильтрующихся растворов на углеводородной основе (РУО, РНО). Вынос керна в таких скважинах достигал 85-90 %, повысилась его сохранность. В результате было установлено, что первоначальные оценки фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) пород-коллекторов сеноманских залежей (пластов $ПК_{1-3}$), представленные в ГКЗ, были занижены. В частности, занижение средних значений коэффициента пористости составило от 3,5 до 5 % (абсолютных).

Следующий этап развития исследований слабосцементированных пород сеноманского комплекса был обусловлен, с одной стороны, разработкой и внедрением новых изолирующих технологий отбора керна, а с другой – применением технологий низкотемпературной заморозки при изготовлении образцов для исследований. Соответственно, это позволило довести средний вынос керна из слабосцементированных пород до 95-98 % и значительно повысить его петрофизическую изученность.

Несмотря на существенный прогресс, достигнутый отечественными и зарубежными специалистами (Core Laboratories Company, Exxon, California

Research Corporation, Американский институт инженеров горной промышленности, Schlumberger и другими) в развитии технологий отбора и исследования керна слабосцементированных пород, сохраняются различия в особенностях реализации этих возможностей, в оценке достоверности получаемых данных, в том числе в применимости исторических данных, полученных в разное время.

Цель

Целью исследования диссертационной работы является повышение достоверности петрофизического обеспечения геологической интерпретации результатов геофизических исследований слабосцементированных пород сеноманского комплекса Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции.

Задачи

1. Изучение особенностей литолого-петрофизической характеристики и геологических условий формирования пород сеноманского комплекса месторождений Большехетской зоны и причин их слабой цементации.
2. Критический анализ и усовершенствование современных технологий препарирования, изготовления и петрофизических исследований образцов слабосцементированного керна.
3. Оценка влияния низкотемпературной заморозки, экстракции и высушивания на состояние (механическую сохранность, размеры) и фильтрационно-емкостные свойства образцов с целью усовершенствования технологии петрофизических исследований.
4. Анализ факторов, снижающих достоверность петрофизического обоснования определений ФЕС, плотности, удельного электрического сопротивления образцов слабосцементированных пород по данным геофизических исследований скважин (ГИС); обоснование критериев оценки качества результатов петрофизических исследований.

Объект и предмет исследования

Объектом диссертационного исследования являются слабосцементированные породы сеноманского возраста месторождений Большехетской зоны. Предметом исследования – технологии отбора и препарирования керна, подготовки образцов к исследованиям; факторы, влияющие на качество результатов петрофизических исследований и достоверность обоснования подсчетных параметров по данным ГИС.

Научная новизна

1. Впервые, для песчано-глинистых пород неокомского возраста Большехетской зоны месторождений обоснованы константы соответствующих уравнений зависимостей пористости «чистых» песчаников и глин от глубины их залегания. Установлено, что характер этих зависимостей соответствует закону нормального уплотнения рассматриваемого типа пород. В соответствие с ним основным фактором, определяющим слабую сцементированность коллекторов сеноманского возраста, является приуроченность их к начальной стадии диагенеза, характеризуемой низкими значениями эффективного давления, температуры и невысокой глинистостью коллекторов, а также практическое отсутствие в них карбонатного цемента.

2. Впервые экспериментально установлено, что в результате операций экстракции и высушивания образцов пород сеноманского возраста происходят деформации «усыхания», приводящие к уменьшению объемов образцов в среднем на 2,5 % относительно исходного объема керна, извлеченного из скважины. Вследствие этого происходит занижение пористости на 1,5-2,0 %, в зависимости от глинистости пород, при определении ее методом гидростатического взвешивания при насыщении керосином и газоволюметрическим методом.

Также впервые установлено, что при однократной низкотемпературной заморозке керна слабосцементированных пород с помощью жидкого азота объем керна практически не изменяется, его деформации не превышают +0,2 %. Фильтрационно-емкостные свойства пород при этом сохраняются практически неизменными.

3. Обоснована необходимость учета вида и особенностей деформации образцов, по измерениям их размеров при каждой технологической операции лабораторных работ. Это условие в совокупности с разработанными методиками введения поправок в емкостные свойства и плотность образцов позволяет привести результаты измерений пористости, водонасыщенности и плотности к исходному, не нарушенному техногенным воздействием, состоянию образцов, а также осуществить отбраковку недостоверных данных, обусловленных влиянием необратимых деформаций керна. Оно легло в основу предложенной усовершенствованной технологии петрофизических исследований слабосцементированного керна.

Теоретическая и практическая значимость работы

Пористость и плотность пород пластов $ПК_{1-3}$ покурской свиты Западной Сибири в первом приближении соответствует условиям нормального уплотнения песчано-глинистых пород. Для рассматриваемой части разреза установлены зависимости и соответствующие константы уравнений нормального уплотнения глин и песчаников с глубиной, а также – граничных значений пористости песчаников.

Установлено, что при однократной низкотемпературной «ударной» заморозке песчано-глинистых водонасыщенных пород жидким азотом объемные деформации их ничтожны, фильтрационно-емкостные свойства и плотность пород остаются практически неизменными. Экспериментально обоснована возможность применения технологий низкотемпературной заморозки керна слабосцементированных пород при изготовлении образцов для петрофизических исследований.

Вместе с тем, установлено, что при операциях экстракции-высушивания рассматриваемых пород наблюдается значительное уменьшение их объемов. Это приводит к занижению пористости исследуемых образцов при определении ее как по данным газоволюметрического метода, так и насыщением керосином. При последующих насыщениях образцов пластовой водой происходит обратное явление: увеличение их объемов и соответствующее завышение пористости на 0,5-3 %, в зависимости от глинистости коллекторов. Эти явления обусловлены, соответственно, дегидратацией – «усыханием» и гидратацией – «набуханием» глинистого цемента пород, тем более заметными, чем больше глинистость и содержание в ней набухающих глинистых минералов (монтмориллонита и смешанно-слойных образований). Установленные особенности определения $К_п$ пород-коллекторов являются основанием для анализа достоверности подсчетов запасов сеноманского нефтегазоносного комплекса Западной Сибири.

