ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Гарифуллиной Чулпан Айдаровны** на тему «Экспериментальное исследование физико-химических процессов при закачке в пласт и утилизации CO_2», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

Диссертация Гарифуллиной Ч.А. посвящена исследованию физико-химических процессов, протекающих при взаимодействии природных и искусственных пористых материалов с диоксидом углерода в водной среде. **Актуальность** выбранного направления определяется развитием технологий закачки CO_2 в геологические пласты для повышения нефтеотдачи, его подземного хранения и химической утилизации. При реализации данных технологий особое значение имеет понимание закономерностей взаимодействия CO_2 с пластовыми флюидами и минеральными компонентами породы, определяющих изменение состава водной фазы и свойств порового пространства. Изучение закономерностей этих процессов необходимо для оценки поведения CO_2 в геологической среде, прогнозирования изменения свойств пород-коллекторов и обоснования условий эффективной и безопасной реализации технологий его закачки. Исследование взаимодействия CO_2 с искусственными материалами представляет дополнительный интерес с точки зрения разработки подходов к его химической утилизации и получения полезных продуктов, а также может способствовать уточнению механизмов взаимодействия CO_2 с металлосодержащими компонентами пласта. В связи с этим экспериментальное изучение указанных процессов применительно к различным типам пористых материалов, проведенное в диссертации Гарифуллиной Ч.А., представляет научный и практический интерес.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 157 наименований, и содержит 191 страницу машинописного текста, 42 рисунка, 75 таблиц.

Во **введении** обоснована актуальность проведенного исследования, сформулированы его цель и задачи, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, охарактеризованы использованные методы исследования и приведены сведения, подтверждающие достоверность полученных результатов. Также сформулированы основные положения, выносимые на защиту, отражен личный вклад автора, приведены сведения об апробации результатов и их соответствии паспорту специальности.

ИПНГ РАН
Вх. № 367
от 31. 08 2026

В **первой главе** рассмотрены современное состояние проблемы выбросов диоксида углерода и основные направления их сокращения, применяемые в мировой и отечественной практике. Проанализированы механизмы повышения нефтеотдачи при закачке CO_2, процессы, определяющие его подземное хранение, а также подходы к химической утилизации углекислого газа. Рассмотрены физико-химические процессы, возникающие при взаимодействии CO_2 с пластовой водой и горными породами, а также при его взаимодействии с металлосодержащими материалами в водной среде. На основе анализа значительного объема отечественных и зарубежных публикаций систематизированы сведения о характерных физико-химических процессах, протекающих в системе «CO_2-горная порода-пластовая вода», и представлены в виде сводных таблиц для терригенных и карбонатных пород. На основании проведенного анализа выявлены недостаточно изученные аспекты взаимодействия CO_2 с породой и пластовой водой, а также перспективность исследования низкотемпературных процессов в системе «CO_2-металлосодержащий материал-вода», что послужило основой для постановки цели и задач диссертационного исследования.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию физико-химических процессов при взаимодействии диоксида углерода с искусственными пористыми средами в водной среде с получением водорода. Автором описана методика проведения экспериментов описанных процессов без дополнительного нагрева и при относительно низких давлениях. Проанализировано влияние различных параметров на степень утилизации углекислого газа и выход водорода. На основе полученных экспериментальных данных и анализа литературных данных о себестоимости отдельных этапов исследуемого процесса оценена себестоимость потенциальной технологии утилизации диоксида углерода. Полученные значения точек безубыточности сравнены с точками безубыточности известных технологий.

В **третьей главе** автором представлена оригинальная методика исследования геохимических процессов взаимодействия CO_2 с пластовой водой и горной породой, включающая комплекс экспериментов для оценки процессов применительно к пластовым условиям с использованием проб пластовой воды, дробленого керна и составных керновых моделей. Описаны результаты большого количества экспериментов по исследованию физико-химических процессов, характерных для водонасыщенных и нефтенасыщенных пластов четырех горизонтов Урало-Поволжья. На основании анализа изменений состава пластовой воды и минерального состава

пород установлены основные процессы, протекающие при их взаимодействии с карбонизированной водой. Для консолидированных образцов проведена оценка изменения проницаемости керновых моделей по результатам измерения индикаторных линий, а также исследованы изменения состава пластовой воды и минерального состава керна. Установлено, что основным риском снижения проницаемости исследованных объектов является растворение, перенос и последующее переосаждение глинистых минералов

В **четвертой главе** проведен анализ геохимических процессов, протекающих при взаимодействии CO_2 с горными породами и пластовой водой. На основе обобщения экспериментальных данных и результатов гидрогеохимического моделирования сформулированы рекомендации по учету процессов растворения, переноса и переосаждения минералов при проектировании и мониторинге систем закачки CO_2 для пород нижнего карбона и девона Урало-Поволжья.

