


«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной работе

Российского государственного университета нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

к.т.н., доцент

 П.К. Калашников

«28» мар 2024 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина»

Диссертация «Подбор эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ» выполнена на кафедре оборудования нефтегазопереработки Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

В период подготовки диссертации соискатель Гафарова Элиза Багаутдиновна работала в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина» в должности старшего преподавателя кафедры оборудования нефтегазопереработки.

В 2009 году окончила Государственное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный университет нефти и

газа имени И.М. Губкина» по специальности «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов»

Справка о сдаче кандидатских экзаменов № СП-948-131385 выдана в 2024 г. РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина.

Научный руководитель – доктор химических наук Мельников Вячеслав Борисович, профессор кафедры оборудования нефтегазопереработки Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И.М. Губкина».

Тема диссертационного исследования «Подбор эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ» была утверждена на заседании кафедры оборудования нефтегазопереработки 31.08.2021г.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

1. Личное участие автора в получении результатов диссертации:

– проведение экспериментальных исследований по подбору эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ и других процессов, требующих аналогичной степени осушки, на основе комплексного изучения адсорбционно – десорбционных свойств, фазовой и пористой структуры, химического состава, термической стабильности структуры отечественных и зарубежных промышленных адсорбентов;

– разработка модельной схемы механизма адсорбции влаги и регенерации адсорбентов;

– обоснование и выбор технологической схемы, и определение оптимальных технологических режимов процесса адсорбционной осушки газа.

2. Степень достоверности результатов проведенных исследований

изложенных в работе, достаточно полно и убедительно подтверждается результатами экспериментальных исследований с использованием современного научно-исследовательского оборудования, воспроизводимостью результатов физико-химических методов анализа, корректной обработкой данных и апробацией полученных результатов.

Выполненная исследовательская работа согласуется с опубликованными в литературе экспериментальными данными и является оригинальной.

3. Новизна научных результатов

1) **Установлены** особенности структуры и адсорбционных свойств адсорбентов на основе проведения комплексных сравнительных исследований современными физико-химическими методами состава, кристаллохимической и пористой структуры, термофазовых превращений, адсорбционных свойств промышленных отечественных и зарубежных адсорбентов, применяемых в осушке газов и показана эффективность использования отечественных промышленных адсорбентов при производстве СПГ;

2) **Получены** кинетические зависимости процесса глубокой осушки газа с использованием отечественных адсорбентов на основе цеолитов А и Х в сравнении с применяемыми зарубежными цеолитными адсорбентами и установлена эффективность использования отечественных промышленных адсорбентов;

3) **Разработаны** модельные схемы механизма адсорбции влаги и регенерации адсорбента на основе комплексных исследований кинетики адсорбции влаги и регенерации адсорбента, пористой структуры, термофазовых превращений адсорбентов и показана ведущая роль ОН-групп в структуре адсорбентов для образования межмолекулярных водородных связей и обеспечения высокой адсорбционной активности сорбентов глубокой осушки газа в сравнении с донорно-акцепторными центрами в адсорбентах;

4) **Установлены** особенности дегидроксилирования структуры отечественных и зарубежных адсорбентов на основе цеолитов А и Х методом дифференциально-термического анализа.

4. Практическая и теоретическая значимость работы

1) Установлена роль и значимость межмолекулярных водородных связей и донорно-акцепторных свойств на основе проведенных комплексных исследований структурных особенностей адсорбентов методами дифференциального термического и рентгенофазового анализов и их

адсорбционной активности в осушке газа. Показана ведущая и значимая роль межмолекулярных водородных связей в обеспечении высокой адсорбционной активности сорбентов в глубокой осушке газа. При температурах регенерации адсорбентов более 350 °С доля ОН-групп в их структуре уменьшается за счет дегидроксилирования структуры, адсорбционная активность по влаге снижается, а кристаллическая структура цеолитов сохраняется;