Обоснованы способы приведения разнородных по исполнению «исторических» результатов петрофизических исследований к единым сопоставимым условиям (с учетом отбраковки данных). Предложены способы приведения результатов лабораторных определений емкостных свойств и плотности образцов к их исходному состоянию, не искаженному операциями экстракции-высушивания или насыщения образцов пластовой водой.

С учетом выявленных и перечисленных выше особенностей влияния различных факторов на состояние и свойства (определение плотности,

проницаемости, водонасыщенности и удельного электрического сопротивления) слабосцементированных пород предложена новая, усовершенствованная технология петрофизических исследований.

Получаемые таким образом уточненные петрофизические и флюидальные модели обеспечивают возможность повышения достоверности определений как исходных петрофизических данных, так и подсчетных параметров, определяемых по данным ГИС. Результаты, полученные в ходе выполнения данной диссертационной работы, были использованы при актуализации геолого-гидродинамических моделей в ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» и подсчете запасов Находкинского, Пякяхинского и других месторождений Севера Западной Сибири.

Выводы и предложения, представленные в данной диссертации, рекомендуются к использованию недропользователями, осуществляющими свою деятельность как в пределах месторождений Большехетской зоны, так и на аналогичных объектах Севера Западной Сибири. Кроме того, они могут рассматриваться в качестве основы для разработки единой стандартизированной технологии лабораторных петрофизических исследований керна, представленного слабосцементированными породами.

Методология и методы исследования

Решение поставленных задач осуществлялось посредством проведения экспериментальных исследований керна; анализа методик и результатов литолого-петрофизических исследований кернового материала; интерпретации материалов данных ГИС; комплексного анализа перечисленных данных с построением и обоснованием петрофизических зависимостей типа «керн–керн» и «керн–ГИС».

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные зависимости и характер нормального уплотнения терригенных осадочных пород сеноманского возраста рассматриваемого объекта (месторождений Большехетской зоны Западной Сибири) позволяют повысить достоверность оценок пористости, плотности и других петрофизических характеристик опорных пластов «чистых» песчаников и глин. Они обеспечивают возможность отбраковки аномальных результатов лабораторных определений, а также возможность построения моделей разрезов в виде зависимости геофизических и петрофизических параметров опорных пластов от глубины их залегания.

2. Выявленное систематическое уменьшение объемов образцов рассматриваемых пород, происходящее при типовых операциях экстрагирования и высушивания образцов, приводит к значимому занижению пористости газоволюметрическим метод или при насыщении керосином в среднем на 1,5-2 %. Предложенная в диссертации операция контроля линейных размеров (объемов) образцов позволяет привести результаты определений пористости к исходному состоянию породы. Экспериментальное обоснование отсутствия изменения линейных размеров керна полностью и частично водонасыщенных слабосцементированных пород при низкотемпературной заморозке имеет принципиальное значение для практического применения этой технологии при отборе керна и его препарировании.

3. Предлагаемая в диссертации усовершенствованная технология петрофизических исследований слабосцементированного керна основана на обеспечении сохранности и механической целостности образцов путем исключения и замены или модификации операций, способных вызвать необратимые деформации образцов. В совокупности с разработанными методиками введения поправок за обратимые деформации она позволяет привести результаты измерений емкостных свойств и плотности к исходному, не нарушенному техногенным воздействием, состоянию образцов, а также осуществить отбраковку недостоверных данных. Это обеспечивает повышение качества петрофизического обоснования геологической интерпретации данных ГИС и улучшает сходимость результатов интерпретации с фактическими данными работы скважин.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность полученных результатов подтверждается данными лабораторных исследований керна пяти месторождений, материалами опробований и испытаний пластов, гидродинамическими исследованиями скважин. Предложенные методики введения поправок в результаты определений ФЕС и удельных электрических сопротивлений (УЭС), а также методики отбраковки некондиционных данных реализованы при актуализации геолого-гидродинамических моделей двух месторождений Большехетской зоны в рамках работ ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг». Методические разработки данной диссертации, использованные при обосновании подсчетных параметров Пякяхинского месторождения, одобрены экспертно-техническим советом

Федерального бюджетного учреждения «Государственная комиссия по запасам полезных ископаемых».

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: технической конференции SPE «Петрофизика XXI» (г. Тюмень, 2012 г.); совместном научно-практическом семинаре EAGE&SPE «Геолого-геофизический мониторинг процесса разработки» (г. Москва, 2013 г.); 6-ой международной конференции и выставке EAGE Геомодель «Геонауки – инвестиции в будущее» (г. Санкт-Петербург, 2014 г.); международной научно-практической конференции ЕАГО Тюмень «Современные технологии нефтегазовой геофизики» ТИУ (г. Тюмень, 2018 г.); III Ежегодной конференции по газовым проектам, Роснефть (г. Тюмень, 2020 г.); международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Новые технологии – нефтегазовому региону» ТИУ (г. Тюмень, 2020 г.); международном форуме «Современные методы исследования скважин и пластов для повышения эффективности разработки нефтегазовых месторождений» НОЧУ «МНГБ» (г. Москва, 2022 г.).