В **заключении** обобщены основные результаты исследования и сформулированы выводы по диссертационной работе.

Научная новизна результатов диссертации

Научная новизна работы прежде всего связана с полученными в ней новыми экспериментальными данными о геохимических процессах, сопровождающих закачку CO_2 для пластов четырех горизонтов Урало-Поволжья. В целом автором разработан комплексный подход к экспериментальной оценке поведения CO_2 во взаимодействии с водой и твердыми поверхностями в различных технологических процессах. Для пластовых систем предложенная методика позволяет исследовать последовательность геохимических преобразований при взаимодействии углекислого газа с пластовой водой и породой. Полученные с использованием данного подхода результаты позволили установить особенности протекания геохимических процессов для ряда перспективных горизонтов Урало-Поволжья и оценить их влияние на фильтрационные характеристики коллектора, что представляет интерес для обоснования технологий CO_2-МУН и геологического хранения. Дополнительным новым результатом является экспериментальное обоснование возможности химического вовлечения CO_2 в водной среде с использованием металлических отходов с получением водорода, для которого выполнена укрупненная оценка его технико-экономической перспективности.

Достоверность результатов

Результаты диссертационной работы получены по итогам проведения комплекса экспериментальных исследований с использованием реального кернового материала и проб пластовой воды исследуемых объектов в условиях,

приближенных к пластовым по температуре и давлению. Достоверность аналитических данных подтверждена применением стандартизированных методик определения химического состава пластовой воды и минерального состава керна, соответствующих требованиям действующих ГОСТ и нормативных документов.

Практическая значимость результатов работы

Полученные результаты востребованы при решении задач утилизации и геологического хранения углекислого газа. Результаты экспериментов с металлическими наполнителями оценивают перспективность использования отходов металлообработки для утилизации CO_2, сопровождающейся генерацией водорода в водной среде. Установленные закономерности взаимодействия CO_2 с минералами горных пород и компонентами пластовой воды позволяют оценивать характер протекающих геохимических процессов и учитывать их влияние при проектировании и мониторинге закачки CO_2 в пласт. Результаты исследований также нашли отражение в патенте на разработанную автором комплексную методику RU 2 863 283 C1 «Способ оценки геохимических процессов при закачке CO_2 в геологические структуры, содержащие пластовую воду».

Публикации и апробация работы. По теме диссертационной работы опубликовано 6 статей в профильных научных рецензируемых изданиях, входящих в международные базы Web of Science и Scopus и 1 полнотекстовая статья в сборнике SPE, индексируемом в Scopus. Получен патент РФ на изобретение. Результаты диссертационного исследования докладывались на 12 международных и всероссийских научных конференциях по тематике диссертационной работы.

Публикации и автореферат с достаточной полнотой отражают все основные положения диссертационной работы.

Замечания оппонента к работе:

1) В главе 2 формулируется вывод, что стальная стружка обеспечивает более интенсивную генерацию водорода (H_2), а дробь дает более высокий выход углеводородов. Этот вывод не в полной мере обоснован, так как при описании результатов главы 2 не приводятся экспериментальные данные о полном компонентном составе газа после эксперимента, в частности не приводятся измеренные в эксперименте концентрации углеводородных компонент. В главе 2 даются только измеренные концентрации CO_2 и H_2. Учитывая зависимость растворимости газов в воде от давления, которое изменялось в реакторе, температуры и состава водной фазы, вывод о

выходе углеводородного газа представляется не вполне обоснованным.

