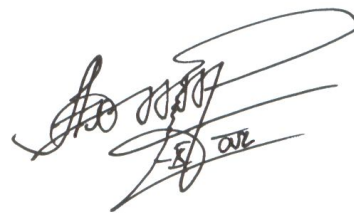


На правах рукописи



Хушвактов Алишер Асанович

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОЧЕГО РЕСУРСА АГРЕГАТОВ
ПАРОВОДЯНОГО ТРАКТА ТЭС ПУТЕМ ВОЗДУШНОЙ
КОНСЕРВАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛИКАГЕЛЯ**

05.14.14 – Тепловые электрические станции, их
энергетические системы и агрегаты

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2014

Диссертация выполнена на кафедрах «Теплотехника и теплотехническое оборудование» Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими и «Теоретической и промышленной теплотехники» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научные руководители: **Сафаров Махмадали Махмадиевич**,
доктор технических наук, профессор,
член-корр. МИА
Голдаев Сергей Васильевич,
доктор физико-математических наук.

Официальные оппоненты: **Таиров Эмир Асгадович**, доктор технических наук, профессор, ИрГСХА (г. Иркутск),
кафедра энергообеспечения и теплотехники,
профессор.

Верховский Андрей Евгеньевич, кандидат технических наук, НИУ МЭИ (г. Москва),
кафедра технологии воды и топлива, н.с.

Ведущая организация: ФГБУН «Институт теплофизики
им. С. С. Кутателадзе СО РАН»
(г. Новосибирск).

Защита состоится 26 декабря 2014 г. в 12⁰⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.269.13 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, ул. Белинского, 55 и на сайте <http://portal.tpu.ru/council/2803/worklist>.

Автореферат разослан «28» октября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 212.269.13
кандидат технических наук



А. С. Матвеев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Опыт эксплуатации тепловых электрических станций (ТЭС) показывает, что при плохой консервации их агрегатов конденсация влаги, содержащейся в воздухе и газах, во время останова со снижением давления среды до атмосферного и попадании во внутренний объем кислорода воздуха вызывает стояночную атмосферную коррозию (САК) углеродистой стали.

Поэтому возникает многосторонняя проблема защиты агрегатов ТЭС при простоях от САК, успешное решение которой позволит повысить рабочий ресурс агрегатов ТЭС, уменьшить материальные потери в результате коррозии металлов, снизить загрязнение окружающей среды.

Перспективным является решение этой задачи путем использования для консервации агрегатов ТЭС адсорбентов (силикагелей, цеолитов и т.п.), которые широко применяются при сушке и разделении газов и жидкостей, в процессах очистки химических веществ, в различных отраслях промышленности.

Для совершенствования технологических процессов осушения воздуха необходимы методики расчетов, базирующиеся на использовании численных методов и информации о теплофизических свойствах (ТФС) адсорбентов-осушителей в широкой области изменения параметров состояния. Применение номограмм, графических методов решения нелинейных уравнений и вычисления определенных интегралов, использование приближенных данных по свойствам веществ в таких расчетах приводит к существенному завышению материалоемкости установок, снижению их надежности и технико-экономических показателей. Поэтому, дальнейшее уточнение методов расчета с привлечением достоверных характеристик адсорбентов в широком температурном диапазоне представляет собой значительный резерв осушения воздуха в схемах консервации агрегатов ТЭС.

Объект исследования: схема воздушной консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС на основе силикагеля, повышающая их рабочий ресурс.

Цель диссертационной работы: Анализ возможности повышения рабочего ресурса агрегатов пароводяного тракта ТЭС за счет усовершенствования использования силикагеля в схеме осушения влажного воздуха.

Сформулированную цель планировалось достичь решением следующих задач:

- 1) Систематизация информации по причинам возникновения САК на металлических поверхностях агрегатов пароводяного тракта ТЭС и техническим решениям по снижению отрицательных последствий;
- 2) Параметрический анализ влияния внешних условий на габаритно-массовые характеристики устройств на основе силикагеля для осушения воздуха, заполняющего свободное пространство в агрегатах пароводяного тракта ТЭС;
- 3) Усовершенствование методов расчета характеристик адсорбционных установок осушения влажного воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС за счет привлечения численных алгоритмов;
- 4) Экспериментальные исследования ТФС силикагеля в интервале температур 300...573 К, необходимые для количественного анализа возможностей осуществления поглощения адсорбентом паров воды, имеющихся в агрегатах пароводяного тракта ТЭС, а также проведения десорбции;

5) Разработка рекомендаций по повышению рабочего ресурса агрегатов пароводяного тракта ТЭС за счет воздушной консервации с использованием силикагеля.