2) Предложены модельные схемы механизма осушки газа и регенерации адсорбента при одновременном участии межмолекулярных водородных связей и донорно-акцепторных центров в структуре адсорбентов на основе комплексных исследований кинетики адсорбции влаги и регенерации адсорбента, пористой и кристаллохимической структуры, термофазовых превращений адсорбентов;

3) Установлены особенности дегидроксилирования структуры отечественных и зарубежных адсорбентов на основе цеолитов А и X, обусловленные различным количеством и распределением ОН-групп в их структуре по энергетическому состоянию методом дифференциально-термического анализа;

4) Адсорбционными кинетическими и технологическими исследованиями процесса глубокой осушки газа при производстве СПГ показано, что отечественные адсорбенты на основе цеолитов А и X в сравнении с применяемыми зарубежными цеолитными адсорбентами (например, фирмы Линде, выпускаемый компанией BASF) могут эффективно использоваться в отечественной промышленности. Это обусловлено в основном меньшим удельным расходом адсорбента и более высокой активностью отечественных адсорбентов;

5) Установлено, что отечественные адсорбенты на основе цеолитов NaA и NaX по адсорбционной активности в осушке газа не только не уступают зарубежным цеолитным адсорбентам, выпускаемым компанией BASF, а в некоторых случаях превосходят их. Так, например, в интервале температур от 5 до 50 °С и объемных скоростях осушаемого газа от 2000 ч⁻¹ до 12500 ч⁻¹

адсорбенты NaX-BC и NaA-BC проявляют более высокую динамическую адсорбционную активность в осушке воздуха и метана, чем остальные адсорбенты; незначительно меньшая сорбционная емкость отмечена для образцов 13X BASF и 4A BASF;

6) Установлено, что из всех исследованных отечественных и зарубежных адсорбентов, отечественный цеолитный адсорбент NaA-BC обладает наибольшей динамической активностью, его использование в технологической схеме глубокой адсорбционной осушки газа уменьшают энергетические затраты на осушку при производстве СПГ;

7) Проведенными исследованиями установлено, что двухадсорберная технологическая схема адсорбционной осушки газа в сравнении с трехадсорберной схемой, применяемой в производстве СПГ, большей компактностью и более простой схемой управления, меньшим количеством технологических газопроводов обвязки между адсорберами в технологической схеме и соответственно меньшим числом необходимых приборов КИП для измерения температуры, давления, расходов и т.п. При ее использовании меньше тепловые затраты даже без учета тепловых потерь в газопроводах обвязки между адсорберами;

8) Установлены оптимальные технологические условия регенерации отечественных промышленных адсорбентов при их использовании в осушке газа при производстве СПГ;

9) Внедрены в ООО «Сахалинская Энергия» при проведении работ по анализу технологий глубокой осушки природного газа отдельные результаты научных исследований, а именно:

- рекомендации по подбору эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ;
- рекомендации по оптимальным условиям регенерации адсорбентов для обеспечения максимальной эффективности и продления срока их службы, а также минимизации негативного влияния на их активность

при проведении многократных стадий регенерации при высоких температурах.

5. Ценность научных работ соискателя ученой степени заключается в подборе эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ и других процессов, требующих аналогичной степени осушки, на основе комплексного изучения адсорбционно – десорбционных свойств, фазовой и пористой структуры, химического состава, термической стабильности структуры отечественных и зарубежных промышленных адсорбентов.

Исследования в этой области способствуют расширению научных и практических знаний о глубокой адсорбционной осушке газа и поглотительных свойствах адсорбентов.

Результаты данных исследований могут быть использованы в промышленности для оптимизации технологических процессов осушки газа.

Использование отечественных адсорбентов в глубокой адсорбционной осушке природного газа становится актуальным для обеспечения импортозамещения при создании новых технологий и техники для производства СПГ.