2) В диссертации не приводится информация о характерном размере частиц металлической дроби и измельченного керна. Представляется, что эти параметры имеют значительное влияние как на время установления равновесия между карбонизированной водой и отмеченными средами, так и на сами параметры равновесного состояния из-за изменения площади контакта между фазами (площади реакционной поверхности). Опираясь на рисунок 11, автор предполагает, что выдержка в течение нескольких дней была достаточна для достижения равновесия. Однако данные, приводящиеся на рисунке 11, содержат слишком малое число точек, особенно на заключительном этапе выдержки, чтобы сделать однозначный вывод о прекращении реакций и достижении равновесия. Для воспроизводимости экспериментов желательно указать характерный размер частиц и привести более убедительное обоснование достижения условий равновесия.
3) В таблице 3.53 приводятся данные о растворимости CO_2 в дистиллированной воде. При этом дается ссылка на работу [12] – Указ Президента Российской Федерации № 666 от 4 ноября 2020 года. Представляется, что здесь имеется ошибка в цитируемом источнике. Кроме того, анализ всей совокупности цитируемой литературы показывает отсутствие в ней значимых и широко цитируемых работ, содержащих обзор и всесторонний анализ экспериментальных данных о растворимости CO_2 в воде. Это работы «N. Spycher, K. Pruess, and J. Ennis-King, "CO_2-H_2O mixtures in the geological sequestration of CO_2. I. Assessment and calculation of mutual solubilities from 12 to 100°C and up to 600 bar," Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 67, no. 16, pp. 3015–3031, 2003, doi: 10.1016/S0016-7037(03)00273-4.» и «N. Spycher and K. Pruess, "CO_2-H_2O mixtures in the geological sequestration of CO_2. II. Partitioning in chloride brines at 12-100°C and up to 600 bar," Geochim. Cosmochim. Acta, vol. 69, no. 13, pp. 3309–3320, 2005, doi: 10.1016/j.gca.2005.01.015.».
4) Изложение результатов геохимического моделирования в главе 4 представляется слишком поверхностным. В таблице 4.1 приводятся неполные результаты моделирования только для одного эксперимента. Для других экспериментов дается только текстовое описание их результатов. Таким образом, проведенное численное моделирование не подкрепляется каким-либо графическим

материалом и количественным сравнением с экспериментальными данными. Более полное количественное сопоставление результатов геохимического моделирования с экспериментом значительно усилило бы диссертационную работу. Кроме того, в тексте не приводится информация о базе данных констант минеральных реакций PHREEQC, использовавшейся в моделировании.

5) В диссертации используется термин «степень утилизации CO_2». Однако определение этого термина в виде формулы в диссертации не приводится. Можно предполагать, что эта величина определяется в виде доли помещенного в реактор CO_2, удерживаемого в минеральных фазах после достижения равновесия. Однако при таком определении степень утилизации CO_2 существенно зависит от объема реактора и массы помещенного в него наполнителя. Например, при фиксированной массе наполнителя и увеличении объема реактора в два раза можно ожидать примерно двухкратного снижения степени утилизации. Например, это отражается в экспериментах №№ 1 и 2, результаты которых приводятся в таблице 2.2. Таким образом, рассчитываемая величина не является универсальной характеристикой, масштабируемой на системы различного размера. Более высокое значение степени утилизации CO_2 не означает, что захват CO_2 минеральной фазой происходит более эффективным образом.
6) В проведенных экспериментах наблюдается растворение или отложение галита. Этот процесс очевидно связан с изменяющимся равновесием между водой и наполнителем реактора. Однако в разделе 4.1.3, при обзоре литературных данных о соответствующих реакциях и их кинетике, почему-то описывается процесс высаливания, который в первую очередь связан с выпадением галита при испарении воды в газовую фазу, а не физико-химическим взаимодействием между водной фазой и наполнителем. Таким образом, обзор, приводящийся в разделе 4.1.3, не имеет прямого отношения к диссертации, так как в ней не исследуется отложение галита при испарении воды в газовую фазу.
7) При измерении проницаемости керна не даются оценки точности полученных значений и соответствующие доверительные интервалы с учетом погрешностей измерений. Представляется, что проницаемость может быть измерена с точностью не менее нескольких процентов (а то и ~ 10%). В этой связи приводящиеся в разделе 3.5.2 оценки увеличения проницаемости керна на 1.7% и 1.3%

представляются не вполне обоснованными, учитывая, что это увеличение сопоставимо с точностью измерения проницаемости.

Приведенные замечания не снижают ценности исследования и носят рекомендательный характер. Диссертация Гарифуллиной Ч.А. представляет собой законченную научно-квалификационную работу, с новыми научными результатами и практически значимыми выводами. Представленная к защите работа Гарифуллиной Ч.А. отвечает критериям раздела II Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842 «О порядке присуждения ученых степеней» к кандидатским диссертациям. Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 2.8.4 – Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений, а ее автор, Гарифуллина Чулпан Айдаровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Я, Афанасьев Андрей Александрович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Заведующий лабораторией общей гидромеханики НИИ механики
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
доктор физико-математических наук,
член-корреспондент РАН

А.А. Афанасьев

Адрес: 119192, Москва, Мичуринский проспект, д. 1
Телефон: +7(495) 939-31-21
E-mail: afanasyev@imec.msu.ru

Дата 27.08.2026

Подпись Афанасьева Андрея Александровича заверяю:

И.о. директора НИИ механики
Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
член-корреспондент РАН

Д.В. Георгиевский