Соответствие паспорту специальностей: диссертация соответствует п. 2 «Исследования и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций», п. 4 «Разработка конструкций теплового и вспомогательного оборудования и компьютерных технологий их проектирования и диагностирования», п. 5 «Повышение надежности и рабочего ресурса агрегатов, систем и тепловых электростанций в целом» паспорта специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты», и п. 1 «Экспериментальные исследования термодинамических и переносных свойств чистых веществ и их смесей в широкой области параметров состояния» паспорта специальности 01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника».

Научная новизна работы: предложена и обоснована схема адсорбционной установки для осушения влажного воздуха в агрегатах ТЭС, не включающая десорбцию силикагеля, что упрощает и удешевляет процедуру консервации; получены значения ТФС силикагелей с размерами гранул 2,85...5,8 мм при температурах 300...573 К и давлениях 0,15...0,35 МПа; установлено, что теплопроводность исследованных адсорбентов с ростом температуры монотонно увеличивается, при температуре ~420 К удельная массовая теплоемкость имеет максимальное значение, а температуропроводность – минимальное.

Практическая значимость работы:

- предложена схема воздушной консервации агрегатов ТЭС адсорбентами на основе силикагеля, исключая стадию десорбции, которая может быть использована и в других установках осушения влажного воздуха при аналогичных условиях;
- усовершенствованы и реализованы на Турбо Паскале методики расчета характеристик адсорбентов, которые могут использоваться в проектных организациях и в учреждениях высшего образования при изучении дисциплин «Вспомогательное оборудование ТЭС», «Тепло-массообменные аппараты». Определены на разработанных автором диссертации экспериментальных установках теплофизические и диффузионные свойства адсорбентов на основе силикагеля в интервале температур (300...573) К, давлений (0,15...0,35) МПа (для бародиффузии);
- результаты экспериментов обобщены в виде аппроксимационных зависимостей, которые могут использоваться проектными организациями при разработке различных теплотехнологических установок с использованием этих материалов.

Достоверность полученных результатов подтверждена:

- подтверждается: расчетными данными, полученными при тестировании физико-математических моделей функционирования установок осушения воздуха в агрегатах ТЭС с использованием силикагеля;
- использованием апробированных и протестированных измерительных приборов, высокой воспроизводимостью результатов измерений, а также удовлетворительным согласием опытных данных с расчетными;
- хорошим соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований теплофизических и диффузионных свойств адсорбентов на основе силикагеля в зависимости от температуры и давления.

Результаты исследований внедрены: Предложенная схема осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС находится на стадии проверки в промышленных условиях на АООТ «Душанбинская ТЭЦ». Созданная аппаратура для измерения диффузионных свойств дисперсных материалов и методика обработки результатов, программы расчета характеристик адсорбционных установок, используются в научных и учебных лабораториях кафедр «Теплотехника и теплотехническое оборудование» Таджикского технического университета им. академика М. С. Осими и филиала Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Душанбе, «Теоретическая и промышленная теплотехника» Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Связь работы с научными и государственными программами: Диссертационные исследования выполнены в рамках проекта «Создание системы многоуровневой подготовки кадров на базе образовательных учреждений Томской области для обеспечения потребностей российско-центральноазиатского социально-экономического сотрудничества в условиях развития процессов евразийской интеграции» между Ассоциацией некоммерческих организаций «Томский консорциум научно-образовательных и научных организаций» и Минобрнауки РФ; научно технической программы «Теплофизика и теплоэнергетика» по направлению научной деятельности Таджикского технического университета имени академика М. С. Осими. Тема диссертации соответствует приоритетному направлению развития науки и энергетики в РФ, принятому закону № 529 от 6 февраля 2002 года «Об энергосбережении» и указу Президента РФ от 24 апреля 2009 года «О дополнительных мерах по экономному использованию энергии и энергосбережения», приоритетному направлению развития науки, техники и технологии РФ – «Энергоэффективность, энергосбережение и ядерная энергетика», часть материалов диссертация получена в рамках хоздоговора № 203 от 02.10.2013 с АООТ «Душанбинская ТЭЦ».

