



004615442

Редин Андрей Логинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОСУШКИ
СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ
ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

- 2 ДЕК 2010

Москва 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет путей сообщения» (МИИТ) на кафедре «Тяговый подвижной состав»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Шаров Виталий Дмитриевич (МИИТ)

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Анисимов Петр Степанович (МИИТ)

кандидат технических наук,
**Риполь-Сарагоси Леонид Францискович
(РГУПС)**

Ведущая организация **Брянский государственный технический университет (БГТУ)**

Защита состоится « 8 » декабря 2010 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д218.005.01 в Московском государственном университете путей сообщения (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9 стр.9, ауд. 2505.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета путей сообщения.

Автореферат разослан « 8 » ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук,
доцент



А. В. Саврухин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из основных факторов, обеспечивающих надежность подвижного состава и безопасность движения на железнодорожном транспорте, является безотказная работа его пневматического оборудования и тормозов. Во многом это зависит от качества сжатого воздуха.

Низкое качество сжатого воздуха на подвижном составе железных дорог имеет ряд отрицательных последствий: сужение из-за обледенения в зимний период проходных сечений в напорной и тормозной магистралях поезда, что повышает вероятность обрыва автосцепок; замерзание и загрязнение дроссельных отверстий воздухораспределителей, приводящие к неотпуску тормозов отдельных вагонов, образованию ползунов и наваров; повышение трудоемкости плановых ремонтов, сокращение межремонтных сроков эксплуатации узлов пневмоавтоматики подвижного состава.

Низкое качество сжатого воздуха является сдерживающим фактором создания и применения новых узлов и приборов пневмоавтоматики и тормозов.

Поэтому на тяговом подвижном составе ведущих стран Евросоюза, США и Японии широко применяются средства глубокой осушки и очистки сжатого воздуха – короткоцикловые адсорбционные устройства осушки сжатого воздуха (КАУОСВ). Использование тормозного оборудования без таких устройств в ряде стран и эксплуатирующих компаний запрещено.

В России КАУОСВ серийно устанавливаются только на тепловозах ТЭП70, ТЭМ7А и некоторых путевых машинах, при этом качество сжатого воздуха по наличию паробразной воды на выходе из этих устройств ниже требований стандартов Евросоюза, например стандарта NF F 11-100 «Railway rolling stock – Quality of compressed air for pneumatic apparatus and circuits».

Важным стратегическим направлением научно-технического развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. является создание новых образцов железнодорожной техники с минимизацией эксплуатационных затрат и расчетом показателей стоимости их жизненного цикла.

Решение этой задачи в части совершенствования локомотивных устройств осушки сжатого воздуха (УОСВ) возможно после разработки нормативов качества сжатого воздуха пневматических систем железнодорожного подвижного состава, проведения комплекса теоретических и экспериментальных исследований работы компрессорной установки с КАУОСВ. Технические возможности российской промышленности позволяют производить устройства, не уступающие лучшим мировым образцам, серийно и минимизировать стоимость их жизненного цикла. Таким образом, проведение вышеуказанных работ является актуальным и необходимым для российских железных дорог.

Цели и задачи исследования. Целями настоящей диссертационной работы являются: разработка нормативов качества сжатого воздуха, совершенствование УОСВ для пневматических систем подвижного состава железных дорог, проведение необходимых теоретических и экспериментальных исследований для оснащения подвижного состава российских железных дорог средствами глубокой осушки и очистки сжатого воздуха, не уступающими лучшим мировым образцам.

В соответствии с вышеизложенными целями решались следующие задачи

- разработка математической модели работы компрессорной установки КАУОСВ, позволяющей рассчитать основные технические характеристики работы компрессорного оборудования на подвижном составе, определить влияние воздействия и расчетные характеристики, на которых основываются функциональные ограничения и критерии качества;

- определение показателей качества сжатого воздуха, необходимых для пневматических систем железнодорожного подвижного состава;

- разработка КАУОСВ для пневматических и тормозных систем подвижного состава железных дорог, по своим техническим характеристикам соответствующих современным требованиям, и проведение их испытаний;

- определение стоимости жизненного цикла различных КАУОСВ.

Методы исследования. Методологической основой работы являются законы и уравнения термодинамики, газовой динамики, динамики пневматических систем машин, методы расчета циклической адсорбционной техники свойств насыпных слоев. При проведении испытаний применялись стандартные методы испытаний компрессоров, определения качества сжатого воздуха, также типовые и рабочие методики испытаний Испытательного центра подвижного состава и ОАО «ВНИКТИ».

Достоверность полученных результатов подтверждается:

- результатами проведенных стендовых (в том числе климатических) и эксплуатационных испытаний созданных УОСВ;

- сопоставлением характеристик работы компрессорного оборудования КАУОСВ, полученных в результате испытаний и рассчитанных по математической модели.

Научная новизна результатов работы заключается в следующем:

- разработана математическая модель работы компрессорной установки КАУОСВ, включающая в себя математическую модель системы «компрессорная установка – средства очистки и осушки сжатого воздуха – главные резервуары – локомотив – поезд», «математическую модель неподвижного зернистого слоя адсорбентов» и «математическую модель адсорбции при короткоцикловой осушке сжатого воздуха»;

- разработаны, обоснованы и приняты в новых межгосударственных и национальных стандартах показатели качества сжатого воздуха, необходимые для пневматических систем железнодорожного подвижного состава;

- запатентованы и созданы КАУОСВ для пневматических и тормозных систем подвижного состава железных дорог, по своим техническим характеристикам обеспечивающие надлежащее качество сжатого воздуха и не уступающим лучшим мировым образцам;

- запатентованы и созданы средства непрерывного контроля и измерений температуры точки росы сжатого воздуха;

- определена стоимость жизненного цикла различных КАУОСВ.

Новизна ряда технических решений защищена на уровне патентов.

Практическая значимость. Результаты работы имеют практическое значение и внедрены на железнодорожном транспорте.

Показатели качества сжатого воздуха пневматических систем тягового подвижного состава железных дорог, определенные в настоящей работе, отражены в межгосударственном стандарте «Компрессоры и агрегаты компрессорные для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия» (ГОСТ 10393-2009) и в разрабатываемых в настоящее время стандартах «Воздух сжатый пневматических систем подвижного состава железнодорожного транспорта. Требования к качеству» и «Тепловозы магистральные. Общие технические требования».

Математическая модель использовалась при проектировании пневмосистем новых локомотивов (газотурбовоз ГТ1; тепловозы 2ТЭ70, 2ТЭ25К, 2ТЭ25А, тепловоз ЧМЭЗ-4342 с двухдизельной силовой установкой, электровозы ВЛ40П, ЭП2К) и УОСВ.

Созданные средства непрерывного контроля и измерения температуры точки росы сжатого воздуха сертифицированы и используются при всех видах испытаний систем осушки сжатого воздуха, в том числе по договорам с ОАО «Транспневматика», ОАО «Коломенский завод» и рядом других предприятий, по поручениям ЦТ и ЦТех ОАО «РЖД», ассоциации «АСТО».

По разработкам автора изготовлено несколько тысяч УОСВ для трамваев и троллейбусов. УОСВ по патенту ВНИКТИ оборудованы десятью автоматрис АЧ2 в депо Брянск-1, а также созданы и испытаны УОСВ для газотурбовоза ГТ1. Создана, испытана и принята Межведомственной комиссией двухадсорбционная система подготовки сжатого воздуха СПВ 4,5/1 производства ОАО «Транспневматика», которая в настоящее время устанавливается на все тепловозы 2ТЭ25К и 2ТЭ25А. По договору с ОАО «Коломенский завод» совершенствуется адсорбционная система осушки тепловоза ТЭП70БС и электровоза ЭП2К.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались на IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава» – г. Новочеркасск, 2003 г.; конференции «Состояние и перспективы развития наземного городского электрического транспорта» – г. Санкт-Петербург, 2006 г.; на LXVI Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» – г. Днепропетровск (Украина), 2006 г.; на Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию ВНИКТИ «Современные тенденции развития подвижного состава железных дорог» – Коломна, 2006 г.; на комиссии ОАО «РЖД» по тормозному оборудованию для железнодорожного подвижного состава в г. Первомайске Нижегородской области в 2008 г.; на XI Научно-Практической конференции "Безопасность движения поездов" г. Москва, 2010 г.; на заседаниях кафедр «Тяговый подвижной состав» и «Вагоны и вагонное хозяйство» Московского государственного университета путей сообщения.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, в том числе в журнале «Железнодорожный транспорт» и 2 патента на изобретения. Материалы по теме диссертационной работы использованы в ряде отчетов по научно-исследовательским работам.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложений. Диссертация изложена на 218 страницах основного текста (4 таблицы, 65 рисунков) и на 31 странице приложений. Список использованных источников содержит 223 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, сформулированы цели и задачи исследования, показана значимость задачи разработки нормативов качества сжатого воздуха для пневматических систем железнодорожного подвижного состава и совершенствования УОСВ.

