

На правах рукописи

УДК 621.51; 66.081

Подчуфаров Алексей Алексеевич

**РАЗРАБОТКА ТРАНСПОРТНОЙ АДсорбционной УСТАНОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА
ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРЕБУЕМОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТОЧКИ РОСЫ
СЖАТОГО ВОЗДУХА**

**Специальность 05.04.03 - Машины и аппараты, процессы холодильной и
криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена на кафедре холодильной, криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана (национальном исследовательском университете)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Жердев Анатолий Анатольевич

Официальные
оппоненты: доктор технических наук, профессор
ФГБОУ Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова
Толмачев Алексей Михайлович

кандидат технических наук,
заместитель директора по науке и
производству ООО «АКЕЛА-Н»
Потапов Сергей Владимирович

Ведущая организация: АО «Научно-исследовательский и
конструкторско-технологический институт
подвижного состава»
(АО «ВНИКТИ»)

Защита состоится «__» _____ 2021 года в 14:00 на заседании
Диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус «Энергомашиностроение»,
3 этаж, Конференц-зал кафедры холодильной, криогенной техники, систем
кондиционирования и жизнеобеспечения

С диссертацией до защиты можно ознакомиться в библиотеке
МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Ваши отзывы в 2-х экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба
направлять по адресу: 105005, г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, д.5. стр. 1,
ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «__» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.16
кандидат технических наук, доцент

О.В. Белова

Актуальность работы – наличие конденсата в хладагентах и газах (в частности, в сжатом воздухе) приводит к ухудшению условий работы установок и систем автоматики, что ведет к простоям оборудования и возникновению аварийных ситуаций, а также к снижению качества различных технологических процессов в машиностроительной, металлургической, пищевой, химической, медицинской, газо- и нефтедобывающих отраслях промышленности, на транспорте.

Например, для исключения вероятности попадания конденсата в пневматические системы транспортных средств используют адсорбционные осушители сжатого воздуха, которые согласно современным требованиям (ГОСТ 32202-2013, ГОСТ 10393-2014) должны обеспечивать понижение температуры точки росы от 20 °С до 40 °С относительно температуры окружающей среды в широком диапазоне температур эксплуатации оборудования (от минус 50 до плюс 65 °С) в течение всего их срока службы.

Однако, многие современные осушители не выполняют требования к эксплуатации при пониженных температурах, по размещению аппаратов в транспортных средствах. Это ставит перед исследователями задачи разработки новых технических решений для обеспечения более низкого значения температуры точки росы сжатого воздуха для транспортных систем.

Сегодня в установках обеспечения температуры точки росы (осушки) в транспортных средствах применяются гранулированные адсорбенты, а также адсорбционные материалы разной формы (трубчатый, листовой, блочный). Интенсивное использование адсорбционных материалов в транспортных системах предъявляет повышенные требования к их эксплуатационным характеристикам. Требуется высокая прочность, возможность размещения в конструкциях сложной конфигурации, отсутствие истирания (пыления), что является характерными недостатками эксплуатации гранулированных адсорбентов. Трубчатый, листовой, блочный адсорбционные материалы имеют повышенные требования к предварительной очистке сжатого воздуха и дорогостоящую технологию изготовления.

В других областях использования сорбционных технологий в настоящее время нашли применение композитные адсорбционные материалы (КАМ), состоящие из исходных адсорбентов – наполнителей и связующего вещества – матрицы, которые смешиваются и формуруются в определенных условиях. Варьируя материалы и параметры изготовления, целенаправленно регулируются характеристики КАМ, что открывает потенциал для создания широкого ассортимента конкурентоспособных адсорбционных материалов для их применения на транспорте, обеспечивающих требуемую температуру точки росы.

Объект исследования – установка очистки и осушки газов, в частности сжатого воздуха, с композитным адсорбционным материалом (КАМ), применяемая для обеспечения требуемой температуры точки росы.

Предмет исследования – процессы сорбции, протекающие в установке очистки и осушки газов с композитным адсорбционным материалом, применяемой для получения требуемой температуры точки росы сжатого

воздуха.

Цель работы – совершенствование транспортных адсорбционных установок очистки и осушки сжатого воздуха (УОСВ) (далее – установка) пневмосистем для обеспечения нормативных требований понижения температуры точки росы за счет использования композитных адсорбционных материалов (КАМ).

Основные задачи

1. Разработка методики формирования внутренней структуры образцов КАМ транспортных установок, выполняющей требования нормативных документов и стандартов ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014 в широком температурном диапазоне работы оборудования (от минус 50 до плюс 65 °С), соответствующей условиям эксплуатации транспортных средств и гибкости установки (горизонтальная установка).

2. Создание экспериментального стенда, методики исследования и проведение исследований адсорбционных и кинетических характеристик выбранных адсорбентов и КАМ с целью выбора наиболее эффективного образца КАМ для транспортных установок, определение погрешности экспериментальных исследований.

3. Создание экспериментального стенда, методики исследования и проведение исследований процессов осушки сжатого воздуха транспортных установок, определение значений температуры точки росы сжатого воздуха и гидравлического сопротивления слоя выбранных адсорбентов и КАМ, определение погрешности экспериментальных исследований.

4. Проведение вибрационных и климатических испытаний выбранного КАМ для транспортных установок, определение температуры точки росы сжатого воздуха и гидравлического сопротивления КАМ после проведения испытаний.

5. Разработка опытного образца установки с горизонтальным расположением адсорберов с КАМ, проведение вибрационных испытаний опытного образца установки с КАМ.

6. Формирование практических рекомендаций по использованию КАМ в задачах осушки, определение стоимости жизненного цикла транспортных установок с КАМ.

Научная новизна

1. Установлены взаимосвязи между параметрами формирования внутренней структуры КАМ для транспортных установок, такими как соотношение адсорбента и связующего вещества, давление формования, и их характеристиками (плотность упаковки, структура поверхности, адсорбционная емкость).

2. Впервые проведен комплекс экспериментальных исследований КАМ для транспортных установок, определены эксплуатационные характеристики транспортных установок: зависимость значений температуры точки росы сжатого воздуха от расхода воздуха на регенерацию адсорбента и гидравлического сопротивления слоя КАМ, проведен анализ полученных экспериментальных данных в сравнении с требованиями нормативных

документов и стандартов ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014.

3. Впервые получены и аналитически обработаны экспериментальные данные изотерм адсорбции паров воды и кинетические кривых образцов КАМ для транспортных установок.

Практическая значимость

1. Впервые разработана методика формирования внутренней структуры КАМ с применением полимерного связующего вещества, адаптированная для транспортных установок, обеспечивающих требуемое качество сжатого воздуха за счет увеличения плотности упаковки КАМ.

2. Получены и исследованы КАМ для транспортных установок, устойчивые к вибрациям и пылению, работающие в широком температурном диапазоне эксплуатации оборудования от минус 50 до плюс 65 °С в отличие от гранулированных адсорбентов.

3. Создан опытный образец установки с горизонтальным расположением адсорберов с КАМ, что позволяет выгодно разместить установку с КАМ на транспортном средстве по сравнению с установками с гранулированным адсорбентом.

