

Сведения о ходе выполнения проекта
**«Разработка энергосберегающих технологий осушения сжатого воздуха в
процессе компримирования и подготовки для использования в
промышленности и на транспорте»**

Руководитель проекта д-р физ.-мат. наук Курзина И.А.

В ходе выполнения проекта по Соглашению о предоставлении субсидии от 26 сентября 2017 г. № 14.575.21.0139 с Минобрнауки России в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» на этапе № 3 в период с 01.01.2019 г. по 31.12.2019 г. выполнены следующие работы:

1. Проведена наработка перспективного образца адсорбента для проведения испытаний на пилотной установке осушения воздуха в количестве не менее 3 кг.
2. Определены статическая и динамическая емкости перспективного образца адсорбента.
3. Проведены исследования кинетики адсорбции и десорбции паров воды на перспективном образце адсорбента, уточнение параметров математической модели.
4. Проведены исследования физико-химических свойств перспективного образца адсорбента.
5. Проведены исследовательские испытания по изучению адсорбционных характеристик образцов имеющихся (приобретенных) промышленных адсорбентов-осушителей на испытательных стендах в одинаковых с разработанными алюмооксидными адсорбентами условиях.
6. Проведены исследования физико-химических свойств промышленных образцов адсорбентов-осушителей.
7. Проведена адаптация математической модели слоев адсорбентов с проведением расчета и оптимизации слоев адсорбентов и технологических параметров загрузки применительно к имеющейся пилотной установке.
8. Разработана программа проведения экспериментальных исследований системы осушения компримированного газа с использованием экспериментального образца перспективного алюмооксидного адсорбента на имеющейся пилотной установке.
9. Проведены дополнительные патентные исследования по адсорбентам и адсорбционным системам осушки.
10. Проведены экспериментальные исследования процесса осушения компримированного газа с использованием экспериментального образца перспективного алюмооксидного адсорбента на модернизированной пилотной установке:
 - Апробирована технология комплексной загрузки разрабатываемых адсорбентов для осушения воздуха на пилотной установке, определены параметры оптимального комбинированного слоя адсорбентов.

- Уточнены параметры математической модели комбинированного адсорбционного слоя.
 - Уточнены режимы работы адсорберов пилотной установки.
 - Проанализированы полученные при пилотных испытаниях экспериментальных результаты, проведено сравнение экспериментальных данных с данными, полученными с помощью моделирования. Оптимизированы режимы работы адсорберов при выбранном комбинированном слое адсорбентов.
11. Разработана технологическая инструкция по комплексной загрузке адсорбентов в адсорбционные колонны промышленного масштаба для осушки компримированного газа.
 12. Обобщены полученные результаты и проведен анализ выполнения требований технического задания.
 13. Проведена метрологическая экспертиза разработанного стандарта организации на лабораторный процесс приготовления алюмооксидных адсорбентов в соответствии с ГОСТ 1.4-2004 и ГОСТ 1.5-2012.
 14. Разработаны рекомендации по оптимальному ведению процесса сорбции паров воды в системе осушки воздуха.
 15. Разработан проект технического задания на проведение ОКР в соответствии с требованиями ГОСТ Р 15.201-2000.
 16. Разработано технико-экономическое обоснование (ТЭО) проекта организации производства адсорбентов.
 17. Разработана эскизная конструкторская документация на модернизированную пилотную установку в соответствии с требованиями ГОСТ 2.701-2008 и ГОСТ 2.102-68.
 18. Проведена модернизация пилотной установки к проведению испытаний перспективного образца адсорбента.
 19. Выполнена организация и сопровождение пилотных испытаний.
 20. Проведены маркетинговые исследования мирового рынка сорбентов с целью изучения перспектив коммерциализации РИД, полученных при выполнении ПНИ.
 21. Разработан Бизнес-план использования разработанных высокоактивных сорбентов и новой высококонкурентной технологии их комплексной загрузки.

Основные результаты проекта:

Синтезированы образцы алюмооксидных адсорбентов: 1) модифицированных катионами щелочных металлов (K, Na, Li) с содержанием от 1 до 6 % масс.; 2) импрегнированных гигроскопическими солями ($MgSO_4$ и $CaCl_2$) с содержанием соли в образце от 8 до 15,5 % масс. Изучены характеристики всех полученных адсорбентов на основе оксида алюминия. Модифицированный ионами натрия алюмооксидный адсорбент (перспективный образец) обладает улучшенными характеристиками прочности (8,4 МПа) и динамической ёмкости 6,9-7.5 г/100 см³, что существенно превосходит заявленные в техническом задании показатели. Разработаны математические модели расчета оптимального размера зерна адсорбента, высоты и состава слоев в адсорбере и проведены численные исследования по

