

**Калугина Ольга Геннадьевна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНДЕНСАЦИОННО-  
АДСОРБЦИОННЫХ УСТАНОВОК ПОДГОТОВКИ ВОЗДУХА  
ДЛЯ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

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 – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Павлихин Геннадий Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, доцент  
Волкова Ольга Владимировна,  
профессор кафедры химии и  
молекулярной биологии, Санкт-Петербургский  
национальный исследовательский университет  
информационных технологий, механики и оптики

кандидат технических наук  
Чубаров Олег Евгеньевич  
ведущий специалист по машинам, аппаратам и  
процессам холодильной и криогенной техники,  
ЗАО «Криогенмонтаж»

Ведущая организация: ПАО «Криогенмаш»

Защита диссертации состоится «12» апреля 2017 года в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.16 при МГТУ им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, Лефортовская набережная, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте университета [www.bmstu.ru](http://www.bmstu.ru).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим присылать по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д.5, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.16.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2017 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент

Колосов М.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** В технологических процессах систем холодильной и криогенной техники, кондиционирования и жизнеобеспечения сжатый воздух находит широкое применение. В них он может выступать как в качестве источника энергии и/или исходного сырья, так и в качестве рабочей среды, агента и/или защитного газа. В системах подобного рода при решении ряда актуальных задач в области повышения экономичности, надежности и ресурса применяемого оборудования определяющее значение имеет промышленная чистота сжатого воздуха, особенно в части его влагосодержания. При этом устойчивое обеспечение требуемых параметров промышленной чистоты сжатого воздуха во многом зависит от эффективной работы оборудования по его подготовке.

Это в полной мере относится к системам содержания кабельных линий связи под избыточным воздушным давлением, где даже кратковременная подача воздуха в оболочки кабелей с повышенным влагосодержанием может не только ухудшать качество связи, но и способна приводить к полному выходу кабельных линий из строя. Основу данных систем составляют конденсационно-адсорбционные установки подготовки воздуха, в том числе с применением процессов короткоцикловой безнагревной адсорбции (КБА).

Существующая концепция научных основ разработки таких установок, как правило, базируется на принципах построения, характерных для единичных общепромышленных осушителей воздуха, что в эксплуатационных условиях указанных систем, характеризующихся сильной неопределенностью, не исключает возможности подачи воздуха с повышенным влагосодержанием в оболочки кабельных линий связи.

В результате, изучение общих свойств и принципов функционирования конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, включая совершенствования методов натурного и вычислительного моделирования протекающих в них процессов, с целью развития и реализации энергосберегающих технологий, а также поиска оптимальных решений по эффективности, надежности и ресурсу используемого оборудования в различных условиях его применения можно отнести к актуальным и практически значимым задачам.

**Целью настоящей работы** является создание эффективных конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха для кабельных линий связи.

**Методы исследования.** В работе использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические и модельные исследования проведены на кафедре экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана. Экспериментальные исследования проведены на базе ООО «Пневматические системы», г. Москва. Обработка экспериментальных данных проводилась прямыми и косвенными способами анализа с применением методов математической статистики, дисперсионного, корреляционного и регрессионного анализов.

### **Научная новизна:**

1. Впервые обоснована возможность описания сорбционных процессов, протекающих в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха, на основе многомодальной функции плотности распределения адсорбтива по слою адсорбента.
2. Установлено, что в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха распространение сорбционных фронтов по слою адсорбента может быть удовлетворительно описано на основе стационарных решений кинетического уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова с относительной погрешностью не более 20%.
3. Разработана вероятностно-статистическая модель описания сорбционных процессов в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха, способная учитывать влияние случайных составляющих протекающих процессов.
4. Найден явный вид функций распределения адсорбтива по слою адсорбента и показана возможность описания адсорбционных фронтов в конденсационно-адсорбционных установках с помощью двух независимых множеств адсорбтива, соответствующих выпуклым участкам изотермы адсорбции паров воды на силикагеле, на основе комбинированных комплексов  $m_I$  и  $m_{II}$ , характеризующих интенсивность случайных составляющих протекающих процессов  $B_I$  и  $B_{II}$ , по отношению к интенсивности их детерминированных составляющих  $k_I$  и  $k_{II}$ .
5. Получены количественные оценки основных характеристик конденсационно-адсорбционного метода подготовки воздуха на основе процессов КБА для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением в диапазоне 0,04-0,05 МПа с обеспечением абсолютной влажности воздуха на уровне 0,1-0,3 г/м<sup>3</sup>, при расходах осушенного воздуха не более  $1,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с.
6. Создана инженерная методика расчета конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, в том числе, обеспечивающая определение исходных данных для разработки процессов регулирования, управления и контроля, и прикладное программное обеспечение ее реализации.

### **Практическая значимость и реализация результатов работы:**

1. Создан универсальный экспериментальный стенд для комплексного исследования определяющих процессов подготовки воздуха.
2. Определены условия обеспечения устойчивости сорбционных фронтов в процессах КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию.
3. Разработан новый метод определения и контроля статической и динамической влагоемкости силикагеля, пригодный для применения непосредственно в условиях эксплуатации конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, обеспечивающих содержание кабельных линий связи под избыточным давлением.

4. Разработана и реализована усовершенствованная функциональная схема конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением.
5. Предложен усовершенствованный технологический цикл работы конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию силикагеля.
6. Результаты работы внедрены в ООО «Пневматические системы» г. Москва при усовершенствовании модельного ряда серийно выпускаемых компрессорно-сигнальных установок (КСУ) «Ультра-М» для содержания кабельных линий связи под избыточным воздушным давлением, что подтверждено актом о внедрении.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Вероятностно-статистическая модель процесса адсорбционной осушки воздуха силикагелем и результаты исследования ее асимптотических свойств (при  $t \rightarrow \infty$ ).
2. Набор определяющих показателей процесса осушки воздуха силикагелем в конденсационно-адсорбционных установках на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию, а также количественные оценки величин  $k_I \approx k_{II} \approx \text{const} \approx 0,0045 \text{ 1/с}$ , и  $D_I \approx D_{II} \approx 1 \cdot 10^{-4} - 7 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $D_{DI} \approx D_{DII} \approx 1 \cdot 10^{-4} - 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ , характеризующих соответственно интенсивность детерминированных и случайных составляющих протекающих процессов с относительной погрешностью не превышающей 15%.
3. Метод определения и контроля статической и динамической влагоемкости силикагеля, пригодный для применения непосредственно в эксплуатационных условиях конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, обеспечивающих содержание кабельных линий связи под избыточным давлением.
4. Результаты исследований процессов подготовки воздуха в установках для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением 0,04-0,05 МПа, при абсолютной влажности не более  $0,3 \text{ г/м}^3$  и расходом осушенного воздуха не более  $1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .
5. Технологический цикл работы и функциональная схема конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию силикагеля.
6. Методика инженерного расчета конденсационно-адсорбционных установок на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию силикагеля, повышающая не менее чем на 15%, по сравнению с существующими методиками расчета, точность оценки основных параметров технологических процессов подготовки воздуха.