4. Получены результаты вибрационных испытаний опытного образца установки и КАМ, а также результаты климатических испытаний КАМ, определены значения температуры точки росы сжатого воздуха и величина гидравлического сопротивления слоя КАМ, соответствующие нормативным требованиям и стандартам ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014.

Внедрение результатов работы

1. Результаты работы внедрены ООО «Эйр Драйер» (г. Москва, г. Троицк, ИНН 5408002324).

2. Разработан лабораторный технологический регламент на изготовление адсорбционного материала системы осушителя (ЛТР 3139-2017) в рамках работ по договору Э3139сп на тему: «Разработка адсорбционного материала системы осушителя сжатого воздуха» от 02 декабря 2015 года.

3. Разработан и изготовлен блок очистки и осушки сжатого воздуха МА (АБПШ.067561.001) компанией ООО «Эйр Драйер».

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Достоверность полученных экспериментальных данных обеспечивается применением аттестованных измерительных приборов, апробированных методик измерения и расчета погрешности измерений. Результаты экспериментального исследования КАМ (погрешность экспериментов не превышала 17 %), результаты экспериментального исследования установок с КАМ, с определением температуры точки росы и гидравлического сопротивления слоя КАМ (погрешность экспериментов не превышала 18 %) согласуются с нормативными требованиями и стандартами ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014.

Достоверность результатов также обеспечивается результатами проведенных приемочных (климатических и вибрационных) испытаний КАМ и предварительных испытаний опытного образца установки.

На защиту выносятся:

1. Разработанная методика формирования внутренней структуры КАМ для транспортных установок, соответствующая требованиям нормативных документов и стандартов ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014, эксплуатации при пониженных температурах и размещению аппаратов в транспортных средствах.

2. Результаты исследований адсорбционных и кинетических характеристик выбранных адсорбентов и КАМ с выбором наиболее эффективного образца КАМ для транспортных установок. Результаты определения погрешности экспериментальных исследований.

3. Результаты исследования выбранных адсорбентов и КАМ для транспортных установок на экспериментальном стенде для исследования процесса осушки сжатого воздуха, определение значений температуры точки росы и гидравлического сопротивления слоя выбранных адсорбентов и КАМ. Результаты определения погрешности экспериментальных исследований.

4. Результаты вибрационных и климатических испытаний выбранного КАМ для транспортных установок. Значения температуры точки росы и гидравлического сопротивления КАМ после проведения испытаний. Результаты вибрационных испытаний опытного образца транспортной установки с КАМ.

5. Практические рекомендации по использованию КАМ в задачах осушки. Результаты определения стоимости жизненного цикла (СЖЦ) транспортных установок.

Апробация работы

Основные результаты научно-квалификационной работы доложены и обсуждены на конференциях:

- IX Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2016).

- XI Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «ПОЛИТЕХНИКА» (Москва, 2016).

- XVIII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике (Казань, 2017).

- X Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2017).

- XII Всероссийской инновационной молодежной научно-инженерной выставке «ПОЛИТЕХНИКА» (Москва, 2017).

- XX Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств» (Владимир, 2018).

- Международной научной конференции «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (Омск, 2019).

- XII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2019).

- Саммите молодых ученых и инженеров «Большие вызовы для

общества, государства и науки» (Сочи, 2019).

- Третьей международной научно-практической конференции «Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения» (Москва, 2019).

- XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов (с международным участием) «Будущее машиностроения России» (Москва, 2020).

Личный вклад автора

Автор разработал и принимал участие в изготовлении опытного образца транспортной установки. Спроектировал и принимал участие в изготовлении экспериментальных стендов для исследования свойств адсорбционных материалов и процессов осушки сжатого воздуха, также автор проводил экспериментальные исследования и математическую обработку полученных экспериментальных данных.

Автором также была разработана методика формирования внутренней структуры и изготовлены образцы композитных адсорбционных материалов, обобщены полученные результаты исследований, написаны и опубликованы статьи по теме диссертации.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 4 в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и МБД.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, приложения и содержит 158 страниц основного текста, 59 рисунков, 26 таблиц и список литературы из 110 наименований.

Соответствие паспорту специальности

В работе исследуется адсорбционная установка очистки и осушки газов, в частности сжатого воздуха, с применением композитного адсорбционного материала с целью достижения требуемой температуры точки росы сжатого газа (воздуха) в широком температурном диапазоне работы от минус 50 до плюс 65°C. Тема работы полностью соответствует п.1 и п.3 паспорта специальности 05.04.03. – «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения».

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первая глава носит обзорно-постановочный характер и состоит из четырех разделов. В разделе 1.1 и 1.2 описаны требования и классификация потребителей сжатого воздуха по температуре точки росы, которые определяют необходимость использования соответствующих методов очистки и осушки сжатого воздуха от загрязнений.

Проведено сопоставление методов осушки сжатого воздуха в зависимости от требований к температуре точки росы. Область применения методов обеспечения требуемой температуры точки росы сжатого воздуха в зависимости от производительности установок и температуры точки росы под давлением (ТРД) представлена на Рисунке 1.

В разделе 1.3 рассмотрен вопрос обеспечения требуемой температуры точки росы сжатого воздуха на транспорте в широком диапазоне температур окружающей среды от минус 50 °С и до плюс 65 °С. Согласно ГОСТ 32202-2013 «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава», ГОСТ 10393-2014 «Компрессоры, агрегаты компрессорные для железнодорожного подвижного состава» введено понятие понижения температуры точки росы (ПТТР) относительно температуры окружающей среды в широком диапазоне, что позволяет при разработке и проектировании осушителей оптимизировать размеры установок и избежать чрезмерного потребления электроэнергии при их работе.