6. Соответствие диссертации пункту 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842. Диссертационная работа была выполнена в соавторстве с научным руководителем В.Б. Мельниковым. В тексте отсутствуют заимствованные материалы без ссылки на автора и источник заимствования. Все представленные в работе результаты экспериментальных исследований являются оригинальными и получены при непосредственном участии автора.

7. Соответствие диссертации научной специальности и отрасли науки

Диссертационная работа Гафаровой Э.Б. посвящена комплексному исследованию отечественных и зарубежных адсорбентов для глубокой

осушки природного газа. На основе проведенных комплексных исследований предложено технологическое решение по регенерации адсорбентов. Вопросы, касающиеся технологий переработки газового сырья, включены в паспорт специальности 2.6.12 «Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ».

8. Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем

По теме диссертации опубликован 21 научный труд, в том числе 12 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК, индексируемых в Web of Science и RSCI, из которых 11 за последние пять лет; 9 научных тезиса в сборниках материалов региональных, всероссийских и международных конференций:

1. **Гафарова Э.Б.,** Мельников В.Б., Макарова Н.П., Федорова Е.Б. Роль и значение процесса адсорбции в газовой промышленности // Наука и бизнес: пути развития. – 2018.– № 4(82). – С. 67–76.
2. Mel'nikov V.B., Fedorova E.B., **Gafarova E.B.** Comparative evaluation of adsorbents for natural gas dehydration at liquefied natural gas plant // Chemistry and technology of fuels and oils. – 2020. – С.31-35.
3. **Гафарова Э.Б.,** Мельников В.Б., Макарова Н.П., Федорова Е.Б. Исследование регенерации цеолитсодержащих адсорбентов // Нефтепромысловое дело. – 2021.– № 7(631). – С. 46–48.
4. **Гафарова Э.Б.,** Мельников В.Б. Сравнительный анализ основных показателей процесса адсорбционной осушки при производстве сжиженного природного газа // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2022.– № 2(150). – С. 31–41.
5. **Гафарова Э.Б.,** Мельников В.Б. Исследование пористой структуры промышленных адсорбентов осушки и очистки газов на основе изотерм адсорбции – десорбции азота // Южно-сибирский научный вестник. – 2022.– № 6(46). – С. 318–323.

6. **Гафарова Э.Б.**, Мельников В.Б., Макарова Н.П., Федорова Е.Б. Анализ основных показателей процесса адсорбционной осушки при производстве сжиженного природного газа // Нефтепромысловое дело. – 2022.– № 1(637). – С. 61–65.
7. Мельников В.Б., Федорова Е.Б., Макарова Н.П., **Гафарова Э.Б.** Исследование динамической адсорбционной активности силикагелей в осушке газов // Нефтепромысловое дело. – 2022.– № 5(641). – С. 51–53.
8. **Гафарова Э.Б.**, Мельников В.Б., Макарова Н.П. Исследование термической стабильности адсорбентов // Нефтепромысловое дело. – 2023.– № 2(650). – С. 52–57.
9. **Гафарова Э.Б.**, Мельников В.Б., Федорова Е.Б., Макарова Н.П. Исследование применения отечественных адсорбентов в процессе адсорбционной осушки газа при производстве сжиженного природного газа // Научный журнал российского газового общества. – 2023.– № 3(39). – С. 52–63.
10. Мельников В.Б., **Гафарова Э.Б.**, Макарова Н.П., Федорова Е.Б. Исследования отечественных и зарубежных адсорбентов в промышленной осушке нефтяного газа // Нефтяное хозяйство. – 2024.– № 2. – С. 112–116.
11. **Гафарова Э.Б.**, Мельников В.Б., Федорова Е.Б., Макарова Н.П. Комплексное исследование свойств отечественных и зарубежных адсорбентов для глубокой осушки природного газа // Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. – 2024.– № 1(314). – С. 108–119.
12. Fedorova E.B., Mel'nikov V.B., **Gafarova E.B.**, Fedorova V.A Optimal thermobaric parameters determination of natural gas dehydration in LNG production // IOP conference series: materials science and engineering 27 – 29 november 2019 г. – Stavanger, Norway – 2019. – С. 012014.
13. **Гафарова Э.Б.**, Мельников В.Б., Федорова Е.Б. Определение оптимального режима эксплуатации систем осушки природного газа при производстве СПГ // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: материалы Региональной научно-технической конференции 24 – 26 сентября 2019 г. – Москва – 2019. – С. 62.