#### **Личный вклад автора:**

1. Выполнены обзор и анализ научно-технических публикаций по процессам и установкам подготовки воздуха на основе КБА.

2. Разработана вероятностно-статистическая модель описания сорбционных процессов в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха, способная учитывать не только фактические свойства адсорбента, но и изменения в широких пределах как детерминированных, так и случайных составляющих протекающих процессов.
3. Проведены теоретические и экспериментальные исследования и найден набор определяющих комплексных показателей процессов, протекающих в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха.
4. Разработан новый алгоритм определения и контроля статической и динамической влагоемкости силикагеля, пригодный для применения непосредственно в эксплуатационных условиях конденсационно-адсорбционных установок для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением.
5. Разработаны рекомендации по совершенствованию функциональной схемы и технологического цикла работы конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию силикагеля и предложено техническое оформление их практической реализации.
6. Разработана инженерная методика расчета конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, в том числе обеспечивающая нахождение исходных данных для разработки процессов регулирования, управления и контроля, и прикладное программное обеспечение ее реализации.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационной работы обсуждались на заседаниях и научных семинарах кафедр холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, а также экологии и промышленной безопасности МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Кроме того, результаты работы докладывались на следующих конференциях: 13-ой научно-практической конференции «Криогенные технологии и оборудование. Перспективы развития» (Москва, 2016); Международной научно-практической конференции молодых ученых по проблемам техносферной безопасности в рамках первой всероссийской недели охраны труда (Москва, 2015); XXIV Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2016» (Москва, 2016); V Международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности – 2016» (Москва, 2016).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 7 научных работ (3,57 п.л./2,97 п.л.), в том числе 3 в ведущих научных рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для опубликования результатов диссертационных исследований.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, основных обозначений, списка литературы и приложения. Работа содержит 248 страниц основного текста, 72 рисунка, 6 таблиц и 147 наименований литературных источников.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определена область исследований и указана цель работы. Рассмотрены методы исследований, а также новизна и практическая ценность работы.

**В первой главе** рассмотрены основные методы подготовки сжатого воздуха и требования, предъявляемые к его промышленной чистоте. Установлено, что в эксплуатационных условиях кабельных линий связи, содержащихся под избыточным воздушным давлением, оправдано использование конденсационно-адсорбционных методов подготовки воздуха, в том числе на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию. Проанализированы основные технологические процессы этих методов и выявлены их определяющие параметры.

Выявлены особенности практического применения конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха в составе системы содержания кабельных линий городских телефонных сетей под избыточным давлением. Показано, что эти установки, получившие в области связи название компрессорно-сигнальных установок (КСУ), обеспечивают непрерывную подачу осушенного воздуха в оболочки кабелей связи под избыточным давлением 0,04-0,05 МПа с относительной влажностью не более 0,3 г/м<sup>3</sup>. Рассмотрено компоновочное и аппаратное оформление процессов подготовки сжатого воздуха в составе КСУ и выявлены их характерные отказы и неисправности [1].

Установлено, что внезапные, непрогнозируемые отказы и неисправности КСУ обусловлены негативным влиянием внешней среды, масштабных и субъективных факторов, которые характеризуются сильной неопределенностью, способной приводить к бесконтрольному снижению качества сжатого воздуха, подаваемого в оболочки кабелей.

Особо подчеркивается, что выявление и предупреждение подобных отказов и неисправностей требует проведения специальных теоретических и экспериментальных исследований физико-химических и термодинамических процессов, а также диапазонов изменения расходных характеристик и особенностей эксплуатации установок.

Рассмотрены основные подходы к описанию процессов подготовки сжатого воздуха. Констатируется, что существующие методики расчета конденсационно-адсорбционных установок, созданных на принципах построения общепромышленных осушителей, в рассматриваемых условиях применения и эксплуатации не отвечают современным потребностям и требуют своего теоретического и практического завершения.

На основании анализа технической литературы и требований практики сформулирована цель и поставлены следующие **задачи** диссертационной работы:

1. Разработка вероятностно-статистической модели описания сорбционных процессов в конденсационно-адсорбционных установках подготовки

воздуха на основе процессов КБА, способной учитывать влияние их случайных составляющих.

2. Создание экспериментального стенда, позволяющего осуществлять изменение параметров воздуха в диапазоне давлений от 10 до  $10^6$  Па с обеспечением абсолютной влажности воздуха на уровне 0,1-0,3 г/м<sup>3</sup>, при расходах осушенного воздуха не более  $1,3 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/с.
3. Проверка адекватности разработанной модели на основании сравнения расчетных и экспериментальных характеристик.
4. Разработка рекомендаций по совершенствованию функциональной схемы и технологического цикла конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением.
5. Создание инженерной методики расчета конденсационно-адсорбционной установки на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха.

**Во второй главе** представлены результаты теоретического исследования процесса подготовки воздуха в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением.