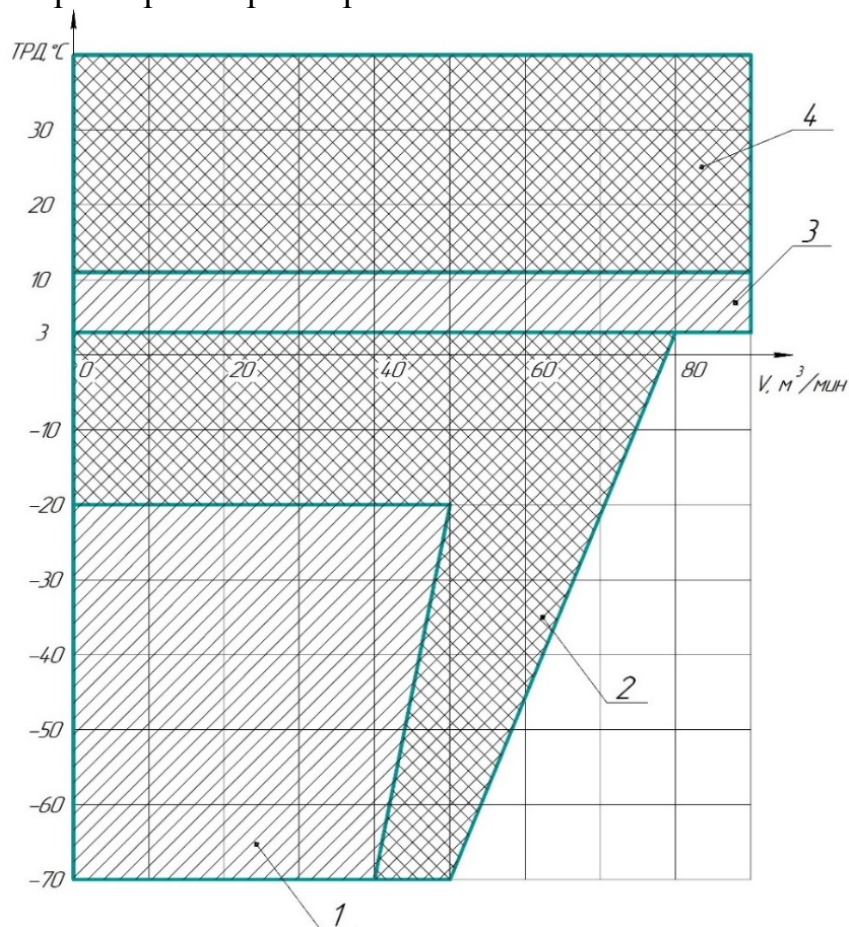


Рисунок 1. Область применения методов обеспечения температуры точки росы сжатого воздуха: 1 – адсорбционные осушители, 2 – гибридные осушители, 3 – конденсационные осушители с использованием холодильной установки, 4 – конденсационные осушители с использованием холода окружающей среды

Установлено, что для транспортных адсорбционных установок целесообразно использование средств очистки и осушки сжатого воздуха, основанных на адсорбционном методе с безнагревательной регенерацией адсорбента (короткоцикловая адсорбция (КЦА)), что позволяет достичь требуемого ПТТР от 20 до 40 °С при работе в широком диапазоне температур окружающего воздуха от минус 50 °С и до плюс 65 °С.

Отмечено, что для транспортных средств, адсорберы горизонтального

типа обладают преимуществом по сравнению с адсорберами вертикального типа при размещении в труднодоступных местах при ограничении по высоте оборудования для очистки и осушки газов.

В разделе 1.4 проведен обзор адсорбентов, применяемых в системах обеспечения требуемой температуры точки росы сжатого воздуха и методы их исследования в статическом и динамическом режимах. Достоинства активного оксида алюминия, такие как термическая стабильность, относительная легкость получения, доступность сырья, обеспечивают возможность его широкого применения наряду с силикагелем и цеолитами. Использование гранулированных, дробленых и порошкообразных адсорбентов в системах осушки на транспортных средствах имеет ряд недостатков, связанных с их истираемостью и пылением при эксплуатации – непрерывное изменение циклического давления, а также внешние колебания и пульсации компрессора приводят к блокировке транспортных пор адсорбента, уменьшению адсорбционной емкости и кинетических параметров массопереноса процессов сорбции, вследствие чего уменьшается межсервисный интервал обслуживания и срок эксплуатации установок.

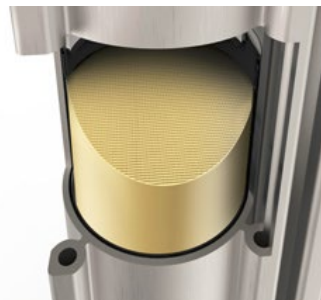
Отмечено, что в настоящее время широкое применение на транспортных средствах нашли представленные на Рисунке 2 адсорбционные материалы разной формы (моноблоки, монолиты, нанотрубки, листы), с повышенной кинетикой и механической прочностью, которые являются альтернативой гранулированному адсорбенту. Однако, новые адсорбционные материалы имеют повышенные требования к системам предварительной очистки от капельной влаги, масла и пыли, а также являются дорогостоящими по сравнению с гранулированными адсорбентами.



а



б



в

Рисунок 2. Виды адсорбционных материалов: а – трубчатый адсорбент, б – листовой адсорбент, в – керамический блок

Также отмечено, что применение полимерной матрицы и адсорбентов-наполнителей позволяет получить композитные адсорбционные материалы (КАМ) с управляемыми геометрическими формами, которые не уступают по своим свойствам исходным адсорбентам, при этом обладающие высокой прочностью, обусловленной большим количеством контактов между частицами адсорбента и матрицы на единицу объема. А процесс получения моноблоков с полимерной матрицей на основе латекса, можно свести к максимально упрощенной технологической цепочке, что позволяет

рассматривать использование КАМ в задачах осушки сжатого воздуха на транспорте.

Рассмотрены вопросы исследования адсорбционных и кинетических характеристик адсорбентов и процессов осушки газов, экспериментального определения температуры точки росы и гидравлического сопротивления слоя адсорбента.

В выводах первой главы на основании проведенного литературного обзора подтверждена актуальность цели и сформулированы основные задачи исследования.

Во второй главе разработаны и описаны методики формирования внутренней структуры и получение композитных адсорбционных материалов (КАМ) для транспортных УОСВ с гибкостью установки и расположением, для применения в системах обеспечения требуемой температуры точки росы сжатого воздуха.

В разделе 2.1 описаны характеристики исходных материалов и обоснование выбора комбинации адсорбент/связующее вещество, также описано используемое оборудование.

В разделе 2.2 представлены методики формирования внутренней структуры КАМ на основе активного оксида алюминия и полимерного связующего вещества, предложенные для использования в транспортных УОСВ.

По представленным методикам были получены образцы КАМ из активного оксида алюминия для УОСВ с различными вариациями (соотношение адсорбента-наполнителя и связующего вещества-матрицы, давление формования, времени формования). Изготовленный образец КАМ из активного оксида алюминия и разработанная пресс-форма представлен на Рисунке 3.



а



б

Рисунок 3. Образец КАМ из активного оксида алюминия: а – образец КАМ из АОА, б – пресс-форма

Анализ образцов КАМ, полученных согласно предложенным методикам формирования внутренней структуры, с высокой долей получения образцов КАМ без дефектов (не менее 95%), позволяет сделать вывод,

что использование микросфер из активного оксида алюминия в качестве адсорбента-наполнителя позволяет сократить время изготовления КАМ на 82% по сравнению с использованием адсорбента-наполнителя с размером частиц не более 1,0 мм.

Для исследования адсорбционных и кинетических характеристик, на основании граничных условий, выбраны образцы КАМ (10 вариантов), полученных из микросфер с вариациями связующего вещества (от 5 % до 25 % от массы адсорбента), при давлении формования до 200 кгс/см². Также выбран образец, полученный из адсорбента-наполнителя с размером частиц не более 1,0 мм, исходный адсорбент-наполнитель АОА-2, серийно выпускаемый трубчатый адсорбент ТА-1.

В третьей главе описаны методы и проведены исследования адсорбентов и приведены результаты исследования адсорбционных характеристик, кинетических и физико-химических характеристик.

Установлены взаимосвязи между параметрами формирования внутренней структуры КАМ, такими как соотношение адсорбента и связующего вещества и давление формования, и их характеристиками (плотность упаковки, адсорбционная емкость, структура поверхности).

Определено, что при формировании КАМ происходит увеличение плотности упаковки образцов КАМ до 29 % относительно насыпной плотности гранулированного адсорбента.