Личный вклад

Основу диссертации составили исследования, выполненные автором за время работы в ООО «Газпромнефть НТЦ», ООО «Корэтест сервис» и-филиале ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть» в г. Тюмени в период с 2010 по 2021 гг. Все основные положения диссертации разработаны с личным участием автора, в том числе: 1) выполнены экспериментальные исследования линейных и объемных деформаций, фильтрационно-емкостных свойств при низкотемпературной заморозке керна и после его оттаивания на коллекциях слабосцементированных пород пластов $ПК_{1-3}$, (40 образцов) и сцементированных пород пластов $МХ_{4-9}$ малохетской свиты (40 образцов); 2) выполнена оценка линейных и объемных деформаций керна и соответствующих изменений пористости и плотности его при операциях экстракции–высушивания, а также насыщения водными растворами; 3) выполнена оценка качества и анализ результатов исследований керна (1376 образцов) по данным разных лабораторий; 4) исследовано влияние технологических особенностей измерения удельного электрического сопротивления образцов слабосцементированных пород (термоусадочная пленка, материал и конструкция электродов, их крепление, условия прижима к образцам, методы моделирования частичной водонасыщенности и др.) в атмосферных и

термобарических условиях; 5) выполнена обработка данных ГИС по 34 разведочным скважинам в нефтенасыщенной части разреза.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 157 страницах машинописного текста, иллюстрирован 11 таблицами и 80 рисунками; список литературы включает 218 наименований.

Благодарности

Автор выражает огромную благодарность Мамяшеву Венеру Галиуллиновичу за руководство диссертационными исследованиями.

В период работы над диссертацией автором получены полезные советы и замечания от Н. В. Гильмановой, В. С. Дручина, Т. Ф. Дьяконовой, М. Д. Заватского, Г. А. Калмыкова, В. Е. Касаткина, А. Н. Никитина, И. В. Новосадовой, Е. А. Романова, Е. А. Савинова, Д. В. Сулимова, Р. С. Шульги и др. Всем перечисленным коллегам автор выражает признательность и благодарит за оказанное содействие.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цели и задачи исследования, обозначены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов работы.

В **первой главе** представлены общие сведения о районе работ, детально рассмотрена физико-литологическая характеристика пород, слагающих пласт $ПК_{1-3}$ покурской свиты Большехетской зоны месторождений. По итогам анализа фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) коэффициент пористости пород-коллекторов изменяется в диапазоне 19,0÷40,2 %; коэффициент проницаемости – 0,3÷4694,5*10^{-3}мкм^2. Рассматриваемые породы-коллекторы характеризуются межзерновым типом порового пространства, изменение ФЕС контролируется содержанием глинисто-алевритовой компоненты, содержание глинистой компоненты при этом относительно невелико.

Различные законы уплотнения пород с глубиной характеризуются одной общей чертой: до глубин 1500 м уплотнение коллекторов происходит за счет механической перегруппировки зерен породы. Обобщенные сопоставления фильтрационно-емкостных свойств осадочных пород с глубиной их залегания по керну поисково-разведочных скважин объекта исследований представлены на рисунке 1а (линии 1-4 нанесены по данным Н. А. Ирбэ). Такое же сопоставление

по данным ГИС объекта исследований ($К_{пГГКП}$) приведено на рисунке 1б. Влияние характера насыщенности (газ, нефть или вода) на характер уплотнения пород и ФЕС не выявлено.

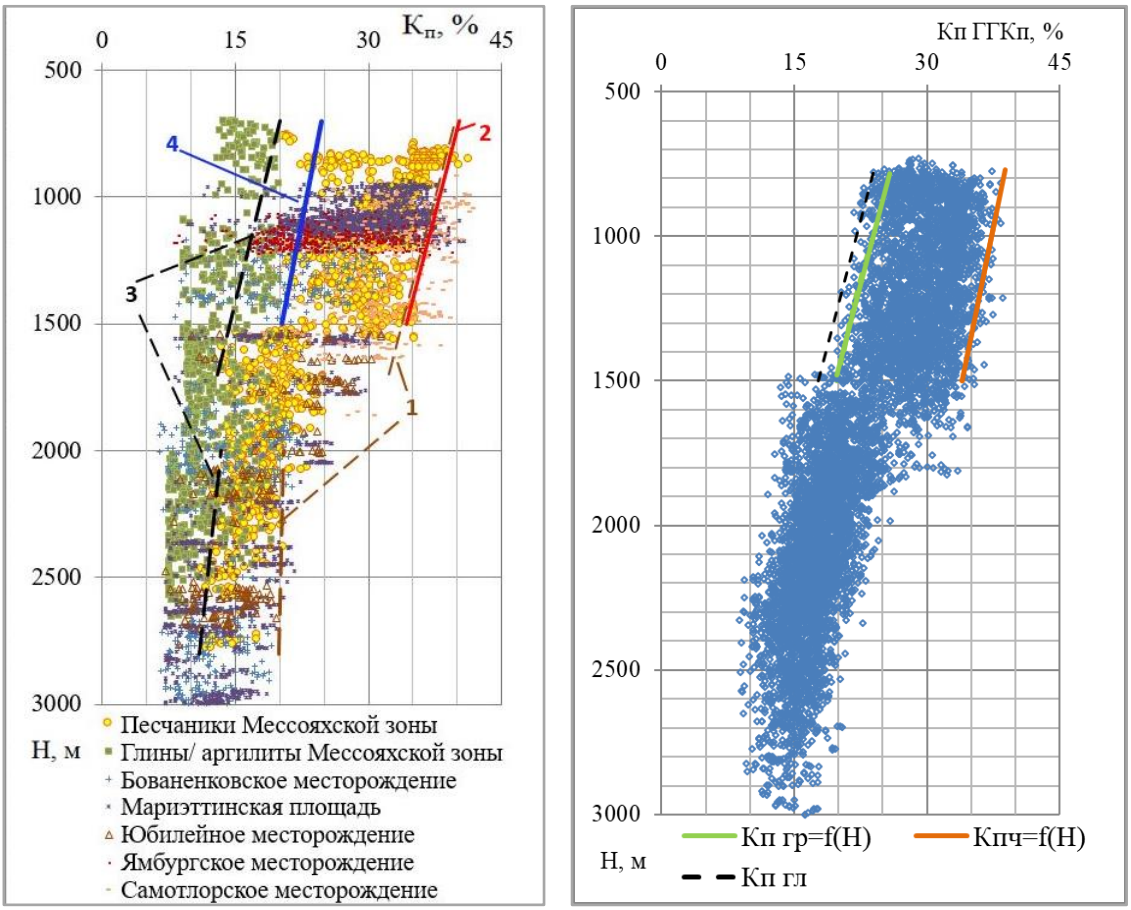
По этим данным для изучаемого региона впервые были получены уравнения аппроксимации кривых нормального уплотнения песчаников ($К_{пч}$), глин ($К_{п\ гл}$) и граничных значений песчаников ($К_{п\ гр}$) для изучаемого района:

$$К_{пч} = -0.2125 * H^2 - 6.1533 * H + 43.6, \quad (1)$$

$$К_{п\ гр} = 23.8 - 10 * \ln(H), \quad (2)$$

$$К_{п\ гл} = 21.5 - 10 * \ln(H), \quad (3)$$

где H – глубина залегания, км.