оптимизации технологических режимов работы адсорберов при применении эффективных адсорбентов. На третьем этапе выполнения ПНИ был наработан перспективный образец алюмооксидного адсорбента в количестве 3 кг и проведены работы по осушению с его помощью сжатого газа на модернизированной пилотной установке при варьировании состава, высоты слоев адсорбентов (Al_2O_3 , NaX) и параметров проведения процесса. Проведена апробация и уточнение параметров разработанной математической модели комбинированного адсорбционного слоя. Показано, что модель позволяет посредством численных расчётов рассчитать динамику протекания процесса в адсорберах различной мощности, в том числе и заявленной в проекте – $10 \text{ м}^3/\text{мин}$. ($600 \text{ м}^3/\text{час}$). Полученные в ходе проведения пилотных испытаний результаты позволили разработать рекомендации по оптимальному ведению процесса сорбции паров воды в системе осушки воздуха. Проведены дополнительные патентные исследования. Проведены маркетинговые исследования мирового рынка сорбентов с целью изучения перспектив коммерциализации РИД, полученных при выполнении ПНИ. Отмечено, что основными барьерами к выходу на рынок разработанного высокоэффективного адсорбента на основе оксида алюминия является наличие крупных производителей адсорбентов и их налаженные отношения с крупными потребителями. Для выхода на рынок адсорбентов в этих условиях более предпочтительно создание собственного производства материалов для осушки газов различной природы, использующего разработанную конкурентоспособную технологию получения алюмооксидных адсорбентов-осушителей. Для практического внедрения результатов ПНИ были разработаны технико-экономическое обоснование (ТЭО) проекта организации производства адсорбентов и Бизнес план использования синтезированных высокоактивных сорбентов и новой высоко конкурентной технологии их комплексной загрузки, создан проект технического задания на проведение ОКР.

Сравнительные испытания с образцами промышленных адсорбентов показали, что разработанный адсорбент-осушитель по основным характеристикам (статической емкости при относительной влажности 60 % – $20 \text{ г}/100 \text{ г}$ и динамической емкости – $6,9-7,5 \text{ г}/100 \text{ см}^3$) превосходит большинство отечественных адсорбентов на основе оксида алюминия, а по динамической емкости - зарубежный аналог на основе оксида алюминия (статическая емкость при относительной влажности 60 % – $21 \text{ г}/100 \text{ г}$, динамическая емкость $4,4 \text{ г}/100 \text{ см}^3$). Также он не уступает по динамической емкости менее прочным и менее устойчивым к капельной влаге осушителям на основе цеолита (статическая емкость при относительной влажности 60% – $22-27 \text{ г}/100 \text{ г}$, динамическая емкость $7,0-8,5 \text{ г}/100 \text{ см}^3$) и существенно превосходит по показателю динамической емкости осушитель на основе силикагеля КСМГ (динамическая емкость $3,5 \text{ г}/100 \text{ см}^3$). В связи с этим он может быть использован не только в качестве защитного слоя в составе систем осушки в комбинации с другими осушителями, но и в качестве основного слоя адсорбента-осушителя. Использование такого осушителя может обеспечить повышение производительности существующих адсорберов, благодаря устойчивости к капельной влаге повысить срок службы используемых вместе с ним адсорбентов (цеолита, силикагеля). При замене разработанным

адсорбентом в системе осушки цеолита возможно снизить затраты на регенерацию адсорбента. Таким образом, данная разработка представляет несомненный практический интерес. В настоящий момент отечественных аналогов созданному адсорбенту нет. К тому же, применение энергосберегающего и экологически безопасного способа получения сорбента посредством термической активации гидраргиллита в реакторах с вращающейся поверхностью нагрева без использования традиционного «пневмотранспорта» позволит снизить его себестоимость. Оптимизированы технологические режимы работы адсорбера с производительностью 10 м³/мин. (форма, размер зерен, высота слоёв, послонная загрузка слоев оксида алюминия и цеолита, давление и скорость газового потока и др.) на основе математического моделирования. Предложен вариант схемного решения адсорбционной системы осушки компримированного газа в адсорберах периодического действия с неподвижным слоем осушителя (адсорбция-десорбция), заключающийся в использовании комбинированной загрузки для процессов до 0,3 МПа и однородного слоя разработанного алюмооксидного сорбента для процессов при давлении более 0,3 МПа. Работы по поиску решений для повышения эффективности процесса адсорбционной осушки, направленные на теоретическое обоснование выбора комплексной загрузки также в последние годы проводятся и за рубежом. Полученные результаты в полной мере соответствуют Техническому заданию на выполнение ПНИ.