В разделе 3.1 представлен анализ состояния поверхности адсорбентов. При использовании электронного микроскопа Phenom Pro X с интегрированной системой энергодисперсионного анализа, с максимальным увеличением 150000х и разрешением 8 нм, были получены оптические изображения поверхности адсорбционных материалов, представленные на Рисунке 4. Видно, что полимерное связующее вещество КАМ (образцы 5 и 6) ввиду малого размера частиц, не блокирует поверхность адсорбента, а имеет точечный контакт с поверхностью адсорбента, где, выступая в качестве матрицы, фиксирует гранулы адсорбента.

В разделе 3.2 эксикаторным методом получены экспериментальные данные и построены экспериментальные изотермы адсорбции паров воды на разных адсорбентах и образцах КАМ, исследованы адсорбционные характеристики адсорбентов.

Сорбционная активность (a , г/100г) была определена по формуле:

$$a = \frac{m_2 - m_1}{m_1 - m} \cdot 100, \quad (1)$$

где m – масса пустого бюкса, г; m_1 – масса бюкса с активной навеской, г; m_2 – масса бюкса с влажной навеской после установления равновесия при определенном p/p_s , г; 100 – переводной коэффициент.

Проведена линейная аппроксимация полученных экспериментальных данных изотерм адсорбции основными уравнениями теорий адсорбции БЭТ, Арановича, Лэнгмюра, Дубинина-Астахова, Арановича-Донохью с получением основных параметров: адсорбционных характеристик, констант и коэффициентов линейной корреляции для каждой функции.

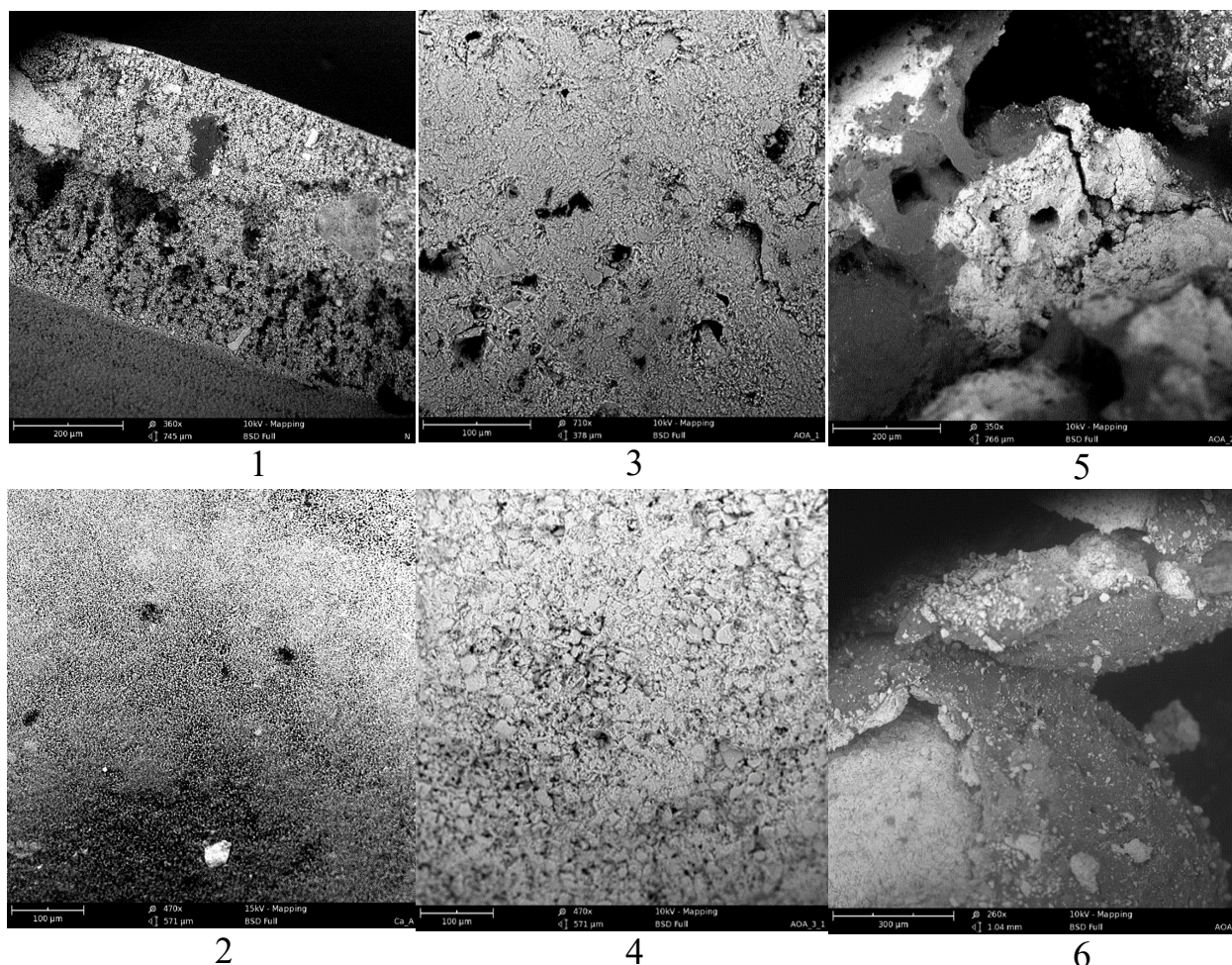


Рисунок 4. Оптические изображения поверхности адсорбционных материалов: 1 – трубчатый адсорбент ТА-1 (увеличение 360х), 2 – СаА (увеличение 470х), 3 – АОА-1 (увеличение 710х), 4 – АОА-1, фракция 1мм (увеличение 470х), 5 – МА-1 (увеличение 350х), 6 – МА-9 (увеличение 260х)

Установлено, что при значениях относительной влажности от 4,5 % до 60 % и при температуре проведения эксперимента плюс $(20 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$, модели адсорбции Арановича и Лэнгмюра наилучшим образом описывают экспериментальные результаты на образцах КАМ на основе активного оксида алюминия. При значениях относительной влажности от 60 до 100 % только модель адсорбции Арановича-Донохью, совместно с моделью адсорбции Лэнгмюра повторяет форму экспериментальной изотермы, и данная модель рассматривалась в качестве основной, применительно к композитным адсорбционным материалам на основе АОА:

$$a(p) = \frac{a_m \cdot b \cdot p}{(1 + b \cdot p) \cdot (1 - p/p_s)^d} \quad (2)$$

где p – равновесное давление, Па, p_s – давления насыщенного пара адсорбтива при данной температуре, Па, a_m – предельная величина адсорбции г/100 г, b – константа уравнения Лэнгмюра.

В разделе 3.3 получены экспериментальные данные и построены кинетические кривые адсорбции паров воды на разных адсорбентах и образцах КАМ, исследованы кинетические характеристики адсорбентов. Проведение аппроксимации экспериментальных данных функцией Глюкауфа,

уравнениями для полидисперсных систем и Рогинского-Зельдовича показало, что для образцов на основе активного оксида алюминия допустимо использование уравнений для полидисперсных систем и функция Глюкауфа.