В первой главе проведен анализ методов очистки и осушки сжатого воздуха. Исследования в области создания средств осушки сжатого воздуха подвижного состава железных дорог, предотвращения замерзаний конденсата и влияния качества сжатого воздуха на надежность работы тормозного и пневматического оборудования отражены в работах ряда ученых: А. Н. Балалаев, Л.В. Блон, Д. А. Больнов, В.А. Браташ, И.Я. Виноходов, В.И. Водяник, Ю.Н. Голвач, В.Г. Иноземцев, В.М. Казаринов, Д.Э. Карминский, В.Г. Козубенко, В.И. Копшаков, В.В. Крылов, В.О. Кубил, В.Д. Кузьмич, Л.Ф. Риполь-Сарагос, Т.Л. Риполь-Сарагоси, В.П. Рязанкин, И.В. Скогорев, В.А. Смородин, Г.М. Филькельштейн, А.А. Шарунин, К.Д. Шевченко, С.В. Шелухин, В.Ф. Танаев другие. Большой вклад в описание физических процессов короткоцикловой адсорбции внесли ученые: Б.И. Беккер, В.И. Ермаков, В.И. Иванов, В.Н. Кельце Л.А. Коваленко, И.Д. Крылов, В.В. Нагаев, Ю.А. Серегин, Н.С. Торочешнико Ю.И. Шумацкий и другие.

Сделан обзор нормативной базы по показателям качества сжатого воздуха и обоснованы нормы необходимой очистки и осушки сжатого воздуха для подвижного состава железных дорог. В стандартах при глубокой осушке сжатого воздуха обычно задается температура точки росы (ТТР) сжатого воздуха, т.е. температура начала конденсации водяного пара при заданном давлении воздуха. Рассчитана ТТР, при которой наступает образование ржавчины и замерзание калиброванных отверстий воздухораспределителей. Ограничения по расчетам ТТР даны на рис. 1,

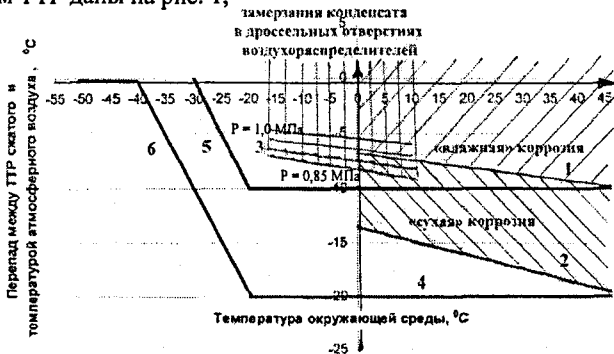


Рис. 1 Зависимость необходимого перепада между ТТР сжатого и температурой атмосферного воздуха от температуры окружающей среды: 1 – ограничение по влажной коррозии ($\text{Fe}(\text{OH})_2$); 2 – ограничение по сухой коррозии; 3 – ограничения по вероятности образования ледяных пробок в калиброванных отверстиях воздухораспределителей (последовательно сверху вниз при давлении в главных резервуарах локомотива от 1,0 до 0,85 МПа); 4 – ограничения по французскому стандарту NF F 11-10 5 – ограничения по ГОСТ 10393-2009; 4, 6 – ограничения по проекту национального стандарта Российской Федерации «Воздух сжатый пневматических систем подвижного состава железнодорожного транспорта. Требования к качеству»

а сравнительные характеристики показателей качества сжатого воздуха железнодорожного подвижного состава в таблице 1.

Таблица 1

Значения показателей необходимого качества сжатого воздуха после УОСВ для подвижного состава железных дорог России и Евросоюза

Наименование параметра	Значение		
	по стандарту Франции NF F 11-100 «Подвижной состав железных дорог. Качество сжатого воздуха ...»	по ГОСТ 10393-2009 «Компрессоры и агрегаты компрессорные для железнодорожного подвижного состава. Общие технические условия»	по первой редакции стандарта «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству»
Количество загрязняющих веществ в сжатом воздухе на выходе из УОСВ, мг/м ³ , не более:			
- твердых частиц	8	4	2
- масла	5	10	5
- воды в жидком состоянии	не допускается	не допускается	не допускается
- размер твердой частицы, мкм, не более	15	25	10
Температура точки росы осушенного сжатого воздуха в питательной магистрали подвижного состава на выходе из УОСВ	на 20°С ниже температуры окружающей среды при давлении 9 бар	не менее чем на 10°С ниже температуры атмосферного воздуха при изменении его температуры в диапазоне от минус 25 до плюс 45°С; не выше минус 30°С в диапазоне температур атмосферного воздуха от минус 25 до минус 50°С	ниже минус 40°С: температура атмосферного воздуха; от минус 40°С до минус 20°С включительно: минус 40°С; выше минус 20°С: на 20°С ниже температуры атмосферного воздуха

На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что обеспечение современных нормативных требований к качеству сжатого воздуха пневматических систем подвижного состава возможно при применении адсорбционного короткоциклового метода осушки, широко применяемого ведущими странами Евросоюза, США и Японии. Решению этой задачи способствовала разработка математических моделей, позволяющих рассчитывать основные характеристики работы компрессорного оборудования и прогнозировать характеристики УОСВ.

Вторая глава посвящена разработке математической модели работы компрессорной установки с УОСВ. Для моделирования процессов, происходящих в этой сложной системе, использован известный метод, заключающийся в том, что сложную систему заменяют несколькими более простыми, каждая из которых может быть исследована с помощью математической модели. Для этой цели предложены три математических модели, параметры которых взаимосвязаны. Первая термодинамическая модель: «компрессорная установка – средства очистки и осушки сжатого воздуха – главные резервуары – локомотив – поезд» рассматривает пневматическую систему поезда, является структурной моделью и

представляет объект моделирования как систему с механизмом регулирования работы отдельных ее узлов. Такие параметры, как перепад давления на УОСЕ также количество удаляемой им влаги задаются в этой модели, а рассчитываются с помощью соответственно второй и третьей математических моделей. Вторая гидравлическая модель – «неподвижного зернистого слоя адсорбентов» рассматривает только один элемент УОСВ – насыпной слой адсорбента и только с целью расчета двух технических характеристик – площади поверхности слоя зерен перепада давления насыпного слоя. Третья модель – «адсорбции при короткой цикловой осушке сжатого воздуха» также рассматривает только один элемент УОСВ – насыпной слой адсорбента, но уже с целью определения остаточной концентрации пароводяной воды за УОСВ. В моделях учитываются внешние условия: температура, давление и влажность атмосферного воздуха.

Исходными уравнениями для первой математической модели являются уравнение материального баланса входящего $G_{вх}$ (кг/с) и выходящего $G_{вых}$ га не претерпевающего фазовых переходов в проточном объеме:

$$\frac{dm_z}{d\tau} = G_{вх} - G_{вых}, \quad (1)$$

где m_z – масса газа, находящаяся в данном объеме; τ – время.

Уравнение материального баланса для проточного объема, в котором час компонентов смеси газов может претерпевать фазовые переходы:

$$\frac{dm_z}{d\tau} + \frac{dm_{ж,т}}{d\tau} = G_{вх} - G_{вых}, \quad (2)$$

где $dm_{ж,т}$ – приращение массы жидкой или твердой фазы в объеме, происходящее вследствие конденсации или сублимации части компонентов газа.

Расчетная схема к первой математической модели дана на рис. 2.

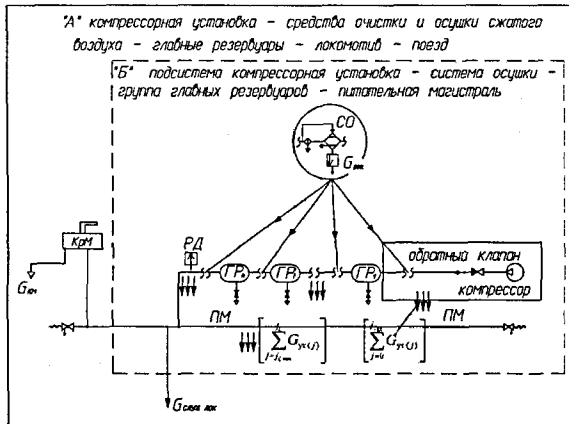


Рис. 2 Расчетная схема к математической модели «компрессорная установка – средства очистки и осушки сжатого воздуха – главные резервуары – локомотив – поезд». Условные обозначения оборудования: ГР – главные резервуары; РД – регулятор давления; КрМ – компрессор; СО – система осушки сжатого воздуха; ПМ – питательная магистраль; $G_{ж}$ – расход воздуха через кран машиниста; $G_{служ.лок}$ – расходы воздуха на служебные нужды локомотива (на подачу песка, обеспечение работы свистка, тифона и другие разовые расходы

Составлены уравнения потока массы воздуха в пневматической системе локомотива. Расчет ведется раздельно по сухому сжатому воздуху и водяному пару, с учетом того, что давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара с учётом их коэффициентов активности в смеси.