Разработана вероятностно-статистическая модель процесса осушки воздуха силикагелем [2], изучены ее асимптотические свойства и найдены основные определяющие параметры процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию. Применительно к КСУ, предложено описывать поведение сорбционных фронтов влаги в слое силикагеля с помощью двух независимых множеств адсорбтива, имеющих функции плотности распределения  $f_I(S, t_I)$  и  $f_{II}(S, t_{II})$ , которые соответствуют выпуклым участкам изотермы адсорбции и перемещаются по слою силикагеля с различными средними скоростями, где  $S$  – координата оси симметрии адсорбера,  $t_I$ ,  $t_{II}$  – время протекания процесса. Учитывая постоянное присутствие в рассматриваемых конденсационно-адсорбционных установках случайных составляющих  $\tilde{W}$  скорости движения фронта адсорбции  $W$  в слое адсорбента каждого из множеств адсорбтива, влиянием которых пренебречь нельзя, можно записать:  $W = W'(S, t) + \tilde{W}$ , где  $W'(S, t)$  – средняя детерминированная скорость движения каждого из множеств адсорбтива в слое адсорбента.

На основании кинетического уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова получено выражение для гидродинамической стадии эволюции рассматриваемой системы в виде:

$$\frac{\partial f(S, t)}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial S}(W'(S, t)f(S, t)) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2}(B_0(S, t)f(S, t)), \quad (1)$$

где  $W'(S, t) = W'(t) = W_0(t)/(1 + \rho_N da/dc)$  – средняя детерминированная скорость эволюции системы,  $B_0(S, t) = 2D^* = 2D/(1 + \rho_N da/dc)$  – интенсивность случайных составляющих протекающих процессов,  $W_0$  – средняя скорость движения потока воздуха,  $D^*$  – эффективный коэффициент продольного переноса,  $c$  –



текущая концентрация адсорбтива в потоке,  $a$  – равновесная ей величина адсорбции,  $\rho_N$  – насыпная плотность адсорбента.

Используя фактические характеристики равновесной величины адсорбции паров воды на силикагеле, величины скоростей  $W'_I(t_I)$  и  $W'_II(t_{II})$  для каждого из множеств адсорбтива были определены в виде (Рисунок 1):

$$W'_I(t_I) = W'_A(t_I) = W_0(t_I) \cdot c_I / (c_I + \rho_N a_I) \approx W_0(t_I) c_I / (\rho_N a_I), \quad (2)$$

$$W'_II(t_{II}) = W_0(t_{II}) / (1 + \rho_N (a_D - a_C) / (c_D - c_C)) \approx W_0(t_{II}) (c_D - c_C) / (\rho_N (a_D - a_C)). \quad (3)$$

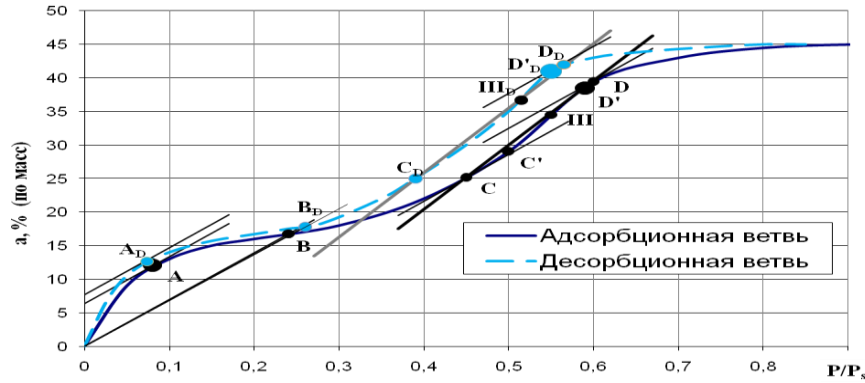


Рисунок 1. Фактический вид изотермы адсорбции паров воды на силикагеле

Это позволило получить следующие дифференциальные уравнения:

$$\frac{\partial f_I(S, t_I)}{\partial t_I} = -W'_I(t_I) \frac{\partial}{\partial S} f_I(S, t_I) + \frac{B_I}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f_I(S, t_I), \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_{II}(S, t_{II})}{\partial t_{II}} = -W'_{II}(t_{II}) \frac{\partial}{\partial S} f_{II}(S, t_{II}) + \frac{B_{II}}{2} \frac{\partial^2}{\partial S^2} f_{II}(S, t_{II}), \quad (5)$$

где  $B_I = 2D_I c_I / (c_I + \rho_N a_I) \approx 2D_I \frac{c_I}{\rho_N a_I}$ ;  $B_{II} = 2D_{II} / (1 + \rho_N \frac{a_D - a_C}{c_D - c_C}) \approx 2D_{II} \frac{c_D - c_C}{\rho_N (a_D - a_C)}$ .

После введения в уравнения (4) и (5) дополнительных членов, учитывающих влияние кинетической стадии эволюции рассматриваемой системы и нелинейность выпуклых участков изотермы адсорбции, для адсорбционных процессов было получено следующее решение для функции плотности распределения фронта адсорбции  $f(S, t)$ :

$$\begin{aligned} f &= f(S, t) = f_I(S, t_I) + f_{II}(S, t_{II}) = \\ &= C_I e^{k_I t_I} \left[ \frac{\pi B_I}{k_I} (e^{2k_I t_I} - 1) \right]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ - \frac{k_I ((S - \int W'_I(t_I) dt_I) e^{k_I t_I} - \xi_I)^2}{B_I (e^{2k_I t_I} - 1)} \right] f_{0,I}(\xi_I) d\xi_I + \\ &+ C_{II} e^{k_{II} t_{II}} \left[ \frac{\pi B_{II}}{k_{II}} (e^{2k_{II} t_{II}} - 1) \right]^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ - \frac{k_{II} ((S - \int W'_{II}(t_{II}) dt_{II}) e^{k_{II} t_{II}} - \xi_{II})^2}{B_{II} (e^{2k_{II} t_{II}} - 1)} \right] f_{0,II}(\xi_{II}) d\xi_{II}, \quad (6) \end{aligned}$$

где  $k_I$  и  $k_{II}$  – некоторые постоянные коэффициенты, входящие в дополнительные члены;  $C_I$  и  $C_{II}$  – некоторые постоянные, определяемые величиной нормировки соответствующего множества;  $f_{0,I}(\xi_I)$  и  $f_{0,II}(\xi_{II})$  – функции плотности распределения, задающие начальные условия.