В разделе 3.4 представлены результаты исследования физико-химических характеристик адсорбционных материалов. Определена удельная поверхность адсорбентов на основе анализа полученных экспериментальных данных изотерм адсорбции паров воды исследуемыми адсорбентами. Установлено, что увеличение величины давления формирования в 2 раза при сопоставимом количестве связующего вещества, приводит к увеличению величины адсорбционной емкости и удельной поверхности образцов на 10 %, однако, адсорбционные и кинетические характеристики КАМ снижаются на 6 и 11 % соответственно, относительно характеристик исходных адсорбентов. Также определен объем мезопор и средний диаметр пор адсорбентов. Экспериментально установлено, что КАМ является мезопористым материалом со средним диаметром пор 2 нм, где в мезопорах, при высоких относительных давлениях, фазовый переход происходит по механизму капиллярной конденсации.

В разделе 3.5 представлен выбор наиболее эффективного образца КАМ (Рисунок 5). Композитный адсорбционный материал МА-9 на основе адсорбента АОА-2 является наиболее эффективным образцом КАМ и выбран для проведения дальнейших экспериментальных исследований процессов осушки сжатого воздуха транспортных УОСВ, за счет большего значения величины плотности упаковки, выше насыпной плотности АОА-2 на 17 %.

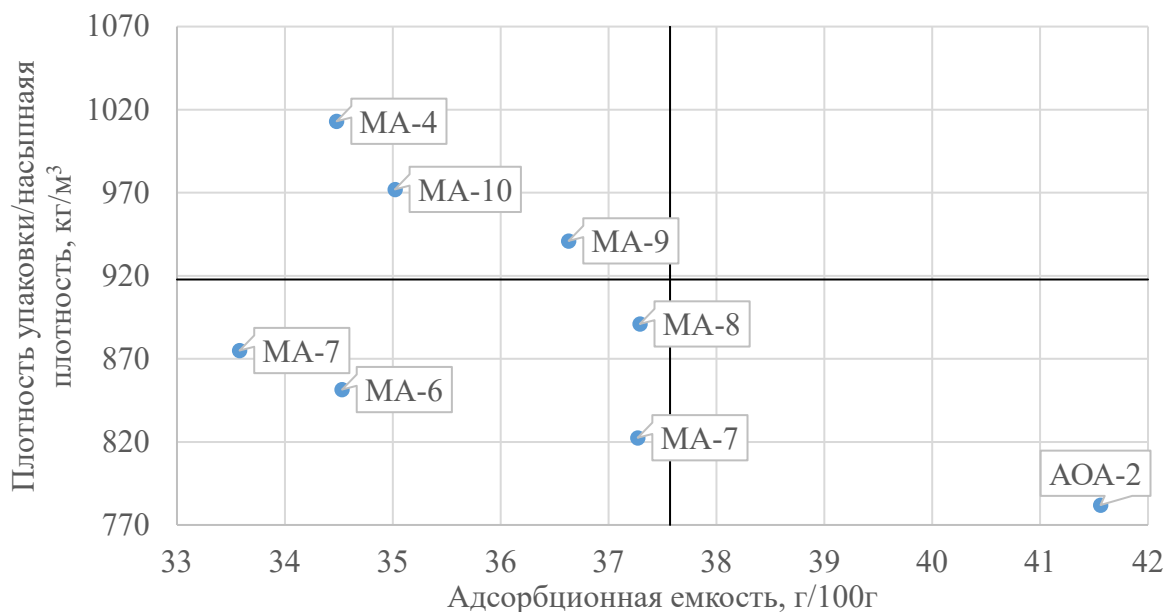


Рисунок 5. Выбор наиболее эффективного образца КАМ для транспортных УОСВ

Экспериментальные и рассчитанные данные по моделям адсорбции БЭТ, Лэнгмюра, Арановича, Арановича-Донохью и Дубинина-Астахова для образцов КАМ МА-9 и АОА-2 представлены на Рисунке 6. Определены погрешности экспериментальных исследований адсорбционных и

кинетических характеристик.

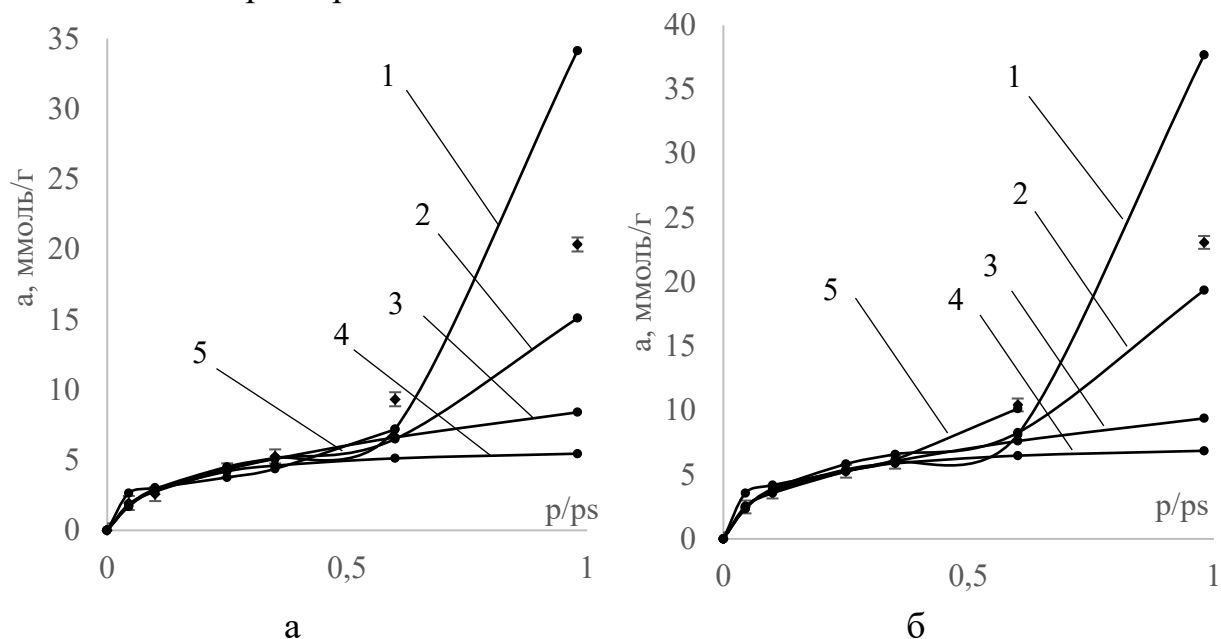


Рисунок 6. Экспериментальные данные (♦ - ♦) и рассчитанные по моделям адсорбции изотермы: 1 – Арановича, 2 – Арановича-Донохью, 3 – Лэнгмюра, 4 – Дубинина-Астахова, 5 – БЭТ для образцов КАМ МА-9 (а) и АОА-2 (б)

В четвертой главе в разделе 4.1 представлен разработанный экспериментальный стенд (принципиальная схема представлена на Рисунке 7) с горизонтально расположенными адсорберами для исследования процессов осушки сжатого воздуха транспортных УОСВ с КАМ и система автоматики, для определения значений температуры точки росы и гидравлического сопротивления слоя выбранных адсорбентов и КАМ в диапазоне работы до давления 1,0 МПа при производительности до 1,0 м³/мин, и возможностью регулирования влажности (до 100 %) и температуры газа (до 70 °С) на входе в УОСВ (Рисунок 8). Определены погрешности экспериментальных исследований процесса осушки сжатого воздуха.