Уравнение потока массы сухого воздуха:

$$f(P) \cdot G_{\text{к сух воздух}} - \int_0^{x_{\text{вх}}} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{сух воздух}} \cdot S(x) dx - \left[\sum_{j=0}^{j_{\text{вх}}} G_{\text{ут сух воздух}(j)} \right] - \int_{x_{\text{вх}}}^{x_{\text{вых}}} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{сух воздух}} \cdot S(x) dx - f_1(P, \tau) \cdot G_{\text{рег сух воздух}} - f_2(P, \tau) \cdot G_{\text{нап сух воздух}} - \int_{x_{\text{вх}}}^L \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{сух воздух}} \cdot S(x) dx - \left[\sum_{j=J_1}^{j_2} G_{\text{ут сух воздух}(j)} \right] = G_{\text{служ лок сух воздух}} + G_{\text{км сух воздух}} \quad (3)$$

Уравнение потока массы водяного пара и конденсата:

$$f(P) \cdot G_{\text{к пар}} - \int_0^{x_{\text{вх}}} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{пар}} \cdot S(x) dx - \left[\sum_{j=0}^{j_{\text{вх}}} G_{\text{ут пар}(j)} \right] - \frac{dm_{\text{ж,м}}}{d\tau} - \frac{dm_{\text{в,п}}}{d\tau} - \int_{x_{\text{вх}}}^{x_{\text{вых}}} \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{пар вых}} \cdot S(x) dx - f_1(P, \tau) \cdot G_{\text{рег пар}} - f_2(P, \tau) \cdot G_{\text{нап сух пар}} - \int_{x_{\text{вх}}}^L \frac{\partial}{\partial \tau} \rho_{\text{пар вых}} \cdot S(x) dx - \left[\sum_{j=J_1}^{j_2} G_{\text{ут пар}(j)} \right] = G_{\text{служ лок пар}} + G_{\text{км пар}} \quad (4)$$

где $x_{\text{вх}}$, $x_{\text{вых}}$ и L – соответственно сечения на входе, выходе из слоя адсорбента (или на входе и выходе из мембранной осушки) и на входе в кран машиниста; индексы $_{\text{пар}}$ и $_{\text{сух воздух}}$ относятся соответственно к парообразной составляющей воды и сухому воздуху; $f(P)$, $f_1(P, \tau)$ и $f_2(P, \tau)$ – функции, определяющие соответственно подачу воздуха компрессором, расход воздуха на регенерацию и наполнение сжатым воздухом адсорбера и сопряженных с ним объемов. Функциональные зависимости для принятого регулирования работы отдельных узлов приведены в третьей главе; $G_{\text{к сух воздух}}$, $G_{\text{к пар}}$ – массовая производительность компрессора соответственно по сухому воздуху и по водяному пару; ρ – плотность; $S(x)$ – площадь поперечного сечения трубопроводов, главных резервуаров и т. п.; $G_{\text{рег сух воздух}}$, $G_{\text{рег пар}}$ – массовый расход соответственно сухого воздуха и водяного пара на регенерацию адсорбента; x – координата, направленная вдоль оси трубопровода, по направлению движения сжатого воздуха, $x = 0$ в точке выхода сжатого воздуха из компрессора; $\left[\sum_{j=0}^{j_{\text{вх}}} G_{\text{ут сух воздух}(j)} \right]$, $\left[\sum_{j=0}^{j_{\text{вх}}} G_{\text{ут пар}(j)} \right]$, $\left[\sum_{j=J_1}^{j_2} G_{\text{ут сух воздух}(j)} \right]$,

$\left[\sum_{j=J_1}^{j_2} G_{\text{ут пар}(j)} \right]$ – суммарный массовый расход соответственно сухого воздуха и водяного пара, вызванный утечками и расходами на линии от компрессора до сечения на входе в слой адсорбента и от выхода из УОСВ до сечения на входе в кран машиниста; $G_{\text{нап сух воздух}}$, $G_{\text{нап пар}}$ – массовый расход соответственно сухого воздуха и водяного пара на наполнение емкости адсорбера после регенерации адсорбента; $G_{\text{служ лок сух воздух}}$, $G_{\text{служ лок пар}}$, $G_{\text{км сух воздух}}$, $G_{\text{км пар}}$ – массовый расход соответственно сухого воздуха и водяного пара через кран машиниста и на служебные нужды локомотива (на подачу песка, обеспечение работы свистка, тифона и другие разовые расходы); $m_{\text{в,п}}$ – масса водяных паров, уловленных слоем адсорбента.

Решение уравнений (3), (4) с учетом известных уравнений термодинамики динамики пневматических систем и газовой динамики, приведенных в первом разделе второй главы диссертации, позволяет рассчитать номограммы давления, расходов и других параметров работы компрессорного оборудования, также нормируемые характеристики работы компрессорного оборудования, которым относится: давление на выходе из компрессора; минимальное давление в главных резервуарах (перед краном машиниста) в режиме отпуска; продолжительность включения агрегата компрессорного – $PВ_{ак}$, определяемая формуле:

$$PВ_{ак} = \frac{\left[\sum f(p_{вкл, выкл})_i \right] \cdot \Delta \tau}{\tau_{проц}}, \quad (1)$$

где $f(p_{вкл, выкл})$ – функция, определяющая наличие сигнала датчика-реле давления управления агрегатом компрессорным; $\Delta \tau$ – шаг интегрирования; $\tau_{проц}$ – время рассматриваемого процесса от первого включения компрессора до n -ного; $PВ$ – продолжительность включения компрессора – $PВ$, определяемая по формуле:

$$PВ = \frac{\left[\sum f(p)_i \right] \cdot \Delta \tau}{\tau_{проц}}; \quad (2)$$

частота пусков компрессора (мотор-компрессора) в час ($ЧАС_{пуск}$):

$$ЧАС_{пуск} = \frac{\left[\sum f_{пускj} \right] - 1}{\tau_{проц} - \Delta \tau} \cdot 3600, \quad (3)$$

где $f_{пускj}$ – функция включения компрессора (параметр функции $f(p)$); максимальная (минимальная) продолжительность цикла нагнетания; расход сжатого воздуха на регенерацию в процентах от общего количества воздуха, поданного компрессором ($PACX_{реген \%}$):

$$PACX_{реген \%} = \frac{\sum_{i=1}^{i=m} (f_i(p, \tau) \cdot G_{рег_i} \cdot \Delta \tau)}{\sum_{i=1}^{i=m} (f_i(p) \cdot G_{к сук возд_i} \cdot \Delta \tau)} \cdot 100, \quad \text{где } m = \frac{\tau_{проц}}{\Delta \tau} \quad (4)$$

и другие характеристики.

Уравнения (3), (4), как и (1), и (2), отражают материальный баланс воздуха и воды в пневматической системе локомотива. На основании проведенных исследований показано, что расчет характеристик 5 – 8 можно проводить и уравнению материального баланса сухого воздуха, полученному после упрощения уравнений (3), (4):

$$\begin{aligned} f(p) \cdot Q_k \cdot \left(\frac{P_{вс}}{R_{вс \text{ возд}} \cdot T_{вс}} - \frac{P_{вс} \cdot \varphi_{вс}}{R_{вс} \cdot T_{вс}} \right) - \int_0^{t_{вс}} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{P_{вс \text{ возд}}}{R_{вс \text{ возд}} \cdot T} - \frac{P_{вс} \cdot \varphi}{R_{вс} \cdot T} \right) \cdot S(x) dx - \left[\sum_{j=1}^{j=n} G_{гг \text{ сук возд}(j)} \right] - \\ - \int_{t_{вс}}^{t_{гг}} \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{P_{сук \text{ возд}}}{z_{сук \text{ возд}} \cdot R_{сук \text{ возд}} \cdot T} \right) \cdot S(x) dx - f_1(p, \tau) \cdot G_{рег \text{ сук возд}} - f_2(p, \tau) \cdot G_{вс \text{ сук возд}} - \int_{t_{гг}}^l \frac{\partial}{\partial \tau} \left(\frac{P_{сук \text{ возд}}}{z_{сук \text{ возд}} \cdot R_{сук \text{ возд}} \cdot T} \right) \cdot S(x) dx - \\ - \left[\sum_{j=1}^{j=l} G_{гг \text{ сук возд}(j)} \right] = Q_{вс \text{ сук возд}} \cdot \left(\frac{P_{гг}}{R_{сук \text{ возд}} \cdot (T_{гг} + \Delta T)} \right) + Q_{вс \text{ сук возд}} \cdot \left(\frac{P_{гг}}{R_{сук \text{ возд}} \cdot T_{гг}} \right), \quad (5) \end{aligned}$$

где индексы: $вс$ относятся к условиям всасывания воздуха компрессором, $вс \text{ возд}$ к влажному воздуху, остальные индексы по уравнениям (3) и (4); Q_k – объемная

производительность компрессора, приведенная к условиям всасывания; p – давление; p_n – давление насыщенных водяных паров относительно плоской поверхности воды; R – газовая постоянная; T – абсолютная температура; φ – относительная влажность воздуха; $z_{\text{сух.возд}}$ – коэффициент «неидеальности» сухого воздуха; ΔT – превышение средней температуры за главными резервуарами над температурой атмосферного воздуха в местах отбора воздуха на служебные нужды локомотива; $Q_{\text{кв.сух.возд}}$ – объемный расход воздуха через кран машиниста; $Q_{\text{служ.лок.сух.возд}}$ – объемный расход воздуха на служебные нужды локомотива.