а) б)

Рисунок 1 – Сопоставления коэффициента открытой пористости пород с глубиной залегания: а) по данным Н. А. Ирбэ 1 – $К_{п\ макс}$ Тазовский, 2 – $К_{п\ макс}$ Уренгой, 3 – $К_{п\ гр}$ Тазовский, 4 – $К_{п\ гр}$ Уренгой; б) по данным ГИС поисково-разведочных скважин месторождений Большехетской зоны с нанесенными кривыми $К_{п\ ч}$, $К_{п\ гр}$ и $К_{п\ гл}$

Следовательно, основными факторами, определяющими фильтрационно-емкостные свойства пород пластов $ПК_{1-3}$, остаются уплотнение их под действием эффективного давления и литологическая принадлежность пород, определяемая

гранулометрическим составом, степенью сортировки и глинистостью пород.

Таким образом, анализ приведенных результатов исследований обосновывает первое защищаемое положение.

Во **второй главе** проведен критический анализ современных технологий отбора керна и технологий изготовления цилиндрических образцов слабосцементированных горных пород как в историческом аспекте, так и используемых в настоящее время.

Ключевые факторы современных технологий отбора слабосцементированного керна определяются применяемой технологией работ (керноотборным оборудованием; диаметром керна, длиной рейсов и др.) и соблюдением технических регламентов на отбор керна.

Наилучшие результаты достигаются при использовании изолирующих технологий отбора керна, а также при отборе керна с применением РУО (РНО) с учетом известных ограничений этих технологий.

Отсутствие единых методических требований к порядку работ со слабосцементированным керном (ГОСТ, руководящие документы) приводит к многообразию применяемых способов изготовления образцов (вдавливание, выбуривание «на сухую», заморозка с охлаждением керна жидким азотом и др.), к использованию разнообразных материалов (оболочек, термоусадочных пленок, фольги, торцевых сеток и др.) для сохранения структуры и обеспечения необходимой прочности образцов.

Для определения наиболее эффективной технологии изготовления образцов, наряду с анализом имеющейся информации по пяти лабораториям, автором была поставлена и выполнена серия собственных экспериментов по оценке влияния на ФЕС, как технологий изготовления образцов, так и используемых материалов. Подбор материалов для изготовления образцов и проведения лабораторных исследований также сыграл существенную роль.

Влияние процедуры заморозки-оттаивания проявляется в разной степени в зависимости от литологии (прочности) образцов и их насыщенности. Линейные деформации слабосцементированного керна пласта $ПК_{1-3}$ и фильтрационно-емкостные свойства при применении только низкотемпературной, «ударной» заморозки практически не существенны (менее + 0,2 %) при сравнении с исходными размерами образцов. Объемные деформации керна в этом случае намного меньше, чем изменения в результате влияния таких технологических операций, как экстракция, высушивание, насыщение водой, центрифугирование,

давление обжима и др. Экспериментально установлено уменьшение объемов образцов в результате «усыхания» в среднем на 2,5 % относительно исходного объема, что снижает достоверность результатов лабораторных исследований и приводит к систематическому занижению ФЕС. Аналогичные собственные исследования, выполненные на образцах сцементированных пород малохетской свиты (МХ4-9) не выявили значимых линейных деформаций.

Выработаны критерии оценки качества результатов петрофизических исследований, основанные на контроле линейных размеров образцов на каждом этапе работ. Предлагаемые изменения традиционной технологии подготовки образцов слабосцементированного керна для проведения типовых петрофизических исследований отражены на рисунке 2 и касаются только тех операций, которые негативно влияют на свойства пород.

Рисунок 2 – Усовершенствованная технология подготовки образцов слабосцементированного керна для исследований

Таким образом, на основе собственных экспериментов автора на образцах слабосцементированного керна сеноманских отложений и сцементированных образцов малохетской свиты сформулировано второе защищаемое положение.

В **третьей главе** выполнено обобщение и приведен анализ результатов определений ФЕС и плотности слабосцементированных пород, накопленных по

итогам работ разных лабораторий и сравнение особенностей применяемых методик. Реализация предложений по усовершенствованию технологий изготовления образцов обеспечивает повышение достоверности определения как исходных петрофизических данных, так и достоверности определения подсчетных параметров по данным ГИС.

Определения коэффициента пористости ($К_п$) характеризуются разнообразием применяемых способов измерений: жидкостенасыщением пластовой водой и/или керосином и газоволюметрическим способом, с использование гелия, азота или воздуха, с применением обжима или без него. Установлены значительные расхождения результатов определений $К_п$, полученных разными методами и лабораториями. Необходимость практического использования этих данных потребовала обоснования поправок, позволяющих обеспечить объективность результатов определений, выполненных разными лабораториями и с применением разных методик. Поскольку оказалось, что определения пористости газоволюметрическим способом выполняются при разных значениях давления обжима ($Р_{обж}$), то возникла необходимость приведения их к единым атмосферным условиям измерений. На основании экспериментальных исследований автором предложена соответствующая методика приведения результатов разнородных определений пористости газоволюметрическим методом к «атмосферной» пористости.