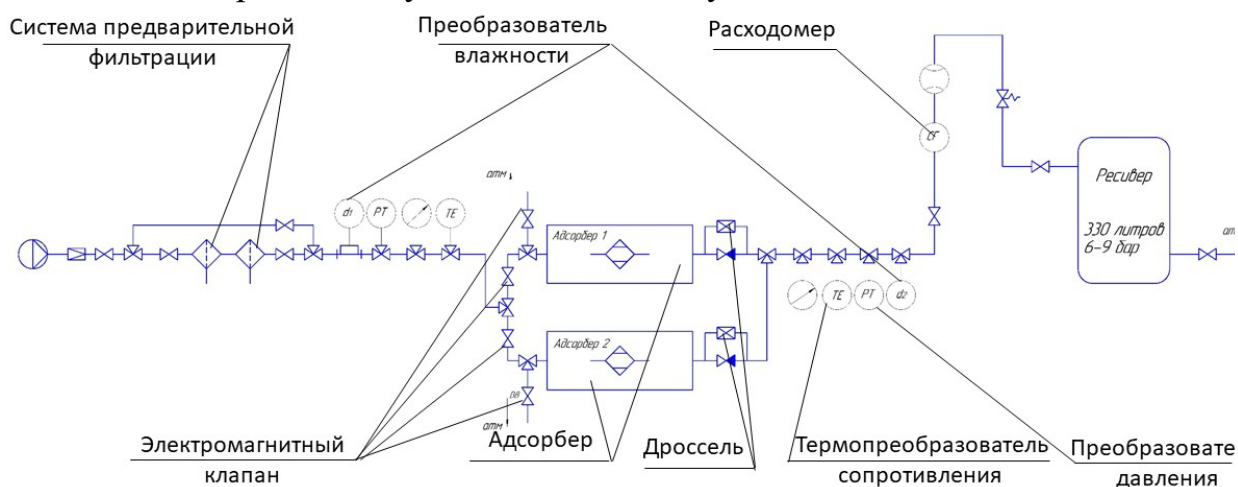


Рисунок 7. Принципиальная схема экспериментального стенда для исследования процессов осушки сжатого воздуха транспортных УОСВ

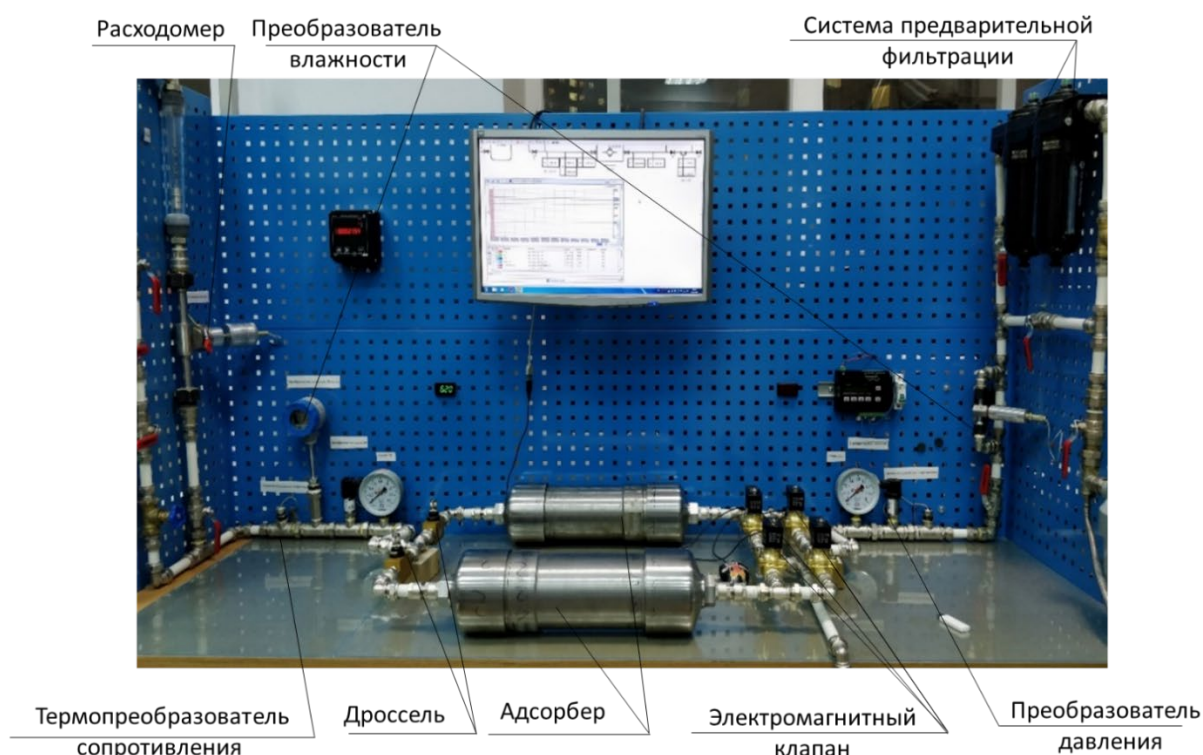


Рисунок 8. Общий вид экспериментального стенда для исследования процессов осушки сжатого воздуха транспортных УОСВ

В разделе 4.2 представлены результаты исследований процессов осушки сжатого воздуха выбранных по итогам исследований адсорбционных и кинетических характеристик адсорбционных материалов (КАМ МА-9, ТА-1 и АОА-2) на экспериментальном стенде (Таблица 1). Определены значения температуры точки росы и гидравлического сопротивления слоя выбранных адсорбентов и КАМ.

Таблица 1.

Результаты исследования процессов осушки сжатого воздуха

№	Образец	Температура окружающей среды, °С	Температура точки росы, °С	Падение температуры точки росы, °С	Требования ГОСТ 10393-2014	ΔP, МПа
1	АОА-2	25 ±0,19	-1±0,2	26±0,39	На 20°С ниже температуры окружающей среды	0,05±0,008
2	КАМ МА-9	25 ±0,19	-14±0,2	39±0,39		0,045±0,008
3	ТА-1	26 ±0,19	-14±0,2	40±0,39		0,044±0,008

Определено, что при горизонтальном расположении адсорберов, образцы КАМ МА-9 (Рисунок 8) соответствуют требованиям, предъявляемым к транспортным УОСВ подвижного состава, с понижением температуры точки росы на 39°С, в абсолютном значении – минус 14 °С.

Результаты исследований показали, что характеристики разработанных КАМ превосходят характеристики гранулированных адсорбентов и не

уступают техническим характеристикам серийно выпускаемых адсорбентам разной геометрической формы (ТА-1) (Рисунок 9).