Научные положения, выносимые на защиту:

- габаритно-массовые и эксплуатационные характеристики осушительных устройств на основе силикагеля для снижения концентрации паров воды в агрегатах пароводяного тракта ТЭС, обоснованные результатами расчетов по уточненным методикам;
- усовершенствованные методики прогнозирования различных схем осушения воздуха адсорбентами на основе силикагеля и восстановление их поглощательной способности;
- экспериментальные значения теплофизических свойств силикагеля при температурах (300–573) К, необходимые при количественной оценке его теплотехнических и эксплуатационных возможностей в схемах воздушной консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС.

Личный вклад автора состоит в расчетах по инженерным методикам габаритно-массовых характеристик устройств осушения воздуха пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля, предложение и его обоснование по конструктивному упрощению установки за счет исключения стадии десорбции; проведение экспериментов, обработка результатов в относительных переменных и их аппроксимация методом наименьших квадратов; разработка рекомендаций практического использования полученных данных; формулировка положений и выво-

дов, выносимых на защиту. Разработка цели исследований и ее реализация на различных стадиях выполнены при участии научных руководителей.

Апробация работы: Основные положения и результаты, представленные в настоящей диссертационной работе, докладывались и обсуждались на международных научно-технических конференциях: «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии», (г. Душанбе, 2011); «Энергобезопасность и энергоэффективность: состояние и проблемы», (г. Бишкек, 2011); «Композиционные строительные материалы, теория и практика», (Пенза, 2011); 18th Symposium on Thermophysical Properties, (Boulder, USA, 2012), 10th Asia Thermophysical Properties Conference, (ATPC, – Daejeon, South Korea, 2013), Восьмой Международной теплофизической школе «Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг», (Душанбе, 2012); «Экономическое использование природных ресурсов в энергетике и промышленности», (Курган-Тюбе, 2012), «Современные технологии в электроэнергетике и промышленности», (Худжанд, 2012), «Перспективы энергетики Таджикистана» (Душанбе, 2011), «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2013), XIX всероссийской научно-технической конференции «Энергетика, Эффективность, надежность, безопасность» (Томск, 2013) «Теплофизические проблемы энергетических технологий» (Томск, 2014), Девятой Международной теплофизической школе «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (Душанбе, 2014).

Публикации: Основное содержание диссертации представлено в 26 печатных работах, из них 7 в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ для публикации научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и 2 патента Республики Таджикистан.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы. Диссертация изложена на 156 страницах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 64 таблицы, 148 наименований источников литературы и 15 страниц приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснованы актуальность и практическая значимость, сформулирована цель и задачи исследования, новизна полученных результатов, положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** проведен анализ данных по процессам и технологическим особенностям осушения воздуха в агрегатах пароводяного тракта ТЭС и силовом оборудовании. Отмечено, что для консервации агрегатов ТЭС применяются ингибиторы, создающие защитные пленки, покрывающие все участки металлических поверхностей агрегатов, используется инертный газ, снижается относительная влажность воздуха, достигаемая нагреванием воздуха. Реализация перечисленных способов, связана с большими затратами электрической энергии.

Сформулированы задачи по выполнению оценки эффективности воздушной консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС с использованием силикагеля, структура и масштабы производства которого могут оказать решающее влияние эффективность

его использования в этой операции, дальнейших экспериментальных исследований теплофизических свойств зернистых материалов, необходимых для такого анализа.

Во **второй главе** на основе уточненных методик расчета характеристик выполнен анализ эффективности адсорбционных установок на основе силикагеля, предлагаемых для воздушной консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС.

В рамках термодинамического подхода оценена масса адсорбента M_a , которую можно будет использовать для поглощения паров воды из воздуха, находящегося при давлении p_b в свободном пространстве агрегата пароводяного тракта ТЭС, имеющем вместимость V_b при относительной влажности φ_1 и температуре T_{b1} . Согласно техническим условиям консервации, для предотвращения образования налета ржавчины, агрегат может находиться при влажности φ_2 и температуре T_{b2} . Поглощающая способность 1 кг адсорбента (силикагеля) принималась равной g_{ps} воды.