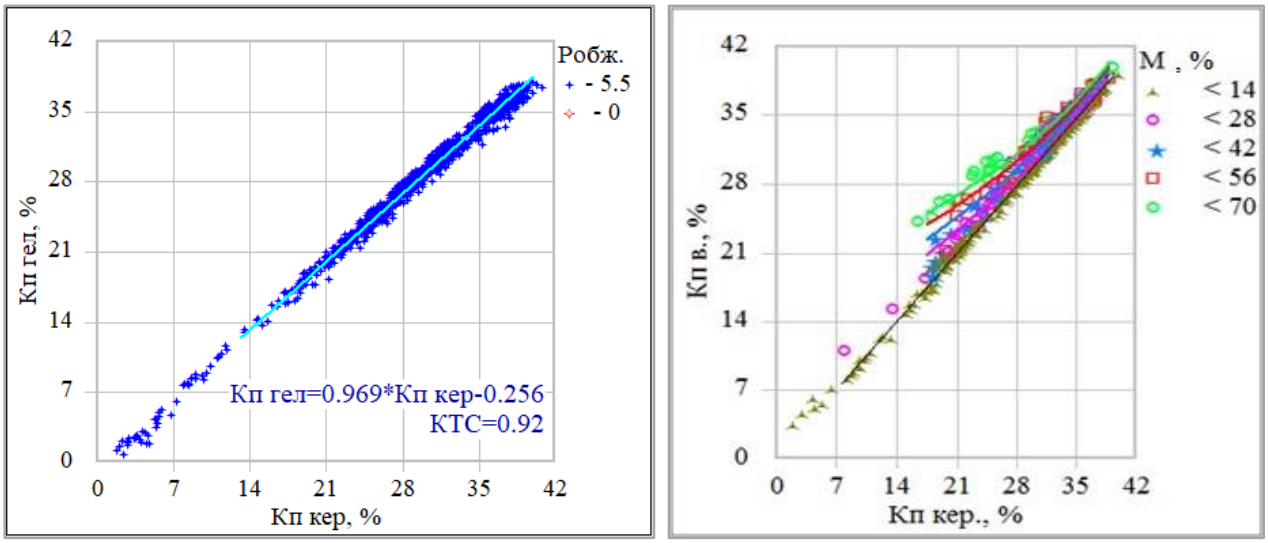
Для введения поправок в определения пористости, выполненных «по гелию» аппаратурой АР-608 и ПИК-ПП при $Р_{обж}$=5,5 МПа к результатам определений её «по керосину» предлагается эмпирическая зависимость вида (рисунок 3а):

$$К_{п\ гел.} = 0{,}969 * К_{п\ кер.} - 0{,}256\ ,\ R^2=0.92 \qquad (4)$$

При насыщении образцов керна пластовой водой наблюдается завышение значений пористости «по воде» ($К_{п\ в}$); в породах с $К_п$, близкой к граничной, оно достигает 5–7 % (абсолютных) за счет присутствия в составе цемента набухающих глинистых минералов (монтмориллонита) (рисунок 3б).

Возможно приведение $К_{п\ в.}$ к пористости «по керосину» ($К_{п\ кер.}$) или обратно при известном долевом содержании монтмориллонита (М) в объеме глинистого цемента пород. При отсутствии данных по минеральному составу глинистой компоненты предлагается следующее уравнение:

$$К_{п\ кер.} = (К_{п\ в.} - 9{,}756)\ /\ 0{,}756 \qquad (5)$$



а) б)

Рисунок 3 – Сопоставления результатов определений пористости: а) «по гелию» при давлении обжима равном ($P_{обж.}$)=5,5 МПа с пористостью «по керосину»; б) пористости «по керосину» и «по воде» с делением по содержанию монтмориллонита

Определения коэффициента проницаемости ($К_{пр}$) выполнены методами стационарной и нестационарной фильтрации. В результате анализа этих данных было выявлено завышение значений проницаемости, определенных с помощью метода нестационарной фильтрации, вследствие того, что при существующих перепадах давлений возможно изменение структуры порового пространства. Кроме того, было установлено смещение сопоставлений $К_{пр}$=f($К_п$) при неоднократном использовании цикла заморозки-оттаивания. На основании проведенного анализа рекомендуется применение режима стационарной фильтрации. Для расчетов $К_{пр}$ по данным ГИС и настройки петрофизических связей необходимо использовать коэффициент пористости с введенными поправками за насыщающий флюид и давление обжима.

Определение остаточной водонасыщенности ($К_{во}$) выполняется с помощью методов капилляриметрии (полупроницаемой мембраны) и центрифугирования. Установлено, что при использовании метода центрифугирования, несмотря на наличие термоусадочной пленки, высока вероятность деформации формы и размеров образцов под действием центробежных сил. Соответственно, это приводит к искажению результатов определений $К_{во}$. На этом основании для определения $К_{во}$ рекомендуется применение метода капилляриметрии (с контролем размеров образцов) с давлениями вытеснения до 0,41-0,61 МПа.

Предлагаемые элементы усовершенствованной технологии типовых

петрофизических исследований слабосцементированного керна, отобранного по стандартной и по изолированной технологии, приведены на рисунке 4.