Аналогичным образом, с учетом наличия петли гистерезиса, для десорбционных процессов было получено уравнение вида:

$$\begin{aligned}
f_D(S, t) &= f_{DI}(S_{DI}, t_{DI}) + f_{DII}(S_{DII}, t_{DII}) = \\
&= \frac{C_{DI}}{\sqrt{2\pi B_{DI} t_{DI}}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{((S - \int W'_{DI}(t_{DI}) dt_{DI}) - \xi_{DI})^2}{2B_{DI} t_{DI}} \right] f_{0,DI}(\xi_{DI}) d\xi_{DI} + \\
&+ \frac{C_{DII}}{\sqrt{2\pi B_{DII} t_{DII}}} \int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[ -\frac{((S - \int W'_{DII}(t_{DII}) dt_{DII}) - \xi_{DII})^2}{2B_{DII} t_{DII}} \right] f_{0,DII}(\xi_{DII}) d\xi_{DII}, \quad (7)
\end{aligned}$$

где индекс «D» характеризует введенные ранее определяющие величины, но в процессе десорбции.

В результате исследования асимптотических свойств предложенной модели в случае использования процессов КБА с регулируемым объемом осушенного воздуха, подаваемого на регенерацию, после завершения всех переходных процессов ( $t \rightarrow \infty$ ), для любого  $i$ -ого цикла КБА в моменты времени  $t_I \approx \frac{3}{2k_I}$  и  $t_{II} \approx \frac{3}{2k_{II}}$ , получены решения для адсорбционных и десорбционных процессов соответственно в виде:

$$\begin{aligned}
f^i(x_I^i, x_{II}^i) &= f_{\infty,I}^i(x_I^i) + f_{\infty,II}^i(x_{II}^i) = f_{\infty}^i(x_I^i, x_{II}^i) = \\
&= C_I \left[ \frac{2\pi b_I^i}{k_I^i} \right]^{-1/2} \cdot \exp \left[ -\frac{k_I^i x_I^{i2}}{2b_I^i} \right] + C_{II} \left[ \frac{2\pi b_{II}^i}{k_{II}^i} \right]^{-1/2} \cdot \exp \left[ -\frac{k_{II}^i x_{II}^{i2}}{2b_{II}^i} \right], \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
f_D^i(x_{DI}^i, x_{DII}^i) &= f_{\infty,DI}^i(x_{DI}^i) + f_{\infty,DII}^i(x_{DII}^i) = f_{\infty,D}^i(x_{DI}^i, x_{DII}^i) = \\
&= \frac{C_{DI}}{\sqrt{2\pi B_{DI}^i t_{DI}^i}} \exp \left[ -\frac{(x_{DI}^i)^2}{2B_{DI}^i t_{DI}^i} \right] + \frac{C_{DII}}{\sqrt{2\pi B_{DII}^i t_{DII}^i}} \exp \left[ -\frac{(x_{DII}^i)^2}{2B_{DII}^i t_{DII}^i} \right], \quad (9)
\end{aligned}$$

где  $b_I = B_I / 2$ ,  $b_{II} = B_{II} / 2$ ,  $x_I = S - \int W'_I(t_I) dt_I$ ,  $x_{II} = S - \int W'_{II}(t_{II}) dt_{II}$ ,  
 $x_{DI} = S - \int W'_{DI}(t_{DI}) dt_{DI}$ ,  $x_{DII} = S - \int W'_{DII}(t_{DII}) dt_{DII}$ .

Выдвинута гипотеза о наличии в процессах КБА с регулируемым объемом осушенного воздуха, подаваемого на регенерацию, статистических условий устойчивого динамического равновесия адсорбционных и десорбционных фронтов в слое адсорбента. Установлено, что в условиях, когда изменением свойств адсорбента можно пренебречь, процесс осушки воздуха можно представить в виде некоторой последовательности сорбционных процессов, обладающей свойствами асимптотической сходимости.

Выявлены определяющие параметры сорбционных процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию, и обоснована необходимость применения в расчетах системы управления процессами КБА, интегральных характеристик, полученных в режиме реального времени, на основе контроля точной дозировки малых объемов воздуха в каждом сорбционном цикле.

Полученные результаты позволили описать адсорбционные и десорбционные фронты в пространстве и времени в следующем виде:

$$c = c_W \left( \int_{X_I}^{\infty} f(x_I) dx_I + \int_{X_{II}}^{\infty} f(x_{II}) dx_{II} \right); \quad c_D = c_W \left( \int_{X_{DI}}^{\infty} f(x_{DI}) dx_{DI} + \int_{X_{DII}}^{\infty} f(x_{DII}) dx_{DII} \right), \quad (10)$$

где  $c_w$  – концентрация паров воды на входе в слой силикагеля.

Для процессов КБА уточнена методика определения динамической активности слоя адсорбента, способная учитывать, что в процессах КБА количество влаги, поступившее в адсорбер за полуцикл, значительно меньше того количества влаги, которое постоянно находится в слое адсорбента.

С целью оптимизации объемов воздуха, подаваемого на регенерацию, обеспечивающих повышение эффективности работы установок, а также исключающих потерю устойчивости сорбционных фронтов, и повышения эффективности работы системы управления КСУ, предложено рассчитывать определяющие термодинамические характеристики на основе политропных процессов, протекающих при переменном количестве вещества.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований физико-химических и термодинамических процессов, а также диапазонов изменения расходных характеристик, присущих конденсационно-адсорбционным установкам подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением. Определены количественные значения величин, входящих в предложенную вероятностно-статистическую модель. Выполнена оценка погрешностей результатов измерений и произведена проверка адекватности разработанной модели с установлением границ ее применимости.

Для проведения экспериментальных исследований был создан экспериментальный стенд (Рисунок 2), который включал в себя три основных блока: компрессорную группу, блок осушки и автоматики (с программируемым блоком управления) и блок измерений.



Рисунок 2. а) Общий вид экспериментального стенда; б) блок осушки и автоматики с программируемым блоком управления

Стенд позволяет, используя различные модификации компрессорных групп и рабочих участков, проводить экспериментальные исследования в автоматическом и полуавтоматическом режимах работы в диапазоне изменения расходов воздуха  $6 \cdot 10^{-7} - 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$  при избыточном давлении  $10 - 10^6 \text{ Па}$  с изменением относительной влажности осушаемого воздуха в пределах 5-98% и контролем влажности осушенного воздуха до температуры точки росы минус  $70^\circ\text{C}$ .

Разработана конструкция универсального рабочего участка, позволяющего изменять положение адсорбента без его разборки, что

существенно повышает эффективность проведения экспериментальных исследований.