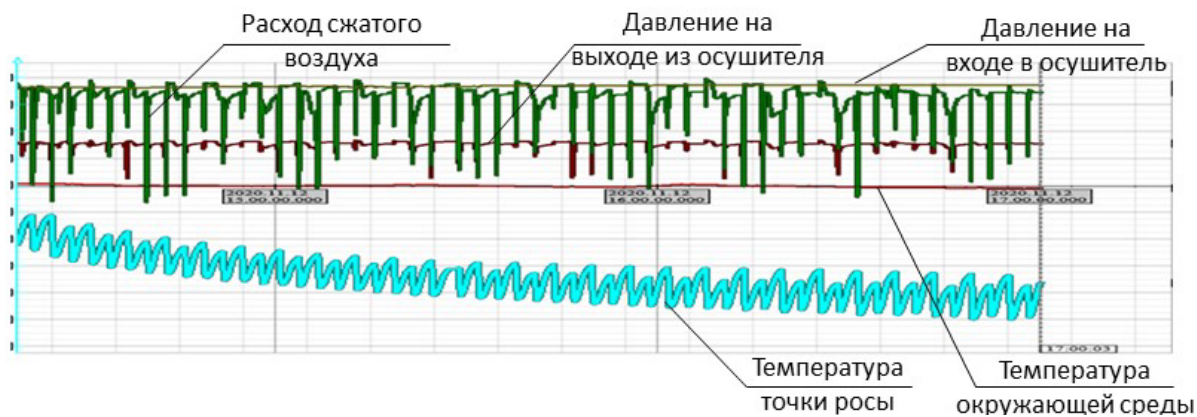


Рисунок 8. Циклограмма работы двухадсорберной установки с КАМ МА-9 на экспериментальном стенде

Определена зависимость значения температуры точки росы сжатого воздуха от величины расхода воздуха на регенерацию адсорбента. Исследования показали, что снижение расхода воздуха на регенерацию адсорбента с 20 % до 15 %, приводит к уменьшению значения понижения температуры точки росы относительно температуры окружающей среды на 10 %, а снижение расхода воздуха с 20 % до 10 % – на 40 %.

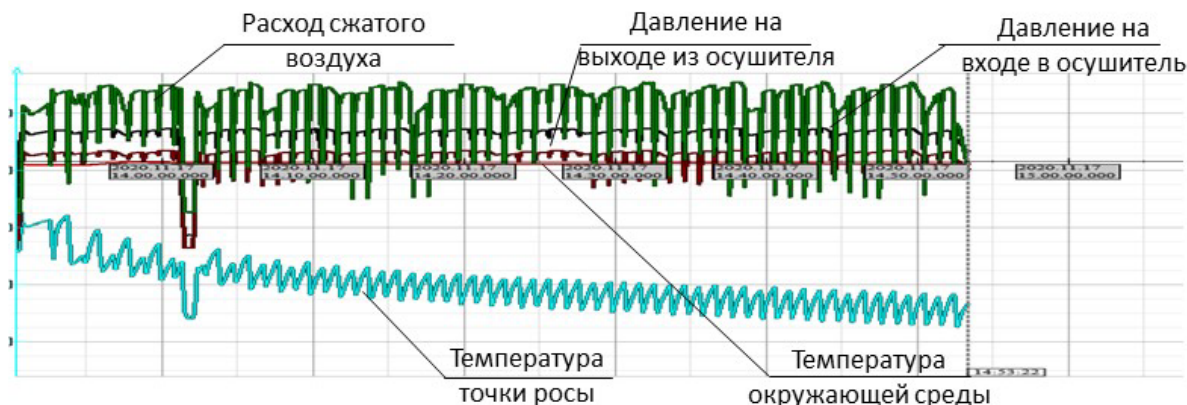


Рисунок 9. Циклограмма работы двухадсорберной установки с адсорбентом ТА-1 на экспериментальном стенде

В разделе 4.3 определено наличие частиц и концентрация дисперсных частиц и аэрозолей на выходе из УОСВ с КАМ МА-9. По результатам замеров весовым методом определено, что концентрация пыли и размеры частиц не превосходят допустимые по ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014 значения.

В разделе 4.4 представлены результаты вибрационных и климатических испытаний при температуре окружающей среды от минус 50 °С до плюс 65 °С включительно, выбранного образца КАМ МА-9 в составе транспортной УОСВ, определены значения температуры точки росы сжатого воздуха и гидравлического сопротивления КАМ МА-9 для транспортной УОСВ на специализированном стенде АО «ВНИКТИ» (г. Коломна), производительностью УОСВ 0,618 м³/мин при среднем рабочем давлении

0,725 МПа и потоке воздуха на регенерацию составляющим 20% с получением протокола приемочных испытаний. Представлены результаты исследования работы УОСВ в двух режимах с достижением понижения температуры точки росы до 30 °С при ПВ 100 % и ПТТР до 39 °С при ПВ 50 %, где ПВ – средняя продолжительность включения компрессора. Суммарное сопротивление всех ступеней БОСВ составило 0,03 МПа.

В разделе 4.5 описан разработанный и изготовленный опытный образец транспортной УОСВ с горизонтальным расположением адсорберов с КАМ (Рисунок 10). Представлены результаты вибрационных испытаний опытного образца УОСВ с КАМ, согласно ГОСТ 30631-99, получен протокол предварительных испытаний КАМ в составе УОСВ для систем обеспечения требуемой температуры точки росы сжатого воздуха на транспорте.

Пятая глава посвящена выработке практических рекомендации по созданию композитных адсорбционных материалов в зависимости от требований к обеспечению температуры точки росы для различных задач осушки газов.