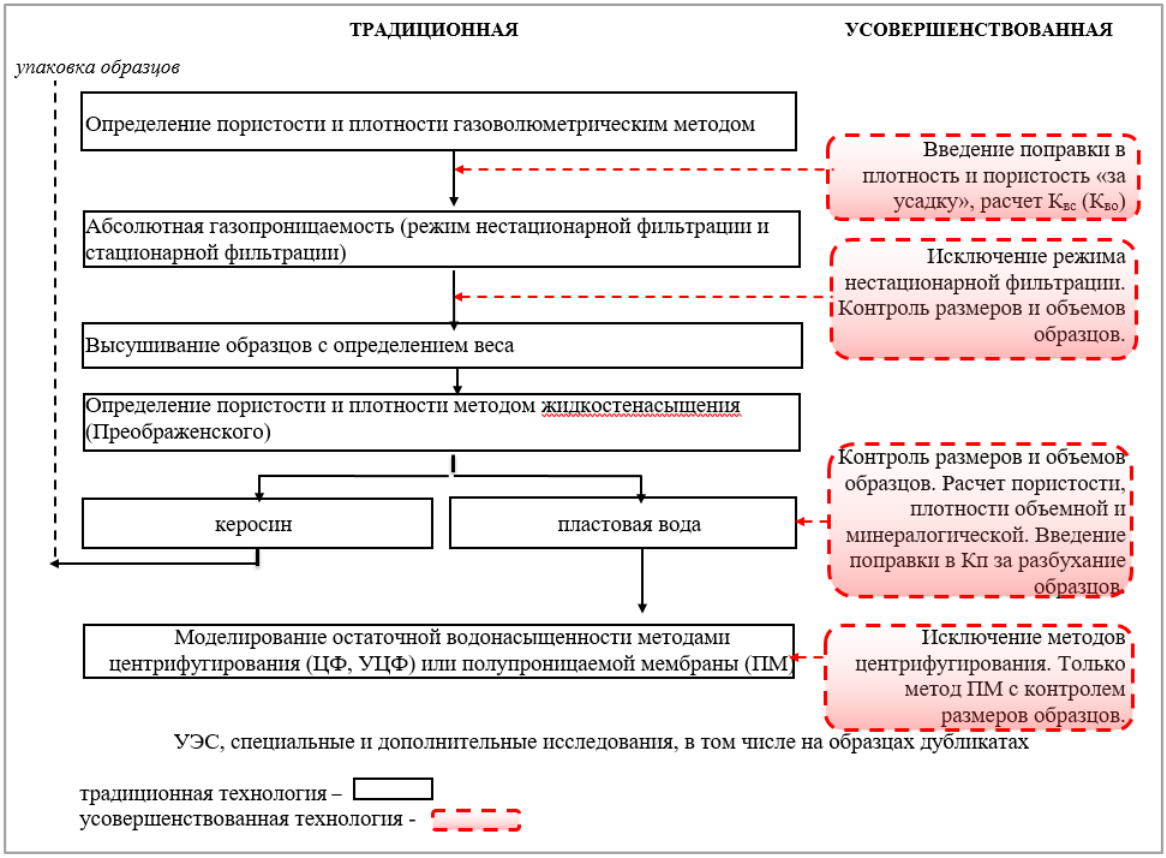


Рисунок 4 – Усовершенствованная технология петрофизических исследований ФЕС слабосцементированного керна

Таким образом, на основе исследований, изложенных в главе 3, обоснованы критерии оценки качества результатов выполненных исторических исследований, способы приведения их к единым условиям измерений. Кроме того, обоснованы предложения по усовершенствованию технологии петрофизических исследований керна слабосцементированных пород, содержащиеся в третьем защищаемом положении.

В четвертой главе рассмотрены петрофизические алгоритмы определений коэффициентов водонасыщенности (нефтегазонасыщенности) пластов $ПК_{1-3}$ по данным ГИС, в частности, по результатам определений УЭС, с помощью традиционной методики с использованием петрофизических зависимостей вида $Р_п=f(К_п)$ и $Р_н=f(К_в)$, а также с помощью методики определения объемной водонасыщенности по зависимостям вида «ГИС-керн». Приведенное в этой главе сопоставление зависимостей вида $Р_п=f(К_п)$ для объектов сеноманского возраста, выполненное в разное время, разными исполнителями и представленное при подсчетах запасов нефти и газа в ГКЗ РФ (СССР), показало

их серьезный разброс. Так, известные эмпирические коэффициенты зависимостей варьируются: для коэффициента «а» от 0,7 до 2,7, для «m» – от 0,83 до 2,23, т. е. вплоть до того, что коэффициент «m» оказывается меньше теоретически допустимой величины, равной 1. В результате анализа имеющихся данных, а также авторских экспериментальных исследований установлено, что наиболее существенными источниками искажений полученных зависимостей являются особенности условий измерений: конструкция измерительных электродов, влияние их контактного сопротивления и давление прижима электродов к образцу. Установлено, что применение электродов из тонкой металлической (латунной) сетки, закрепляемой на боковой поверхности образцов с помощью термоусадочной пленки, приводит к шунтированию тока через образец и, соответственно, к занижению его УЭС. Вместе с тем, неплотное прилегание этой сетки к торцам образца способствует неконтролируемому завышению контактного сопротивления и в итоге – к завышению УЭС образца.

Обосновано, что моделирование пластовых термобарических условий (эффективного давления и температуры) при положении электродов из латунной сетки в пределах торцов образцов позволяет получить наиболее стабильные и достоверные результаты измерений и, соответственно, более достоверные зависимости вида $P_п=f(K_п)$. Анализ полученных зависимостей свидетельствует о том, что с уменьшением пористости пород наблюдается «выполаживание» - плавное уменьшение величины коэффициента «m» в области перехода от пород коллекторов к неколлекторам, обоснованное ранее в работе В. Г. Мамяшева (2014 г.).

Аналогичное сопоставление зависимостей вида $P_н=f(K_в)$ показало их лучшую воспроизводимость. Так, значение коэффициента «а» этих зависимостей варьирует в узком диапазоне 0,9-1,0, а показателя «n» – от 1,55 до 1,9. При этом, для ряда зависимостей наблюдается отклонение зависимости от линейной (в билогарифмических координатах). Происходит завышение значений $P_н$ при уменьшении водонасыщенности образцов, характерное для гидрофобных пород. Экспериментально установлено, что причиной этого является резкое завышение контактного сопротивления между электродом из латунной сетки и поровой водой по мере уменьшения водонасыщенности образцов.