В составе стенда был реализован новый способ обеспечения постоянной влажности сжатого воздуха, необходимый для определения статической и динамической влагоемкости силикагеля, непосредственно в условиях эксплуатации конденсационно-адсорбционных установок [3]. Данный способ, независимо от варианта его аппаратного оформления, позволил при изменении относительной влажности воздуха на входе в систему в пределах 90-98% обеспечивать постоянство поддержания относительной влажности воздуха с относительной погрешностью не более  $\pm 5\%$ . Представлен метод экспериментального определения статической и динамической влагоемкости силикагеля с применением предложенного способа.

Показано, что величина относительной погрешности различных модификаций предлагаемого способа не превышает 6-7% и не противоречит данным других исследователей, полученных известными методами (Рисунок 3а).

Экспериментально установлено, что влагоемкость мелкопористого силикагеля марки КСМГ различных поставщиков в статических условиях при относительной влажности воздуха менее 50% может отличаться более чем на 100% (Рисунок 3б). При этом, использование нормативных осредненных характеристик влагоемкости силикагеля при расчете, проектировании и эксплуатации конденсационно-адсорбционных установок для содержания кабелей связи под избыточным давлением следует признать не эффективным.

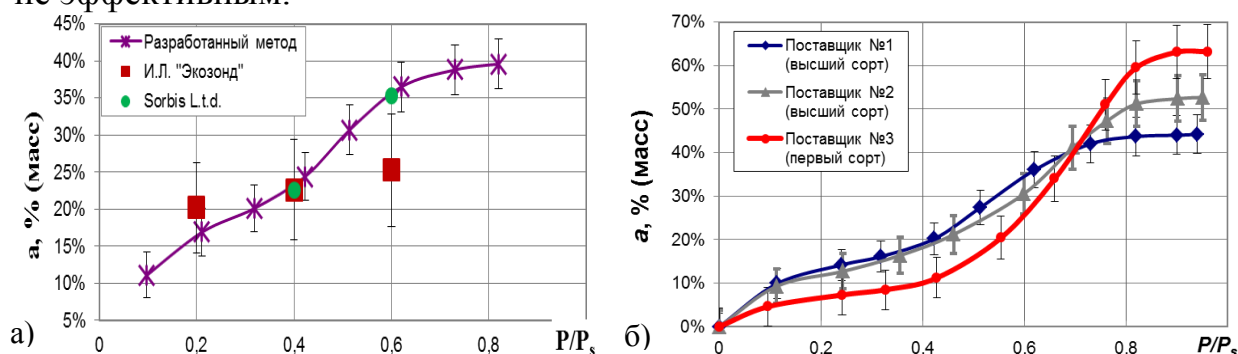


Рисунок 3. Средняя влагоемкость образцов промышленного мелкопористого силикагеля: а) производства SorbisGroup, б) российских поставщиков

Экспериментально установлено, что в исследуемом диапазоне изменений средней температуры воздуха  $16,3-40,2^\circ\text{C}$  статическая влагоемкость силикагеля марки КСМГ при постоянной относительной влажности воздуха приблизительно постоянна не зависимо от температуры, при которой происходит процесс поглощения (Рисунок 4а). Аналогичные результаты были получены и при изменении абсолютного давления воздуха в диапазоне  $0,1-0,6$  МПа (Рисунок 4б).

Исследование взаимосвязи между величинами влагоемкости силикагеля в первой точке перегиба изотермы адсорбции и его насыпной плотности показало, что насыпная плотность мелкопористого силикагеля

может рассматриваться лишь в качестве косвенной и качественной характеристики его влагоемкости.

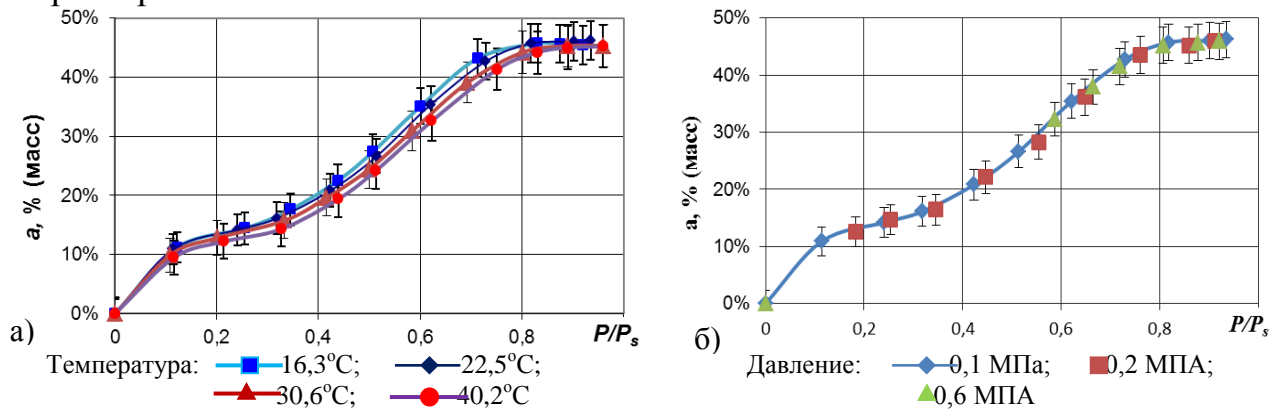


Рисунок 4. Средняя влагоемкость образца силикагеля в статических условиях  
а) при различных температурах; б) при различном давлении воздуха

Определение динамической активности силикагеля позволило сделать вывод, что в процессах КБА она может более чем в 3 раза отличаться от его динамической активности в процессах с термической регенерацией (Рисунок 5).