14. Мельников В.Б., Макарова Н.П., **Гафарова Э.Б.** Исследование кинетики осушки газа цеолитными адсорбентами // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: материалы Региональной научно-технической конференции 22 – 23 октября 2020 г. – Москва – 2020. – С. 138.
15. **Гафарова Э.Б.** Сравнительный анализ адсорбционной активности различных промышленных адсорбентов // Актуальные проблемы нефтехимии: материалы Российской конференции (с международным участием) 05 – 09 октября 2021 г. – Грозный – 2021. – С. 609 – 610.
16. **Гафарова Э.Б.** Сравнительный анализ основных показателей процесса адсорбционной осушки при производстве сжиженного природного газа // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: материалы I Всероссийской научно-практической конференции 30 ноября – 01 декабря 2021 г. – Москва – 2021. – С. 82– 83.
17. **Гафарова Э.Б.** Глубокая осушка природного газа при производстве СПГ / Э.Б. Гафарова // Переработка углеводородного сырья: проблемы и инновации-2022: материалы Международной научно-практической конференции 10 ноября 2022 г. – Астрахань – 2022. – С. 31 – 34.
18. Мельников В.Б., Макарова Н.П., **Гафарова Э.Б.** Об активности цеолитных адсорбентов в осушке природного газа при производстве СПГ // Губкинский университет в решении вопросов нефтегазовой отрасли России: материалы VI Региональной научно-технической конференции 19 – 21 сентября 2022 г. – Москва – 2022. – С. 611– 612.
19. **Гафарова Э.Б.** Анализ пористой структуры на основе изотерм адсорбции-десорбции азота различными адсорбентами, применяемыми при производстве сжиженного природного газа // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: материалы II Всероссийской научно-практической конференции 08 – 09 ноября 2022 г. – Москва – 2022. – С. 118–120.
20. **Гафарова Э.Б.,** Мельников В.Б. Исследование адсорбентов глубокой осушки газов // 21 век: фундаментальная наука и технологии: материалы XXXIII международной научно-практической конференции 02 – 03 октября 2023 г. – Bengaluru, Karnataka, India – 2022. – С. 122– 126.

21. **Гафарова Э.Б.** Исследование адсорбентов для осушки газов при производстве сжиженного природного газа // Сжиженный природный газ: проблемы и перспективы: материалы III Всероссийской научно-практической конференции 17 – 18 октября 2024 г. – Москва – 2024. – С. 35– 39.

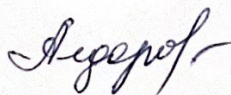
Диссертация «Подбор эффективных отечественных адсорбентов для глубокой осушки природного газа при производстве СПГ» Гафаровой Элизы Багаутдиновны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.12 – Химическая технология топлива и высокоэнергетических веществ.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры оборудования нефтегазопереработки.

Присутствовали на заседании 12 человек. Результаты голосования: «за» - 12 чел., «против» - 0, «воздержалось» - 0, протокол № б/н от 2 апреля 2024 г.

Заведующий кафедрой оборудования
нефтегазопереработки

д.т.н. 05.17.07, доцент



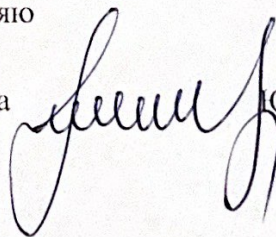
Федорова Елена Борисовна

24.05.2024 г.

Подпись Федоровой Елены Борисовны заверяю

Начальник отдела кадров

РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина



Ю.Е. Ширяев