Вторая математическая модель – «неподвижного зернистого слоя адсорбентов», расчетная схема которой представлена на рис. 3. В модели использованы зависимости, опубликованные в работах М.Э. Азрова, С.В. Белова, О.М. Тодеса. На основе известных математических зависимостей, приведенных во втором разделе второй главы диссертации, дана критическая оценка различных способов засыпки адсорбентов и характеристик насыпных слоев. Приведены формулы расчета площади поверхности и удельной поверхности слоя зерен произвольной формы и способы их определения.

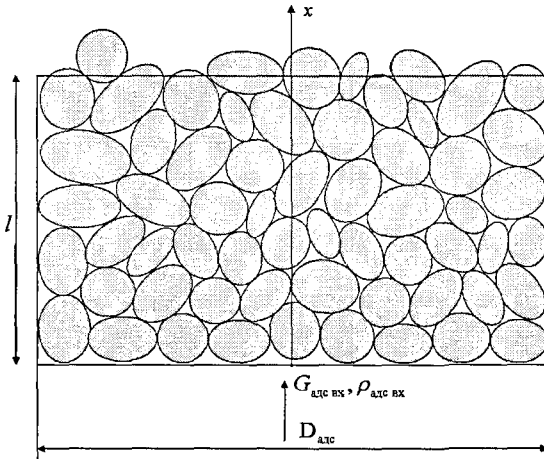


Рис. 3. Расчетная схема к математическим моделям «неподвижного зернистого слоя адсорбентов» и «адсорбции при короткоцикловой осушке сжатого воздуха»

Показано, что суммарная потеря давления в УОСВ равна сумме всех его сопротивлений:

$$\Delta p_{\text{св}} = \sum \Delta p_{\phi} + \sum \Delta p_r + \sum \Delta p_{\text{тр}} + \sum \Delta p_{\text{нс}}, \quad (10)$$

где индексы ϕ , z , тр , нс соответственно обозначают фильтры, запорные элементы, трубопроводы, насыпной слой. Перепад давления насыпного слоя ($p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}$) определяется по формуле:

$$\Delta p_{\text{нс}} = (p_{\text{вх}} - p_{\text{вых}}) = \frac{\zeta_s \cdot \rho \cdot \omega_s^2 \cdot l}{2d_s}, \quad (11)$$

где ζ , – эквивалентный коэффициент гидравлического сопротивления пористого слоя; ω , – «истинная средняя скорость» сжатого воздуха между частицами адсорбента; l – длина слоя адсорбента; d , – эквивалентный диаметр канала.)ны формулы определения ζ , для расчета гидравлического сопротивления пористых слоев адсорбентов. Для определения ζ , насыпных слоев силиката марки КСКГ с пористостью 0,41 ... 0,45 и Re , от 35 до 600 получена следующая зависимость:

$$\zeta_s = \frac{400}{Re_s} + \frac{7}{Re_s^{0,15}}, \quad (1)$$

где Re_s , – эквивалентный критерий Рейнольдса.

Третья математическая модель – «адсорбции при короткоцикловой осушке сжатого воздуха» основана на работах В.Н. Кельцева, Н.С. Торочешникова, Ю.И. Шумяцкого, Б.И. Беккера, В.И. Ермакова, В.И. Иванова, Л.А. Коваленко, И.Д. Крылова, В.В. Нагаева, Ю.А. Серегина и обработке опытных данных, полученных автором. Показано, что математическое описание адсорбции при короткоцикловой осушке сжатого воздуха является качественной (эвристической) моделью, объясняющей физические процессы, происходящие при короткоцикловой адсорбции, и помогающей в проектировании и доводке систем подготовки сжатого воздуха, основанных на короткоцикловой адсорбции.

Основным уравнением для расчета и доводки КАУОСВ при незначительной продольной квазидиффузии является зависимость выходной концентрации паровообразной воды (\bar{C}) в сжатом воздухе за КАУОСВ:

$$\bar{C} = \frac{C_0 \cdot \exp\left(-A_1 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{K_n - 1}{2 \cdot K_n}} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \Gamma}{\tau_{ци}}} \cdot \frac{\alpha \cdot x \cdot \kappa_{изв}}{\omega}\right)}{1 + \left(\frac{1 - K_n}{K_n - 1}\right) \cdot \left(1 - \exp\left(-A_1 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2} \cdot \frac{K_n - 1}{2 \cdot K_n}} \cdot \sqrt{\frac{D \cdot \Gamma}{\tau_{ци}}} \cdot \frac{\alpha \cdot x \cdot \kappa_{изв}}{\omega}\right)\right)}, \quad (13)$$

где C_0 – исходная концентрация паровообразной воды в потоке газа; K_n – коэффициент избытка обратного потока; $\sigma_{адс-дес}$ – отношение давлений на стадии адсорбции и десорбции; D – коэффициент диффузии адсорбата в грануле адсорбента; Γ – коэффициент Генри; α – удельная поверхность слоя зерен; x – координата направленная вдоль оси адсорбера; $\kappa_{изв}$ – коэффициент извилистости пор слоя адсорбента; $\tau_{ци}$ – время полуцикла адсорбции; A_1 – коэффициент нормировки.

На основе уравнения материального баланса воды из условия сохранения средней постоянной концентрации в прямом и обратном потоке воздуха при равновесном процессе дана формула расчета коэффициента избытка обратного потока:

$$K_n = \frac{m_{дес} \cdot (p_{взс} - \varphi \cdot p_n)}{m_{взс} \cdot (p_{дес} - \varphi \cdot p_n)}, \quad (14)$$

где $m_{взс}$, $m_{дес}$ – масса воздуха на стадии адсорбции (осушки) и десорбции (регенерации).

рации); $P_{адс}$, $P_{дес}$ – давление воздуха на стадии адсорбции и десорбции. Показано, что экономичность КАУОСВ во многом зависит от давления воздуха на стадии десорбции, а, следовательно, от сопротивления слоя адсорбента.

Показано, что при установленном режиме осушки практически все процессы адсорбции и десорбции воды происходят в поверхностном слое гранулы адсорбента глубиной не более 0,2 мм. Основным видом переноса воды в гранулах адсорбента является механизм нормальной диффузии, этим объясняется инерционность процессов, происходящих в КАУОСВ. Понимание происходящих процессов создает предпосылки для их использования при проектировании КАУОСВ.

Показана взаимосвязь параметров и характеристик трех математических моделей.

Третья глава посвящена созданию и испытаниям УОСВ для тормозных систем подвижного состава железных дорог. Показан опыт разработки и испытаний КАУОСВ малой производительности для трамваев и троллейбусов и средней производительности для автомотрис АЧ2.

Показаны необходимость и этапы создания средств непрерывного контроля и измерения температуры точки росы сжатого воздуха и испытательных стендов. Для реализации этой задачи нами был разработан и запатентован «Способ измерения и контроля температуры точки росы влажного газа», схемное решение которого представлено на рис. 4.

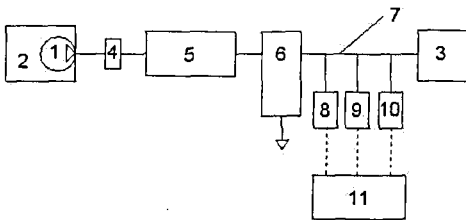


Рис. 4. Принципиальная схема установки автоматического непрерывного измерения и контроля температуры точки росы влажного газа. 1 – средство компрессии газа; 2 – источник газа; 3 – потребитель; 4 – газовая арматура; 5 – газосборник; 6 – устройство осушки газа; 7 – трубопровод; 8 – датчик измерения относительной или абсолютной влажности; 9 – датчик измерения температуры; 10 – датчик измерения давления; 11 – электронное устройство

Были созданы измерительный комплекс для проведения автоматизированных испытаний поршневых и винтовых компрессоров, компрессорных агрегатов, систем осушки и испытательные стенды, схема, технические характеристики и фотографии которых приведены в диссертации.