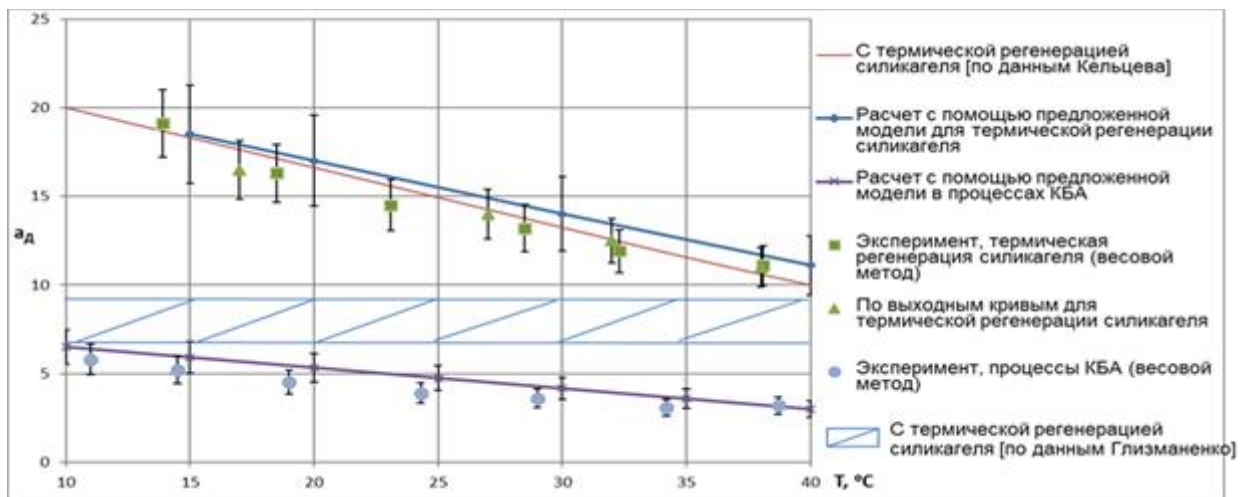


Рисунок 5. Результаты определения динамической активности слоя силикагеля

В результате обработки результатов исследований кинетической стадии эволюции каждого из рассматриваемых множеств адсорбтива, для исследуемого диапазона контрольной относительной влажности, было получено эмпирическое выражение для конечного значения глубины проникновения адсорбтива  $S_0$  в кинетическом процессе в виде:

$$S_0 = Re_d \cdot 10^{-4} + 0,0637 - 0,0404\varphi, \quad (11)$$

где  $Re_d = W_0 d_u \rho / \mu$ ,  $d_u$  – средний диаметр частиц адсорбента,  $\rho$  – плотность воздуха,  $\mu$  – динамическая вязкость потока воздуха,  $\varphi$  – величина контрольной относительной влажности.

Следует особо подчеркнуть, что в современных методиках расчета конечное значение глубины проникновения адсорбтива в кинетическом процессе  $S_0$ , включая высоту неработающего слоя адсорбента, прямыми методами не учитывается, а закладывается в соответствующие

коэффициенты запаса. Однако, применительно к процессам КБА, при малых высотах слоя сорбента, подобный подход следует признать необоснованным, поскольку это может приводить к ошибкам в проектировании и иметь серьезные последствия. Это заставило внести соответствующие корректировки в разработанную модель.

В результате исследований кинетической стадии эволюции рассматриваемой системы экспериментально подтверждена возможность использования допущения о постоянстве времени завершения кинетической стадии эволюции исследуемой системы. Установлено, что величины  $k_I$  и  $k_{II}$ , входящие в разработанную модель, могут быть определены через длительности  $t'_I$  и  $t'_{II}$  кинетической стадии эволюции каждого из рассматриваемых множеств адсорбтива в виде:  $k_I = 3/2t'_I$  и  $k_{II} = 3/2t'_{II}$ . Показано, что в рамках предложенной модели для процессов КБА и процессов с термической регенерацией величины  $k_I$  и  $k_{II}$  можно считать постоянными и равными друг другу, с относительной погрешностью не превышающей 8%. Однако их количественные значения для процессов с термической регенерацией и процессов КБА отличаются более, чем в 3 раза ( $k_I \approx k_{II} \approx \text{const} \approx 0,0155$  1/с и  $k_I \approx k_{II} \approx \text{const} \approx 0,0045$  1/с соответственно).

Экспериментально показано, что интенсивность случайных составляющих адсорбционных и десорбционных процессов в конденсационно-адсорбционных установках на основе процессов КБА в основном определяется гидродинамикой соответствующих потоков.

Для определения коэффициентов  $B_I$ ,  $B_{II}$  и  $B_{DI}$ ,  $B_{DII}$ , используемых в предложенной модели для характеристики интенсивности случайных составляющих адсорбционных и десорбционных процессов соответственно, было предложено использовать аппроксимационную зависимость для эффективных коэффициентов продольного переноса рассматриваемых множеств в процессах адсорбции ( $D_I$ ,  $D_{II}$ ) и десорбции ( $D_{DI}$ ,  $D_{DII}$ ) в виде:

$$D_i = d_q W / 2 + D_3, \quad (12)$$

где  $D_3$  – эффективный коэффициент диффузии.

Последующая обработка экспериментальных данных в критериальной форме позволила получить в исследуемом диапазоне изменения рабочих параметров для адсорбционных и десорбционных процессов соответственно эмпирические зависимости вида:

$$D_I = D_{II} = 2 \cdot 10^{-6} \text{ Re}_d + 3 \cdot 10^{-6}, \quad D_{DI} = D_{DII} = 8 \cdot 10^{-6} \text{ Re}_d + 1 \cdot 10^{-5}. \quad (13)$$

Полученные результаты предоставили возможность произвести проверку адекватности предложенной модели и найти границы ее применимости для конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, обеспечивающих содержание кабельных линий связи под избыточным давлением (Рисунок 6).

В результате был сделан вывод, что для сорбционных процессов длительностью от 240 с до 6 ч предложенную вероятностно-статистическую модель можно признать адекватно описывающей все определяющие физико-химические параметры конденсационно-адсорбционных установок



подготовки воздуха на основе процессов КБА. Установлено, что относительная погрешность расчетов с помощью предложенной модели в рассматриваемом диапазоне изменения параметров не превышает 10%.