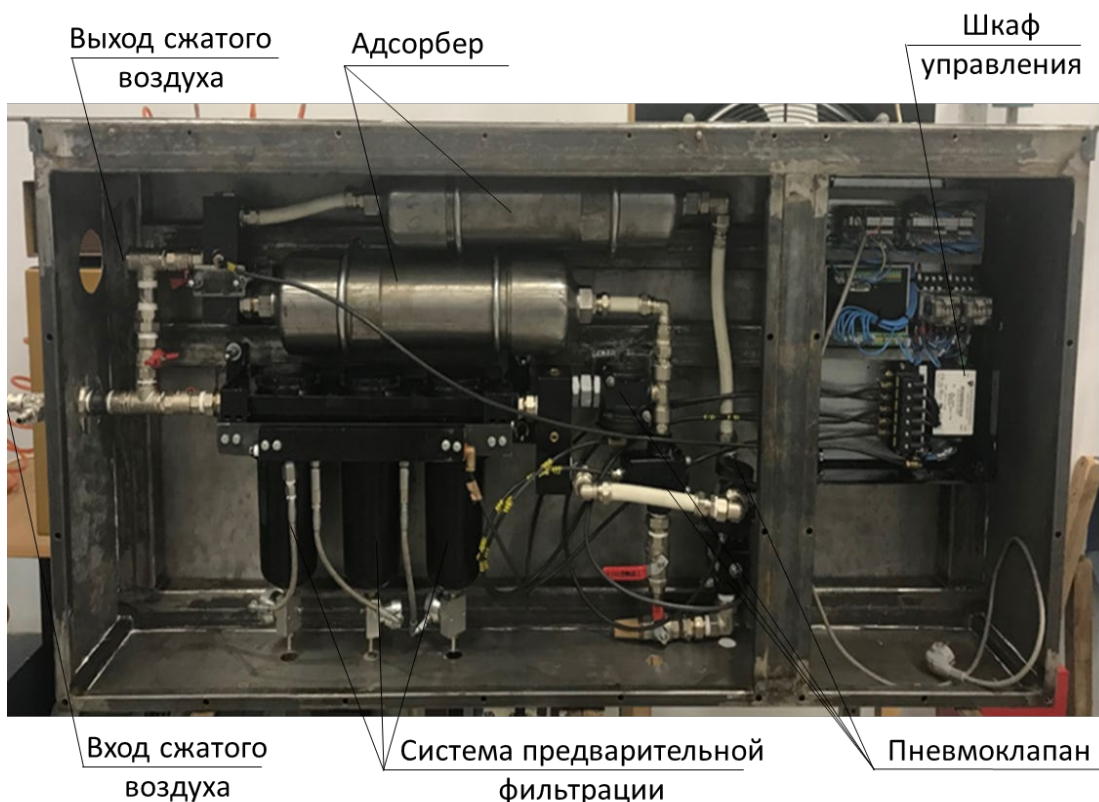


Рисунок 10. Опытный образец транспортной УОСВ с КАМ

Представлены данные определения стоимости жизненного цикла (СЖЦ) имеющихся систем осушки и транспортной УОСВ с КАМ. Разработанная установка с КАМ МА-9 имеет предполагаемую СЖЦ ниже на 22 %, чем СЖЦ устройств производителя ООО «Кнорр Бремзе» и, следовательно, более эффективны чем имеющиеся аналоги за счет меньшей стоимости изготовления КАМ, приобретения комплектующих и меньших затрат на энергетическое обеспечение процессов осушки за счет уменьшения расхода газа на регенерацию адсорбента с 20 % до 15 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработана методика формирования внутренней структуры образцов КАМ транспортных установок, выполняющая требования нормативных документов и стандартов ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014 в широком температурном диапазоне эксплуатации оборудования (от минус 50 до плюс 65 °С), соответствующая условиям эксплуатации транспортных средств и гибкости установки за счет увеличения плотности упаковки КАМ, превышающей насыпную плотность гранулированных адсорбентов до 29 %.

2. Создан экспериментальный стенд, разработана методика исследования и проведены исследования адсорбционных и кинетических характеристик выбранных адсорбентов и КАМ с выбором наиболее эффективного образца КАМ для транспортных установок. Погрешность экспериментальных исследований составила 17 %. Проведена линейная аппроксимация экспериментальных изотерм адсорбции основными уравнениями теорий адсорбции и экспериментальных кинетических кривых с получением основных параметров: адсорбционных коэффициентов, констант скорости и коэффициентов линейной корреляции для каждой функции.

3. Создан экспериментальный стенд, разработана методика исследования и проведены исследования процесса осушки сжатого воздуха транспортных установок. Исследования показали, что для выбранного образца КАМ МА-9, значение понижения температуры точки росы – 39 °С, величина гидравлического сопротивления слоя КАМ – 0,045 МПа при горизонтальном расположении адсорберов. Определена зависимость влияния значения температуры точки росы от расхода воздуха на регенерацию адсорбента. Погрешность экспериментальных исследований составила 18 %.

4. Проведены вибрационные и климатические испытания выбранного образца КАМ для транспортных установок. Определены значения температуры точки росы и гидравлического сопротивления КАМ после испытания, получен протокол приемочных испытаний, подтверждающий требования нормативных документов и стандартов ГОСТ 32202-2013 и ГОСТ 10393-2014.

5. Разработан и изготовлен опытный образец транспортной установки с КАМ и с горизонтальным расположением адсорберов и проведены его вибрационные испытания, получен протокол предварительных испытаний транспортной установки с КАМ.

6. На основании проведенных исследований сформированы практические рекомендации по использованию КАМ в задачах осушки. Определена стоимость жизненного цикла транспортных установок.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Обзор методов очистки и осушки сжатого воздуха / А.А. Подчуфаров [и др.] // Холодильная техника. 2020. №. 4. С. 26-31. (0,75 п.л./0,38 п.л.)

2. Experimental Study of the Possibility of Using Composite Adsorption Materials for Compressed Air Dehumidification Plants / A.A. Podchufarov [et al] // Chemical and Petroleum Engineering. 2020. Т. 56. №. 3. С. 310-316. DOI: 10.1007/s10556-020-00774-z. (0,88 п.л./0,44 п.л.)
3. A Study of Methane Storage Characteristics of Compacted Adsorbent AU-1 / A.A. Podchufarov [et al] // Chemical and Petroleum Engineering. 2017. Т. 52. №. 11-12. С. 838-845. DOI: 10.1007/s10556-017-0280-3. (1,00 п.л./0,13 п.л.)
4. Podchufarov A.A., Kozlov V.V., Shadrin V.S. Express analysis of technological processes of compression and drying of wet air at the stages of design and operation of compressor stations // AIP Conference Proceedings. 2019. Т. 2141, №1. С. 030029. DOI: 10.1063/1.5122079. (1,38 п.л./0,46 п.л.)
5. Подчуфаров А. А., Спирина А. Н. Выбор метода исследования изотерм адсорбции паров воды адсорбционными материалами для инженерных задач // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. Москва. 2019. С. 577-579. (1,38 п.л./0,46 п.л.)
6. Подчуфаров А. А. Анализ методов осушения сжатого воздуха // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. Москва. 2018. С. 440-442. (0,38 п.л./0,38 п.л.)
7. Подчуфаров А. А. Осушение сжатого воздуха в пневматических системах транспортных средств // Актуальные проблемы эксплуатации автотранспортных средств: материалы XX Международной научно-практической конф. Владимир. 2018. С. 190-192. (0,38 п.л./0,19 п.л.)
8. Подчуфаров А.А., Козлов В.В., Шадрин В.С. Современные тенденции развития техники осушения сжатого воздуха в компрессорных станциях промышленных предприятий // XVII международная научно-техническая конф. по компрессорной технике. Казань. 2017. С. 334-335. (0,5 п.л./0,17 п.л.)
9. Перспективы применения короткоцикловых безнагревательных адсорбционных осушителей сжатого воздуха на транспорте / А.А. Подчуфаров [и др.] // Будущее машиностроения России: сб. тр. Всерос. конф. Москва. 2016. С. 450-452. (0,38 п.л./0,10 п.л.)
10. Козлов В. В., Шадрин В. С., Подчуфаров А. А. Экспресс-анализ технологических процессов компримирования и осушения влажного воздуха на этапах проектирования и эксплуатации компрессорных станций // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Омск. 2019. С. 131-132. (0,25 п.л./0,1 п.л.)
11. Исследование свойств адсорбционных материалов для установок осушения сжатого воздуха / А.А. Подчуфаров [и др.] // Холодильная и криогенная техника, системы кондиционирования и жизнеобеспечения: материалы Третьей международной научно-практической конф. Москва. 2020. С. 334-335. (0,25 п.л./0,15 п.л.)