В качестве критерия достоверности моделируемых зависимостей вида $P_н=f(K_в)$ предлагается рассматривать зависимости вида «ГИС-керн», получаемые сопоставлением УЭС пород по данным ГИС ($\rho_п$) с объемной

водонасыщенностью ($W_в$) по данным керна на РНО или по данным изолированного керна. Эти сопоставления могут быть представлены зависимостями вида $P_0=f(W_в)$, где P_0 – это величина относительного сопротивления. Полученные наиболее вероятные значения показателя «n» этих зависимостей составляют около n=1,79±0,03. Причиной занижения показателя «n» до наблюдаемых n=1,55 является шунтирующее влияние электродов из металлической сетки, закрепленной на боковой поверхности образцов, а также линейные деформации керна при вытеснении воды методом центрифугирования. Дополнительно обосновано ограничение усилий прижима электродов к торцам образов в пределах 1,0 кГс/см^2.

Сопоставление результатов моделирования зависимости $P_0=f(W_в)$ в условиях, соответствующих термобарическим, приведено на рисунке 5. На нем же приведены данные по образцам, отобранным с помощью изолированной технологии, а также данные ГИС по водонасыщенным пластам ($P_0=\rho_{вп.гис}/\rho_в$ и $К_{п.гис.}$). Данные по водонасыщенным пластам подтверждают различие минерализации поровых вод в продуктивной и водоносной частях залежи, установленное В. Х. Ахияровым, Ф. С. Акбашевым, Г. В. Таужнянским.

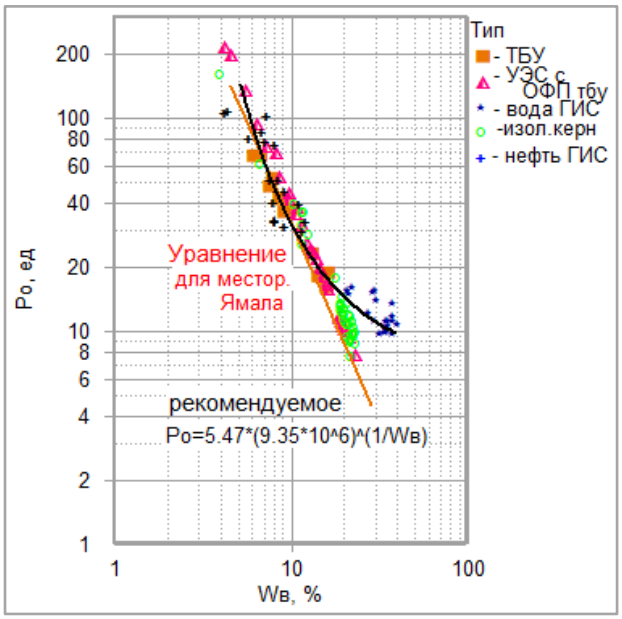


Рисунок 5 – Зависимость $P_0=f(W_в)$ в термобарических условиях для сеноманских отложений с учетом данных ГИС и обобщенной зависимости для месторождений Ямала

Обоснованность приведенной зависимости $P_0=f(W_в)$ подтверждается совпадением результатов определений $К_в$ с помощью этой зависимости с определениями $К_{во}$ по керну с сохраненной насыщенностью, в отличие от результатов определений $К_в$, выполненных с помощью зависимостей вида

$P_п=f(K_п)$ и $P_н=f(K_в)$, которые приводят к систематическому занижению $K_{нг}$ по типовой методике на 5,0 ÷8,0 % во всем диапазоне ФЕС коллекторов и УЭС пластов от 10 до 24 Омм.

Таким образом, анализ результатов петрофизических исследований керна слабосцементированных пород и технологий исследований выявил существенные искажения качества определений УЭС в рамках применяемых технологий лабораторных исследований. Выявлена и обоснована необходимость исключения влияния таких искажающих факторов, как нарушения формы и размеров образцов в процессе их подготовки и проведения измерений УЭС, влияние конструкции электродов и контактного сопротивления, методов моделирования частичной водонасыщенности пород.

По результатам выполненной работы для оценки насыщенности слабосцементированных пород коллекторов сеномана рекомендуется применение методики, основанной на сопоставлении объемной водонасыщенности по изолированному керну с УЭС по данным ГИС. Обоснованы предложения по усовершенствованию технологии определения удельных электрических сопротивлений и оценки насыщенности, являющиеся составной частью третьего защищаемого положения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации последовательно рассмотрены:

1. Литолого-петрофизические особенности объекта исследований – пород сеноманского комплекса месторождений Большехетской зоны, конкретизированы причины их слабой цементации и обусловленные этим сложности изучения петрофизических характеристик.

2. Обоснованные константы уравнений и характер нормального уплотнения чистых песчаников и глин от глубины их залегания позволяют осуществлять отбраковку аномальных результатов лабораторных определений и обосновывать модели разрезов в виде петрофизических параметров опорных пластов. Зависимость для средних значений граничной пористости песчаников позволяет получить оперативные оценки этого параметра на этапе геологоразведочных работ.

3. Проанализированы применяемые технологии петрофизических исследований керна слабосцементированных пород, начиная с его отбора и заканчивая лабораторными исследованиями. На основе выполненных автором

экспериментов обоснована усовершенствованная технология исследований, опирающаяся на контроль размеров образцов в процессе выполнения работ.

4. Обоснована методика приведения пористости и плотности к исходному состоянию образцов. Рассмотрены возможности повышения информативности результатов исторически накопленных данных путем их приведения к единым условиям измерений.

5. С учетом выявленных особенностей влияния различных факторов на определения пористости, плотности, проницаемости, водонасыщенности и удельного электрического сопротивления слабосцементированных пород предложено дополнить традиционную технологию исследований новыми элементами (усовершенствованная технология).

С учетом указанных факторов это позволит повысить достоверность петрофизического обоснования геологической интерпретации данных ГИС, в том числе и при определении подсчетных параметров. В целом разведанные и оцененные запасы нефти и газа в сеноманских залежах Западной Сибири могут быть занижены в среднем на 1,5 – 2 % (абсолютных), что является основанием для их переоценки.