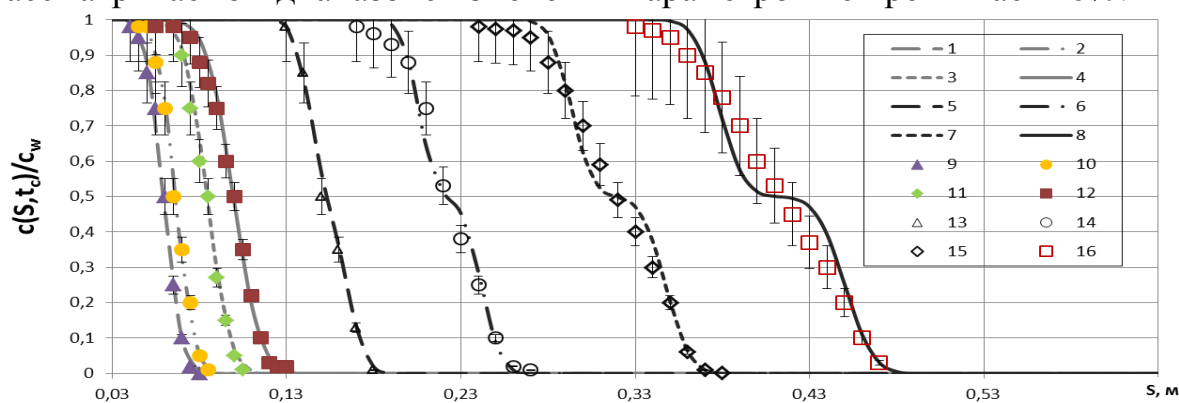


Рисунок 6. Динамика адсорбционных фронтов при расходах воздуха 30, 50, 75, 100 ндм<sup>3</sup>/мин и времени адсорбции 300с – модель 1-4; эксперимент 9-12; при времени адсорбции 21600с – модель 5-8; эксперимент 13-16

Проведенные исследования позволили выполнить оценки величин  $C_1$  и  $C_2$ , входящих в разработанную модель на уровне  $C_1 \approx C_2 \approx \text{const} \approx 0,5$ , что позволяет использовать ее для описания большинства процессов КБА.

Выполнен анализ влияния негативных факторов на надежность работы конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию [4]. Установлено, что основной причиной возникновения их внезапных, непрогнозируемых отказов является существенная деформация и потеря устойчивости сорбционных фронтов в условиях предельных расходов обрабатываемого воздуха, обусловленная не только недостаточным объемом воздуха, подаваемого на регенерацию, но и одновременным воздействием повышенных температур рабочих процессов и снижением качества применяемого адсорбента (Рисунок 7).

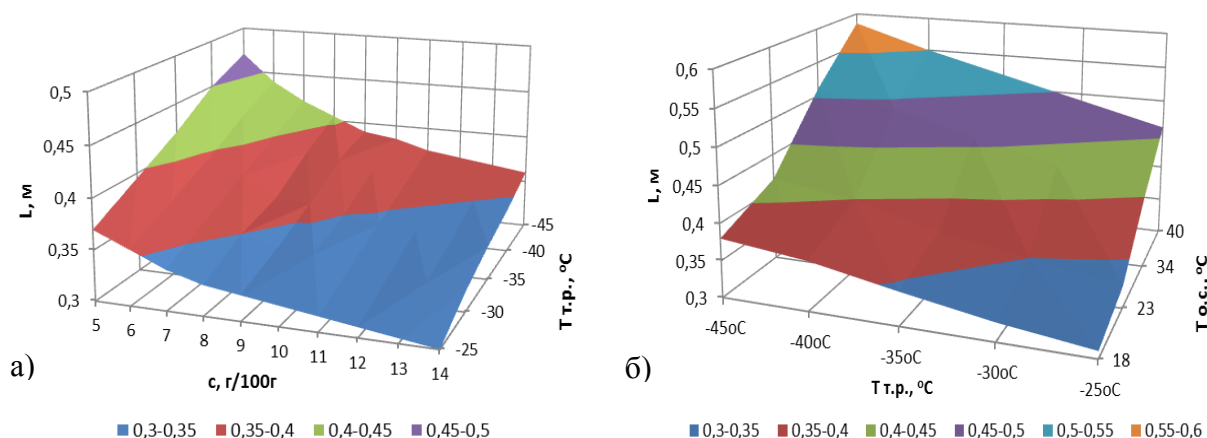


Рисунок 7. Влияние негативных факторов на высоту работающего слоя силикагеля: а) в зависимости от влагоемкости силикагеля в первой точке перегиба изотермы адсорбции; б) в зависимости от рабочих температур

При оценке ресурсных характеристик слоя силикагеля были получены эмпирические зависимости для продвижения «центра тяжести» сорбционных

фронтов паров воды  $L_M$  и величины деформации фронта адсорбции паров воды  $a_I'$  в процессе эксплуатации силикагеля за счет его загрязнения следами компрессорного масла в виде:

$$L_M = \frac{\alpha_M C_M}{F(1 - \Pi_{УКЛ}) \Pi_3 \rho_M} V_{обр}, \quad a_I' = a \left( 1 - \frac{k_M C_M}{V_A \rho_M} V_{обр} \right), \quad (14)$$

где  $L_M$  – текущее положение «центра тяжести»;  $\alpha_M$  и  $C_M$  – коэффициенты необратимого сорбирования и средняя концентрация следов компрессорного масла;  $V_{обр}$  – объем обработанного воздуха;  $F$  и  $V_A$  – площадь поперечного сечения и объем адсорбера;  $\Pi_{УКЛ}$  и  $\Pi_3$  – средняя пористость слоя засыпки и зерен силикагеля;  $\rho_M$  – средняя плотность следов компрессорного масла,  $a_I'$  и  $a_I$  – текущая и исходная величины адсорбции в первой точке перегиба изотермы адсорбции;  $k_M$  – постоянный коэффициент.

Для нахождения границ устойчивости сорбционных фронтов были проведены экспериментальные исследования по определению интегральных характеристик, полученных в режиме реального времени, с помощью контроля точной дозировки малых объемов воздуха в каждом сорбционном цикле, на основе использования политропных процессов, протекающих при переменном количестве вещества. Представлены методики определения показателей политропы  $m$  для различных режимов работы ресивера компрессорной группы и даны их локальные количественные оценки для конкретного аппаратного оформления (Рисунок 8).