Департаментом локомотивного хозяйства ОАО «РЖД» (ЦТ ОАО «РЖД») было поручено проведение стендовых испытания по оценке эффективности возможного применения на локомотивах сепараторов газожидкостных вихревого типа «Колибри». В ходе испытаний было установлено, что их эффективность по уже сконденсировавшейся воде и маслу достаточно высока – более 94%, но вследствие высокой эффективности по отделению капельного масла сжатый воздух со 100%-ной влажностью после сепаратора (так как он не отделяет паробразную воду) является агрессивной средой, вызывающей ржавление металла. По результатам испытаний нами были даны рекомендации по примене-

нию влагомаслоотделителей типа «Колибри» после их модернизации на локomotивах, не имеющих системы адсорбционной осушки сжатого воздуха. И возможности этих сепараторов ограничены протекающими в них физическими процессами, и поэтому они не могут обеспечить современные требования к качеству сжатого воздуха.

В настоящее время в России при активном участии ВНИКТИ осваивает производство новых типов компрессоров для мощных магистральных локомотивов – винтовых и безмасляных поршневых, что вызывает необходимость создания КАУОСВ большой производительности.

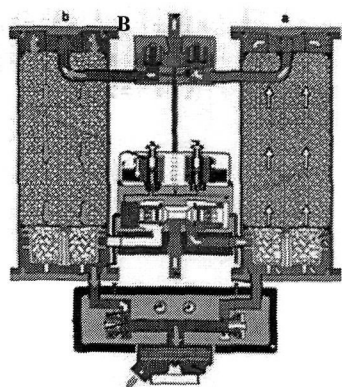
При создании локомотивных УОСВ необходимо руководствоваться следующими требованиями к компрессорному оборудованию: 1. Компрессорное оборудование с устройством очистки и осушки сжатого воздуха и главные резервуары должны обеспечивать потребности пневматической и тормозной систем поезда в качественном сжатом воздухе, то есть безусловно обеспечивать безопасность движения при всех условиях эксплуатации локомотива. 2. Режимы работы компрессорного оборудования не должны выходить за функциональные ограничения, существующие у применяемых компрессорных агрегатов. 3. Компрессорное оборудование должно работать в оптимальном режиме минимальной стоимостью жизненного цикла.

На основании этих требований нами были созданы КАУОСВ большой производительности в одно- и двухадсорберном исполнении.

Одноадсорберные КАУОСВ осушают сжатый воздух в период подачи его компрессором. Весь воздух от компрессора попадает в главные резервуары и может быть использован при максимальных расходах. Поэтому при их применении на локомотиве может быть установлен компрессор меньшей производительности, чем при применении двухадсорберных КАУОСВ. В то же время с одноадсорберными КАУОСВ расходуют воздух на регенерацию адсорбента время стоянки компрессора, сокращая тем самым это время. Локомотивы с одноадсорберными КАУОСВ должны иметь больший объем главных резервуаров, так как при их использовании сокращается время «стоянки» компрессора.

Нами разработано и запатентовано «устройство для получения очищенного и осушенного сжатого воздуха на транспортном средстве» в одноадсорберном исполнении. При работе этого устройства последовательно осуществляются такие же фазы работы, как в лучших транспортных двухадсорберных осушителях: осушка сжатого воздуха в период работы компрессора; регенерация (восстановление поглощающих свойств) адсорбента и выравнивание давления путем предварительного наполнения адсорбера сжатым воздухом из главных резервуаров во время «остановки» компрессора.

На рис. 5 представлена схема работы транспортного двухадсорберного (А) и одноадсорберного (С) КАУОСВ, выполненных по нашему патенту. Работа одноадсорберного (С) устройства показана при работе компрессора с регулированием производительности автоматическим прекращением подачи путем срабатывания реле давления (РД) с ПВ равной 33% (II). Работа двухадсорберного (А) устройства показана при работе компрессора с ПВ равной 100% (I) и 33% (II).



- = Осушение воздуха
- = Регенерация
- = Линия управления
- = Работа компрессора

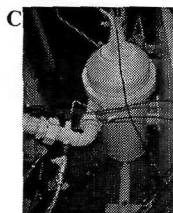
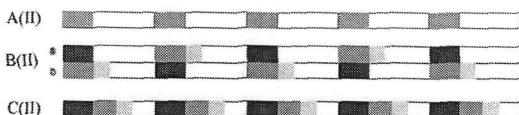
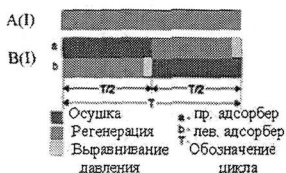


Рис. 5. Схема работы транспортных осушителей. Работа: А — компрессора; Б — двухадсорберного КАУОСВ; С — одноадсорберного КАУОСВ. Режимы: (I) — ПВ равная 100%; (II) — ПВ равная 33%.

В работе показано, что в основных режимах эксплуатации новые российские одноадсорберные КАУОСВ, имеют при прочих равных условиях меньшую выходную концентрацию пароводной воды, чем двухадсорберные за счет меньшего времени полуцикла адсорбции ($\tau_{\text{м}}$, см. формулу 13). Однако когда времени стоянки компрессора недостаточно для регенерации адсорбента и предварительного наполнения адсорбера сжатым воздухом выходная концентрация пароводной воды возрастает за счет уменьшения коэффициента избытка обратного потока ($K_{\text{н}}$). Одноадсорберные КАУОСВ не могут длительное время качественно осушать воздух с продолжительностью включения компрессора равной 100%. В работе показано, как с помощью предложенных математических моделей рассчитать возможные режимы работы компрессорного оборудования с КАУОСВ на локомотиве и обеспечить вышеперечисленные требования.

Из условий минимизации стоимости жизненного цикла компрессорного оборудования для газотурбовоза ГТ1 была создана и испытана одноадсорберная КАУОСВ. На газотурбовозе ГТ1 применены два параллельно работающих винтовых компрессора производительностью по $0,075 \text{ м}^3/\text{с}$ ($4,5 \text{ м}^3/\text{мин}$) с одноадсорберными КАУОСВ и объемом главных резервуаров $2,4 \text{ м}^3$. Сопоставление расчетных характеристик одноадсорберного КАУОСВ с результатами испытаний показало их адекватность. Расчетные и фактические характеристики сопротивления насыпного слоя представлены на рис. 6, насыщенности адсорбента по ходу движения сжатого воздуха на рис. 7, а размещение оборудования на рис. 8.

На тепловозах 2ТЭ25К и 2ТЭ25А установлены главные резервуары суммарным объемом $2,0 \text{ м}^3$. В соответствии с произведенными по первой математической модели расчетами при применении одноадсорберных КАУОСВ режимы работы компрессорного оборудования по частоте пусков могут выходить за допустимые ограничения. Испытания тепловоза 2ТЭ25А №1, где были установлены одноадсорберные КАУОСВ разработки ЗАО УК «БМЗ» и винтовые компрессоры ОАО «Пензкомпрессормаш», полностью подтвердили наши расчеты.



Рис. 6. Сопротивление насыпного слоя адсорбента сепаратора-осушителя ГТ1.42.300.000 при производительности компрессора 4,5 м³/мин в диапазоне абсолютных давлений от 0,69 до 0,98 МПа: расчетное – сплошная линия; данные испытаний – точки

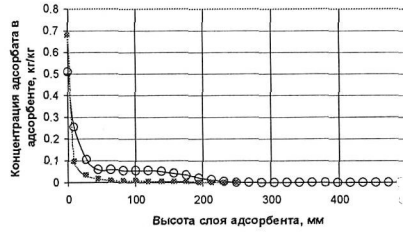


Рис. 7. Результаты расчетов концентрации адсорбированной воды в адсорбенте по ходу движения сжатого воздуха в слое адсорбента (силикагеля типа КСКГ) и фактической концентрации, полученной при взвешивании послойных проб адсорбента. 1 (квадратики) – результаты расчетов; (кружки) – фактическая концентрация, полученная при взвешивании послойных проб адсорбента

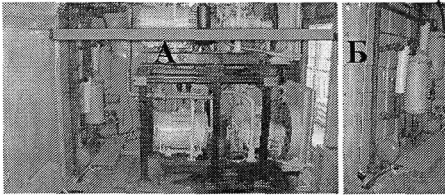


Рис. 8. Размещение компрессорного оборудования в кузове газотурбовоза ГТ1. А – размещение винтовых компрессорных агрегатов и системы подготовки сжатого воздуха. Б – система подготовки сжатого воздуха ГТ1.42.200.000

Для тепловозов 2ТЭ25К и 2ТЭ25А и других мощных локомотивов нами совместно с ОАО «Транспневматика» были созданы и испытаны двухадсорберная КАУОСВ – СПВ 4,5/1 производительностью до 0,075 м³/с (4,5 м³/мин), рис. 9.