Одной из значимых составляющих дальнейшего совершенствования технологии петрофизических исследований слабосцементированного керна является применение метода компьютерной томографии с целью контроля качества отобранного керна и выбора мест отбора представительных образцов для петрофизических исследований. Также актуальна разработка технологий петрофизических исследований полноразмерных колонок керна, отбираемых с применением изолирующих технологий.

Основной рекомендацией, вытекающей из данной работы, является необходимость системного подхода к работе с керном слабосцементированных горных пород и создания, с этой целью, документа, регламентирующего все этапы работы с керном.

Список опубликованных работ в научных журналах (изданиях), входящих в перечень ВАК:

1. Москаленко Н. Ю. Результаты определения коэффициента проницаемости по рыхлым образцам различного размера / Н. Ю. Москаленко, Н. В. Гильманова, Е. А. Пономарева // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2015. –№ 250. – С. 16–21.

2. Москаленко Н. Ю. Влияние содержания монтмориллонита в составе глинистого цемента сеноманских отложений на прогноз обводненности

продукции / Н. Ю. Москаленко, П. А. Боронин // Научно-технический вестник «Каротажник». – 2018. –№ 288. – С. 16–27.

3. Москаленко Н. Ю. Моделирование параметров удельного электрического сопротивления слабосцементированных пород газовых залежей сеноманского возраста / Н. Ю. Москаленко, В. Г. Мамяшев // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2018. –№ 5. – С. 63–69.

4. Модификация относительных фазовых проницаемостей для слабосцементированных пород покурской свиты с целью выработки оптимального подхода в гидродинамическом моделировании / Н.Ю. Москаленко, Н.В. Гильманова // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2019. –№ 9. – С. 19–23.

5. Москаленко Н. Ю. Актуализация геологической модели для целей создания интегрированной модели пласта $ПК_1$ Большехетской зоны / А. Г. Рясный, Н. Ю. Москаленко, Н. А. Каримова, С. Л. Кузнецов, Н. М. Шарин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 6. – С. 29–33.

6. Москаленко Н. Ю. Факторы, определяющие слабую сцементированность пород сеноманского возраста Большехетской зоны месторождений / Н. Ю. Москаленко // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 2021. –№ 6. – С. 57–68.

7. Москаленко Н. Ю. Определение емкостных характеристик пород-коллекторов сеноманских отложений при наличии разбухающих минералов в составе глинистого цемента / Н. Ю. Москаленко, Е. А. Савинов // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2021. – № 12. – С. 128–132.

8. Москаленко Н. Ю. Особенности петрофизических исследований слабосцементированных пород сеноманского комплекса / Н. Ю. Москаленко // [Электронный ресурс] Актуальные проблемы нефти и газа. – 2022. – № 2 (37). – С.153–161. Режим доступа: http://oilgasjournal.ru.

Список опубликованных работ в научных журналах (изданиях), индексируемых в международных системах цитирования (Web of science, Scopus и др.):

9. Москаленко Н. Ю. Анализ результатов лабораторных определений открытой пористости образцов слабоконсолидированного керна пластов $ПК_{1-3}$ Западно-Мессояхского и Восточно-Мессояхского месторождений / Е. А. Савинов, Н. Ю. Москаленко, Н. В. Гильманова, И. В. Новосадова, Р. С. Шульга // Нефтяное хозяйство. – 2011. –№ 12. – С. 22–25.

10. Москаленко Н. Ю. Использование относительных фазовых проницаемостей для определения критических водонасыщенностей и темпа обводнения пласта на примере месторождений ООО «Газпромнефть» / Н. Ю. Москаленко, Н. В. Гильманова, С. В. Самороков, А. Г. Орлов // Нефтяное хозяйство. – 2011. –№ 12. – С. 28–40.

Статьи, опубликованные в других изданиях:

11. Москаленко Н. Ю. Обоснование остаточной нефтенасыщенности по данным лабораторных исследований керна на примере месторождений ООО «Газпромнефть» / Е. П. Слесарева, Н. Ю. Москаленко // Горные ведомости. – 2012. –№ 96. – С. 54–58.

12. Москаленко Н. Ю. Обоснование способов ремасштабирования ОФП с учетом состава цемента пород сеноманских отложений для целей гидродинамического моделирования / Н. Ю. Москаленко, Г. А. Смоляков, А. В. Сивкова // Горные ведомости. – 2018. – № 158. – С. 56–60.

13. Москаленко Н. Ю. Влияние низкотемпературных технологий на свойства образцов, изготовленных из слабосцементированных пород // В. Г. Мамяшев, Н. Ю. Москаленко, Е. А. Романов, Р. С. Шульга // НТЖ ЕАГО Геофизика. – 2019. – № 2. – С. 59–67.

14. Москаленко Н. Ю. Проблемы технологий подготовки и исследований слабосцементированного керна сеноманских отложений / Н. Ю. Москаленко, В. Г. Мамяшев // Современные технологии нефтегазовой геофизики: материалы докладов международной научно-практической конференции. ТИУ. – Тюмень, 2019. – С. 111–122.

15. Москаленко Н. Ю. Повышение достоверности петрофизического обеспечения комплексной интерпретации данных ГИС в отложениях сеноманского возраста Большехетской зоны / Н. Ю. Москаленко // Новые технологии – нефтегазовому региону: материалы Международной научно-практической конференции: в 2-х томах. ТИУ. – Тюмень, 2020. Том 1. – С. 43 – 46.

Бумага офисная. Печать цифровая. Гарнитура Times New Roman.
Формат 60x84/16. Объем 1,16 усл. печ. л.
Тираж 100 экз. Заказ 56.
Отпечатано с готового оригинал-макета, в авторской редакции.

ГАУК ТОНБ 625000, Российская федерация, Тюменская область,
г. Тюмень, ул. Орджоникидзе, 59.
Телефон 8 (3452) 565-300, доп. 1192, 4123