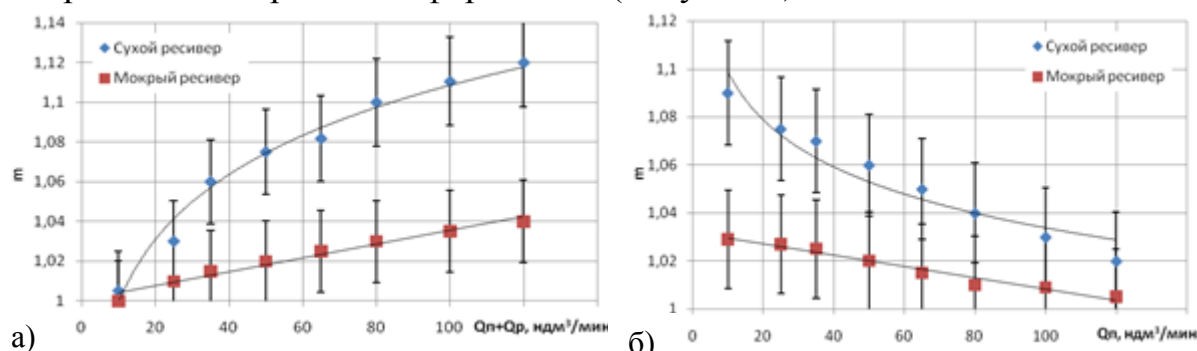


Рисунок 8. Количественные оценки показателя политропы:

а) в процессах расширения, б) в процессах сжатия

Установлено, что использование коэффициента запаса в зависимостях по определению объема воздуха, подаваемого на регенерацию, на уровне 1,05-1,08 обеспечивает устойчивую и эффективную работу установок на основе процессов КБА на всех расчетных режимах. При этом показано, что при длительностях процесса регенерации менее 80-100 с его эффективность снижается настолько сильно, что не может быть компенсирована используемыми коэффициентами запаса, что приводит к потере устойчивости сорбционных фронтов.

Отмечается, что в предельных режимах работы установок выявленные деформация и потеря устойчивости сорбционных фронтов не могут быть компенсированы с помощью традиционных инженерных решений без существенного снижения эффективности протекающих процессов.



**В четвертой главе** проанализированы основные направления совершенствования конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха для кабельных линий связи.

Представлены рекомендации по усовершенствованию функциональной схемы конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха на основе процессов КБА с регулируемым объемом воздуха, подаваемого на регенерацию, а также усовершенствованный технологический цикл ее работы, циклограммы которого приведены в приложении.

Проанализированы отличительные особенности инженерной методики расчета конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха на основе процессов КБА и разработаны основные этапы ее реализации. Приведены блок-схемы методики расчета основных технологических характеристик оборудования установок, детализация которых представлена в приложении. С целью оптимизации определяющих параметров как на расчетных, так и на нерасчетных режимах работы установки предложена методика моделирования протекающих процессов на основе разработанной вероятностно-статистической модели.

Представлены блок-схема методики определения исходных данных для разработки процессов управления, регулирования и контроля, а также практические результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Теоретически показана и экспериментально подтверждена возможность описания сорбционных процессов, протекающих в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха, на основе многомодальной функции плотности распределения адсорбтива по слою адсорбента.
2. Установлено, что в конденсационно-адсорбционных установках подготовки воздуха распространение сорбционных фронтов влаги по слою силикагеля может быть удовлетворительно описано на основе стационарных решений кинетического уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова с относительной погрешностью не более 20%.
3. Найден явный вид функций распределения адсорбтива по слою адсорбента и показана возможность описания адсорбционных фронтов с помощью комбинированных комплексов, характеризующих интенсивность случайных составляющих протекающих процессов по отношению к интенсивности их детерминированных составляющих.
4. Разработан новый метод определения и контроля статической и динамической влагоемкости силикагеля, пригодный для применения непосредственно в эксплуатационных условиях конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, обеспечивающих содержание кабельных линий связи под избыточным давлением.

5. Разработаны и реализованы усовершенствованные технологический цикл и функциональная схема конденсационно-адсорбционной установки подготовки воздуха для содержания кабельных линий связи под избыточным давлением.
6. Создана инженерная методика расчета конденсационно-адсорбционных установок подготовки воздуха, в том числе, обеспечивающая определение исходных данных для разработки процессов регулирования, управления и контроля, и прикладное программное обеспечение ее реализации.

#### **Публикации по теме диссертации:**

1. Гапонюк Н.А., Калугина О.Г., Львов В.А. Влияние масштабных и субъективных факторов на работу технических систем обеспечения безопасности технологических процессов с использованием защитного газа // Безопасность в техносфере. 2015. № 4. С. 16-23 (0,78 п.л./0,60 п.л.).
2. Павлихин Г.П., Львов В.А., Калугина О.Г. Вероятностно-статистическая модель процесса осушки воздуха в установках для содержания оболочек под избыточным давлением // Безопасность в техносфере. 2012. № 6. С. 20-27 (0,62 п.л./0,48 п.л.).
3. Павлихин Г.П., Львов В.А., Калугина О.Г. Оценка влагоемкости силикагеля для обеспечения безопасной эксплуатации пневматических систем // Безопасность в техносфере. 2014. № 6. С. 43-52 (1,07 п.л./0,81 п.л.).
4. Калугина О.Г. Обеспечение безопасного содержания объектов под избыточным давлением с помощью адсорбционных установок подготовки воздуха // Материалы V международной научно-практической конференции молодых ученых и специалистов «Проблемы техносферной безопасности-2016». М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. С. 226-231 (0,33 п.л./0,33 п.л.).
5. Калугина О.Г. Обобщенная модель процесса осушки воздуха силикагелем // Молодежный научно-технический вестник. 2013. № 10. [Электронный ресурс]. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/634791.html>. (дата обращения: 07.09.2016) (0,31 п.л./0,31 п.л.).
6. Калугина О.Г., Павлихин Г.П. Влияние масштабных и субъективных факторов на безопасность работы источников защитного газа с адсорбционной очисткой сжатого воздуха // Международная научно-практическая конференция молодых ученых по проблемам техносферной безопасности в рамках первой всероссийской Недели охраны труда: материалы конференции. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. С. 110-113 (0,16 п.л./0,14 п.л.).
7. Калугина О.Г. Анализ отказов источников защитного газа с адсорбционной очисткой сжатого воздуха // Молодежный научно-технический вестник. 2016. №2. [Электронный ресурс]. URL: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/836308.html> (дата обращения: 25.08.2016) (0,30 п.л./0,30 п.л.).