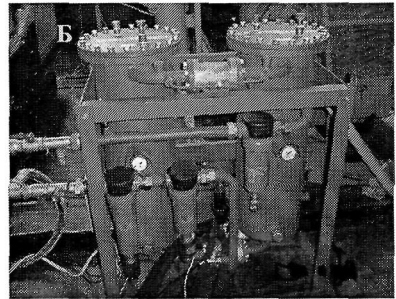
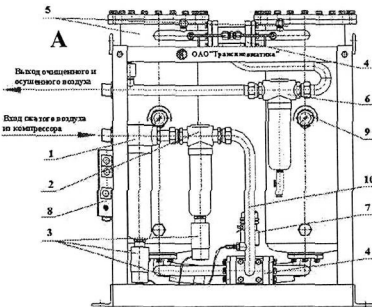


Рис. 9. Система подготовки сжатого воздуха СПВ 4,5/1. А – принципиальная схема работы СПВ 4,5/1; Б – фотография СПВ 4,5/1. 1 – циклонный масловоздушный сепаратор; 2 – фильтр предварительной очистки; 3 – электропневматические клапаны; 4 – клапаны переключения колонн; 5 – адсорбционные колонны; 6 – фильтр тонкой очистки воздуха; 7 – предохранительный клапан; 8 – соединительная коробка; 9 – манометр; 10 – трубопровод.

По результатам эксплуатационных испытаний было принято решение о серийной установке компрессорных агрегатов АКВ 4,5/1 ПУ2 с системами подготовки сжатого воздуха СПВ 4,5/1 производства ОАО «Транспневматика» на всех тепловозах 2ТЭ25К и 2ТЭ25А, в том числе с заменой ранее установленной

го компрессорного оборудования ОАО «Пензкомпрессормаш» на тепловозах 2ТЭ25К с № 0001 по № 0009 и 2ТЭ25А № 001.

Нами были сопоставлены технические характеристики разработанных новых систем подготовки сжатого воздуха и западноевропейских аналогов, результаты сопоставления приведены в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики новых КАУОСВ отечественного производства и западных аналогов при их установке после винтового компрессора

Наименование параметра	КАУОСВ			Нормативное значение параметра***
	Одноадсорберное (ГТ1.42.200.000)	Двухадсорберное (СПВ 4,5/1)	Двухадсорберное европейских производителей**	
Количество загрязняющих веществ в сжатом воздухе на выходе из устройства, мг/м ³ , не более:	Значение			
- воды в жидком состоянии	-	-	-	-
- масла в жидком состоянии	-	-	0 ... 3	5
- твердых частиц	до 1	до 1	до 5	2
Размер твердой частицы, мкм	3 ... 5	3 ... 5	до 5	10
Температура точки росы (ТТР) осушенного сжатого воздуха в питательной магистрали на выходе из устройства осушки:				
при нормальных климатических условиях	минус 55°С* ...	минус 35°С	минус 40°С	Не выше 0°С
при температуре воздуха на всасывании компрессора плюс 40°С****	минус 20°С минус 25°С* ...	минус 25°С	минус 3°С	Не выше плюс 10°С
при температуре воздуха на всасывании компрессора плюс 65°С****	минус 10°С минус 15°С* ...	минус 15°С	Нет характеристик или не рекомендуется использовать	Не выше плюс 25°С
при температуре воздуха на всасывании компрессора минус 50°С****	минус 3°С минус 67°С* ...	минус 65°С	Нет характеристик или не рекомендуется использовать	Не выше минус 50°С
Средний расход воздуха на регенерацию адсорбента в УОСВ в процентах от количества очищенного и осушенного воздуха	10 ... 11%	12 ... 14%	Паспортные данные 15 ... 20%. На высокоскоростном электропоезде «Сапан» 25%	
Суммарное сопротивление всех ступеней УОСВ при прохождении через него очищаемого и осушаемого воздуха, МПа, не более	0,015	0,035	0,05	***** 0,05

* Более высокое значение ТТР соответствует самым неблагоприятным режимам работы магистрального локомотива. ** Обобщенные характеристики транспортных КАУОСВ ведущих западноевропейских производителей. *** По первой редакции ГОСТ Р «Сжатый воздух пневматических систем железнодорожного подвижного состава. Требования к качеству». **** Превышение температуры воздуха на всасывании компрессора и температуры сжатого воздуха на входе в устройство осушки над температурой атмосферного воздуха принято 10°С. ***** По ГОСТ 10393-2009.

Из сопоставления следует, что созданные нами КАУОСВ не уступают, а ряду технических характеристик превосходят лучшие западноевропейские аналоги.

На примере тепловозов 2ТЭ25А № 001 и 2ТЭ25А с № 002 сопоставлены характеристики работы компрессорного оборудования соответственно с одноадсорберной и двухадсорберной КАУОСВ, полученные в результате испытаний и рассчитанные по математической модели.

Функции $f(P)$, $f_1(P, \tau)$, $f_2(P, \tau)$ уравнения 9, определяющие работу компрессорного оборудования тепловозов 2ТЭ25А № 001 и 2ТЭ25А с № 002, даны в таблице 3.

Таблиц

Функции, определяющие работу компрессорного оборудования с КАУОСВ на тепловозах 2ТЭ25А № 001 и 2ТЭ25А с № 002

2ТЭ25А № 001 с одноадсорберным устройством ОАО «Пензкомпрессор-маш»	2ТЭ25А с № 00 двухадсорберным устройством ОАО «Транспжэмаши»
$f(P)_i = f(p_{\text{вкл, выкл}})_i \cdot (1 - f_{\text{пуск прок}})_i$	То же
$f(p_{\text{вкл, выкл}})_i = \begin{cases} 1, \text{ если } (p_i \leq p_{\text{вкл } i}) \vee (p_{\text{выкл } i} > p_i > p_{\text{вкл } i}) \wedge (f(p_{\text{вкл, выкл}})_{i-1} = 1) \\ 0, \text{ если } (p_i \geq p_{\text{выкл } i}) \vee (p_{\text{выкл } i} > p_i > p_{\text{вкл } i}) \wedge (f(p_{\text{вкл, выкл}})_{i-1} = 0) \end{cases}$	То же
где $830000 \text{ Па} < p_{\text{вкл } i} < 853000 \text{ Па}$, $997000 \text{ Па} < p_{\text{выкл } i} < 1004000 \text{ Па}$	
$f_{\text{пуск прок}} = \begin{cases} 1, \text{ если } f_{\Delta \tau \text{ пуск } i} > 0 \\ 0 \end{cases}$	То же
$f_{\Delta \tau \text{ пуск } i} = \begin{cases} 1, \text{ если } f_{\text{пуск } i} = 1 \\ 0, \text{ если } [(f_{\Delta \tau \text{ пуск } i-1} = 0) \wedge (f_{\text{пуск } i} = 0)] \\ f_{\Delta \tau \text{ пуск } i-1} + 1, \text{ если } f_{\Delta \tau \text{ пуск } i-1} < X \\ 0 \end{cases}$	То же
$X = \frac{\tau_{\text{пуск прок}}}{\Delta \tau}$	То же
$\tau_{\text{пуск прок}} = 11 \text{ с}$	$\tau_{\text{пуск прок}} = 3,5 \text{ с}$
$f_{\text{пуск } i} = \begin{cases} 1, \text{ если } (f(p_{\text{вкл, выкл}})_i = 1 \wedge (p_{\text{вкл, выкл}})_{i-1} = 0) \\ 0, \text{ если } [(f(p_{\text{вкл, выкл}})_i = 0) \vee (f(p_{\text{вкл, выкл}})_i = 1 \wedge (p_{\text{вкл, выкл}})_{i-1} = 1)] \end{cases}$	То же
$f_1(P, \tau) = \begin{cases} 1, \text{ если } [f(p_{\text{вкл, выкл}})_i = 0 \wedge p_{\text{выкл } i} < p_i < p_{\text{выкл рег } i}] \\ 0 \end{cases}$	$f_1(P, \tau)_i = f(P)_i$
где $874000 \text{ Па} < p_{\text{выкл рег } i} < 886000 \text{ Па}$	
$f_2(P, \tau)_i = 0$, учтено функцией $f_{\text{пуск прок } i}$	То же

В диссертации сопоставлены расчетные и фактические циклограммы деления и расхода воздуха при различных условиях испытаний. Наиболее характерные из них на отдельно стоящей секции тепловоза (рис. 10) показывают различие воздействия КАУОСВ на работу компрессоров – одноадсорберные увеличивают частоту пусков компрессора, двухадсорберные снижают его ф:

техническую производительность. Расхождение расчетных характеристик с характеристиками натуральных образцов при стендовых испытаниях не превышает 2–3%, а при стационарных 4%, что близко к погрешности принятых для расчетов параметров компрессорных установок – производительности, настроек регуляторов давления и т. п.

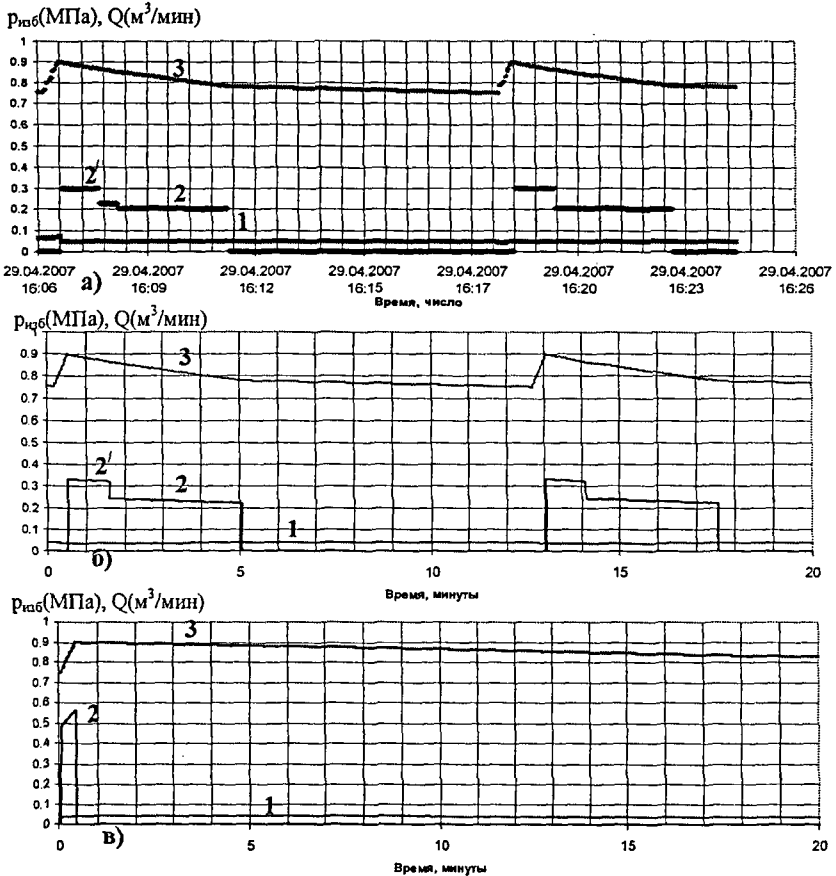


Рис. 10 Циклограммы давления и расхода воздуха отдельно стоящей секции тепловоза. 1 – утечки сжатого воздуха из пневматической системы одной секции тепловоза ($\text{м}^3/\text{мин}$); 2 – расходы воздуха на регенерацию ($\text{м}^3/\text{мин}$); 2' – расходы воздуха, обусловленные неплотностью и задержкой посадки обратного клапана; 3 – давление за адсорбером (МПа). а) испытания реального объекта – секции Б тепловоза 2ТЭ25А № 001 с одноадсорберным устройством; б) расчет по математической модели для одной секции тепловоза 2ТЭ25А №001; в) расчет для тех же условий по математической модели для одной секции тепловоза 2ТЭ25А №002 с компрессорным агрегатом АКВ 4,5/1 ПУ2 и двухадсорберным устройством СПВ 4,5/1

В сопоставимых климатических условиях нами были проведены испытания КАУОСВ, предназначенных для грузовых магистральных локомотивов; по

ТЭ25.040.01.000ПЗ производства ЗАО «БМЗ» и ОАО «Пензкомпрессормаш» (пловоз 2ТЭ25А №001 до модернизации), ГТ1.42.200.000 и СПВ 4,5/1 с имитацио-
максимально возможных эксплуатационных расходов сжатого воздуха (рис. 11).

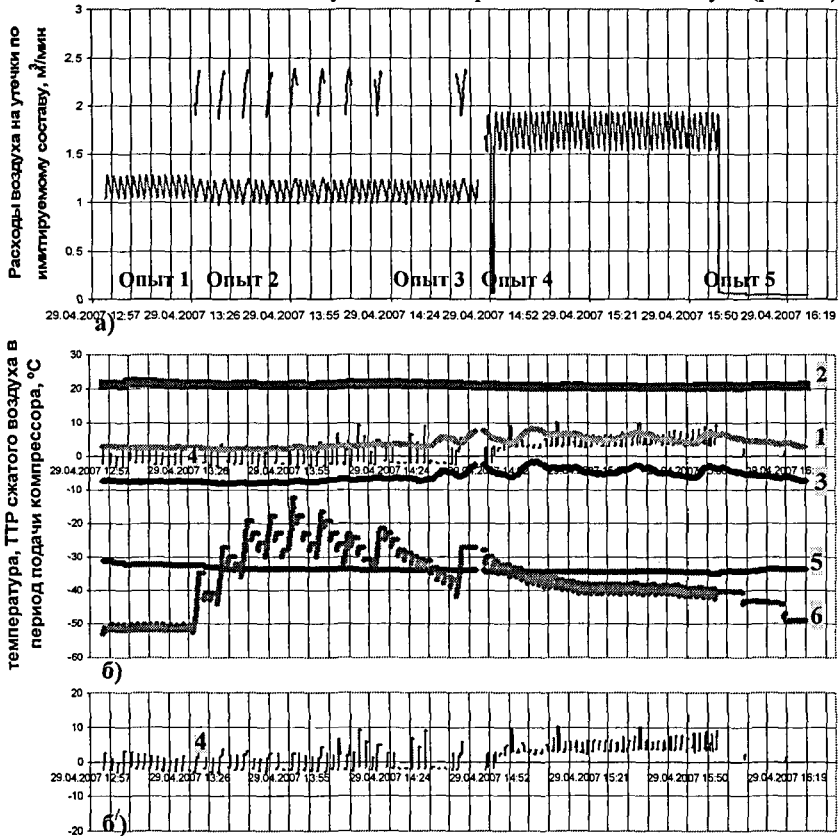


Рис. 11. Характеристики различных систем осушки сжатого воздуха. 1 – температура атмосферного воздуха вокруг локомотива (для стендовых испытаний – температура в районе главных резервуаров) (°С); 2 – температура воздуха внутри локомотива на всасывании компрессора (°С); 3 – нормативное значение (ГОСТ 10393–2009) необходимой температуры точки росы с того воздуха при текущем значении температуры атмосферного воздуха (°С); 4 – ТТР за односорберным устройством ОАО «Пензкомпрессормаш», установленном на тепловозе 2ТЭ2 № 001 (прерывистость данных обусловлена тем, что показания снимались только в период подачи воздуха компрессором) (°С); 5 – ТТР за двухадсорберной системой подготовки сжатого воздуха СПВ 4,5/1, изготовленной для установки на тепловозе 2ТЭ25А № 002 (°С); 6 – ТТР одноадсорберной системой подготовки сжатого воздуха ГТ1.42.200.000 (°С).

а) Расходы воздуха на утечки по имитируемому составу; б) характеристики различных КАУОСВ при сопоставимых условиях испытаний и нормативное значение ТТР; б') характеристика КАУОСВ тепловоза 2ТЭ25А № 001 с одноадсорберным устройством ОАО «Пензкомпрессормаш»

Испытания показали, что наименьший расход воздуха на регенерацию, а следовательно и энергетические затраты, при обеспечении нормативного качества сжатого воздуха имеет одноадсорберная установка ГТ1.42.200.000. Но при имитации 8 регулировочных торможений в час 110-вагонного поезда ТТР поднимается практически до нормативных ограничений и лимитируется объемом главных резервуаров.

Разработанная с нашим участием СПВ 4,5/1 обеспечивает качество сжатого воздуха независимо от режимов эксплуатации. КАУОСВ ОАО «Пензкомпрессормаш», установленная на тепловозе 2ТЭ25А № 001 и тепловозах 2ТЭ25К № 0001–0009, не удовлетворяет нормативным требованиям к качеству сжатого воздуха при его больших расходах, поэтому принято решение о ее замене на СПВ 4,5/1.

Четвертая глава посвящена технико-экономическому сравнению (ТЭС) применения различных УОСВ на магистральных грузовых локомотивах. Критериями отбора аналогов для ТЭС были приняты: обеспечение современных требований к качеству сжатого воздуха пневматических систем железнодорожного подвижного состава; наименьшая стоимость устройств и эксплуатационные затраты. Поэтому для ТЭС нами выбраны: разработанные нами одноадсорберная КАУОСВ (ГТ1.42.200.000), двухадсорберная КАУОСВ (СПВ 4,5/1) и их европейские аналоги – двухадсорберный осушитель воздуха LTZ 3.2 производства фирмы «Knorr-Bremse» (Германия) и двухадсорберный железнодорожный транспортный осушитель TDVC22006G производства фирмы «Domnick hunter» (Великобритания). ТЭС эффективности применения на локомотивах УОСВ разных производителей выполнено на основе сопоставления стоимости жизненного цикла (СЖЦ) устройств, включающей затраты на приобретение и использование техники за весь срок службы локомотива. СЖЦ импортных УОСВ рассчитывалась при минимальном (1евро = 34,3777 рубля) и максимальном (1евро = 46,8392 рубля) курсе евро за 2008 – 2009 гг.

Разработанные нами КАУОСВ – ГТ1.42.200.000 и СПВ 4,5/1 имеют более низкую СЖЦ, чем устройства лучших европейских производителей – фирм «Knorr-Bremse» и «Domnick hunter» и следовательно более эффективны чем западноевропейские аналоги за счет меньшей стоимости приобретения и меньших затрат на энергетическое обеспечение процессов осушки. СЖЦ УОСВ за 40 лет эксплуатации грузовых магистральных тепловозов составит: ГТ1.42.200.000 – 551081 рубль; СПВ 4,5/1 – 759749 рублей; LTZ 3.2 – 904 913 рублей при курсе 1Евро = 34,3777 рубля и 1 012 645 рублей при курсе 1евро = 46,8392 рубля; TDVC22006G – 970882 рубля при курсе 1евро = 34,3777 рубля и 1 103 301 рубль при курсе 1евро = 46,8392 рубля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана математическая модель работы компрессорной установки с короткоцикловым адсорбционным устройством осушки сжатого воздуха, позволяющая рассчитать основные технические характеристики работы компрессорного оборудования на подвижном составе во всех условиях эксплуатации.

Математическая модель позволяет определить с погрешностью не более 4% параметры работы компрессорной установки с короткоцикловым адсорбци-

онным устройством очистки и осушки сжатого воздуха, а также сопротивле- насыпных слоев адсорбентов с погрешностью не более 7% для однослойной сыпки и с погрешностью не более 20% – для двухслойной.

2. Математическое моделирование процессов работы компрессорного о рудования на современных локомотивах может обеспечить ускорение сро разработки высокоэффективных образцов техники и уменьшить расходы создание и доводку опытных образцов локомотивов.

3. Определены показатели качества сжатого воздуха, необходимые , пневматических систем подвижного состава железных дорог России. Допус мые нормативные показатели загрязненности сжатого воздуха включены в р абатываемые стандарты: «Сжатый воздух пневматических систем железно рожного подвижного состава. Требования к качеству» и «Тепловозы маги ральные. Общие технические требования».

4. Проведен анализ методов очистки и осушки сжатого воздуха на тра порте, в том числе железнодорожном. Показано теоретически и эксперим тально, что современные требования осушки сжатого воздуха пневматическ систем железнодорожного подвижного состава могут обеспечивать два ти устройств осушки и очистки сжатого воздуха: адсорбционные и мембранн Из которых наиболее экономичными в настоящее время являются короткоо ловые безнагревные адсорбционные устройства.

5. Запатентованы и созданы средства непрерывного контроля и измереи температуры точки росы сжатого воздуха. Создан измерительный комплекс испытательные стенды для проведения автоматизированных испытаний ки прессорных агрегатов с УОСВ.

6. Созданы и запатентованы короткоцикловые адсорбционные устройс очистки и осушки сжатого воздуха. Проведены их стендовые, в том числе к матические, и эксплуатационные испытания. Концентрация парообразной вс на выходе из новых устройств очистки и осушки сжатого воздуха снижена лее чем в 10 раз по отношению к разработанным ранее отечественным ана гам. По всем характеристикам созданные устройства удовлетворяют нов требованиям к качеству сжатого воздуха пневматических систем железно рожного подвижного состава.

Разработанные УОСВ для пневматических систем подвижного состава : лезных дорог по качеству сжатого воздуха не уступают, а по энергетическ характеристикам превосходят мировые аналоги.

По результатам эксплуатационных испытаний Межведомственной ком сией принято решение об установке компрессорных агрегатов АКВ-4,5/1 ПУ разработанными нами системами подготовки сжатого воздуха СПВ 4,5/1 всех тепловозах 2ТЭ25К и 2ТЭ25А.

7. Проведено технико-экономическое сравнение эффективности приме ния на локомотивах различных устройств осушки сжатого воздуха на осн сопоставления стоимости жизненного цикла устройств, включающей затр: на приобретение и использование техники за весь срок службы локомотива.

Разработанные нами устройства осушки сжатого воздуха ГТ1.42.200.000 СПВ 4,5/1 имеют значительно более низкую стоимость жизненного цикла

сравнению с лучшими устройствами европейских производителей фирм «Knorr-Bremse» и «Domnick hunter» и следовательно, более эффективны, чем западно-европейские аналоги. Стоимость жизненного цикла разработанных нами одно-адсорберных устройств составляет около половины, а двухадсорберных около 80% стоимости жизненного цикла европейских аналогов.

Основные положения диссертационной работы опубликованы в работах:

1. Редин А.Л. Анализ методов подготовки сжатого воздуха для пневматических систем подвижного состава // Железнодорожный транспорт. – 2010. №3. С. 45–47.
2. Редин А.Л. Оптимизация устройств осушки сжатого воздуха в тормозных системах подвижного состава железных дорог // Вісник ДНУЗТ імені академіка В. Лазаряна. Випуск 15, Дніпропетровськ, 2007. С. 107–114.
3. Редин А. Л., Шаров В. Д. Сопоставление результатов математического моделирования работы компрессорного оборудования тепловоза 2ТЭ25А с результатами стационарных испытаний // Труды ВНИКТИ. «Создание тепловоза нового поколения с асинхронным тяговым электроприводом. Тепловоз 2ТЭ25А («Витязь») под редакцией Ю. В. Бабкова. – Коломна, 2009. Вып. 91. С. 203–224.
4. Мохов Н.Ф., Галкин А.Ю., Редин А.Л., Запольский А.И., Шаров В.Д., Добашин С.А. Отечественный модуль винтового компрессорного агрегата для тепловозов 2ТЭ25К, 2ТЭ25А // Труды ВНИКТИ. «Создание тепловоза нового поколения с асинхронным тяговым электроприводом. Тепловоз 2ТЭ25А («Витязь») под редакцией Ю.В. Бабкова. – Коломна, 2009. Вып. 91. С. 91–101.
5. Редин А.Л., Галкин А.Ю. Устройства подготовки сжатого воздуха для локомотивов // Локомотив. – 2008, №7. С. 20–22.
6. Редин А.Л., Михайлов Г.И., Добашин С.А., Мохов Н.Ф. Компрессорные агрегаты на модернизированных электровозах // Сборник докладов и статей Международной научно-практической конференции, посвященной 50-летию ВНИКТИ. «Современные тенденции развития подвижного состава железных дорог». – Коломна, 2008. Вып. 89. С. 149–160.
7. Редин А.Л. Оптимизация устройств осушки сжатого воздуха в тормозных системах подвижного состава железных дорог // Тезисы LXVI Международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития железнодорожного транспорта» 10.05.2006 г., Днепропетровск (Украина). С. 100–101.
8. Редин А.Л., Запольский А.И., Фонин В.А., Мохов Н.Ф. Выбор производительности и алгоритмов работы компрессорных установок электровозов на основе моделирования работы компрессоров в режиме реального времени // Труды ВНИКТИ. – Коломна, 2004. Вып. 83. С. 120–128.
9. Зубков В.Ф., Редин А.Л., Шевкунов Г.Н. Тормозная пневматическая система грузопассажирского электровоза ВЛ40П // Труды ВНИКТИ. – Коломна, 2004. Вып. 83. С. 56–63.
10. Редин А.Л., Запольский А.И. Выбор объема главных резервуаров, производительности и алгоритмов работы компрессорных установок электровозов на основе моделирования работы компрессоров. // Тезисы докладов IV Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электроподвижного состава» – Новочеркасск, 2003. С. 352–353.

11. Редин А.Л. Разработка способа количественной оценки газообразных примесей в сжатом воздухе пневматических систем локомотивов //Труды ВНИТИ. – Коломна, 2001, Вып. 81. С. 71–77.
12. Редин А.Л. Аналитическое определение значения температуры точки росы в пневматических системах //Труды ВНИТИ. – Коломна, 2000. Вып. 80. С. 79–85.
13. Редин А.Л., Максименко А.И. Повышение качества сжатого воздуха на поездах пригородного сообщения //Труды ВНИТИ. – Коломна, 2000. Вып. 80. С. 86–92. + Реферативный журнал ВНИТИ, сводный том № 11 «Железнодорожный транспорт»: М., 2002, реферат 02.11–11.Б.19. С 3.
и двух патентах на изобретения:
14. Редин А.Л., Ивановский И.Б. Устройство для получения очищенного и осушенного сжатого воздуха на транспортном средстве. Патент на изобретение. Россия N 2179263, приоритет 25.04.2001, патент 10.02.2002.
15. Редин А.Л. Способ измерения и контроля температуры точки росы влажного газа. Патент на изобретение. Россия N 2186374, приоритет 01.08.2000, патент 27.07.2002.

Редин Андрей Логинович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ УСТРОЙСТВ ОСУШКИ СЖАТОГО
ВОЗДУХА ДЛЯ ТОРМОЗНЫХ СИСТЕМ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА
ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**

05.22.07 – Подвижной состав железных дорог, тяга поездов и электрификация

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 2.11.2010. Формат бумаги 60x90 1/16
Заказ №29 , Тираж 80 экз. Объем 1,5 п.л.

127994, Россия, Москва, ГСП-4, ул. Образцова, 9, стр. 9. УПЦ ГИ МИИТ