Удельное влагосодержание при φ_1 находилось по формуле

$$d_1 = 0,622 \cdot p_{v1} / (p_b - p_{v1}), \text{ кг}_\Pi / \text{кг}_{\text{св}}, \quad (1)$$

где $p_{v1} = \varphi_1 p_s$ – парциальное давление пара при относительной влажности φ_1 .

Зависимость давления насыщения пара от температуры учитывалась аппроксимационной зависимостью

$$p_s = 10^{10,95 - 2224/T_b}, \quad (2)$$

имеющей погрешность около 10 % при $T_b = 273 \text{ К}$ и 0,8 % – при $T_b = 313 \text{ К}$.

Аналогично вычислялось удельное влагосодержание при φ_2

$$d_2 = 0,622 \cdot p_{v2} / (p_b - p_{v2}), \text{ кг}_\Pi / \text{кг}_{\text{св}}.$$

Здесь $p_{v2} = \varphi_2 p_s$ – парциальное давление пара при φ_2

Количество образовавшейся воды, приходящейся на 1 кг сухого воздуха,

$$\Delta d = d_1 - d_2, \text{ кг}_\Pi / \text{кг}_{\text{св}}. \quad (3)$$

Масса воздуха, заполняющего свободное пространство в агрегате пароводяного тракта ТЭС, находилась из уравнения состояния идеального газа

$$M_b = p_b V_b / R_b T_{b1}, \text{ кг}.$$

Масса воды, которую требуется поглотить,

$$M_w = M_b \Delta d, \text{ кг}. \quad (4)$$

Тогда необходимая масса адсорбента

$$M_c = M_w / g_{ps}, \text{ кг}. \quad (5)$$

Для базового варианта вместимость резервуара была принята равной 100 м^3 . В ходе параметрического анализа варьировались φ_1 , φ_2 , g_{ps} и T_{b1} , результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 Результаты расчетов при $\varphi_1 = 0,98$ и $g_{ps} = 0,2$, $T_{b1} = 303 \text{ К}$

Конечная влажность, %	0,40	0,35	0,30	0,25	0,20
M_w , кг	1,79	1,94	2,09	2,24	2,39
M_a , кг	7,15	7,76	8,35	8,95	9,54
$T_{b1} = 288 \text{ К} (15 \text{ }^\circ\text{C})$					
M_w , кг	0,76	0,82	0,88	0,95	1,01
M_a , кг	3,02	3,27	3,53	3,79	4,05

Видно, что для осушения воздуха с $\varphi_1 = 98\%$ силикагелем, имеющим низкую поглощательную способность ($g_{ps} = 0,2$), максимальное значение требуемой его массы составляет 9,54 кг. Для реальных агрегатов пароводяного тракта ТЭС, например, котла БКЗ-210-140 с общим объемом 94 м³ потребуется 9 кг.

В рамках модели адсорбционной установки с кипящим слоем для осушения влажного воздуха с объемным расходом, соответствующем промышленным адсорберам, определена требуемая масса силикагеля 7...12 кг, однако поддержание кипящего слоя требует его конструктивного усложнения и энергетических затрат.

На рисунке 1 отражено влияние объемного расхода воздуха на массу силикагеля. Результаты варьирования начальной концентрации паров воды, содержащихся в воздухе, на требуемую M_c , представлены на рисунке 2. Такое поведение кривой объясняется зависимостью объема адсорбента от коэффициента массообмена, $W_a \sim 1/\beta_{0v}$, а значение β_{0v} , вычисленное по критериальному уравнению, возрастает от 440 (при $C_0 = 0,0038$ кг/м³) до 612 1/с (при $C_0 = 0,0098$ кг/м³).

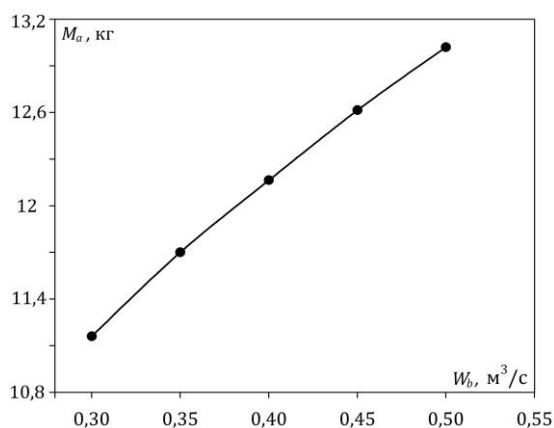


Рисунок 1. Зависимость массы силикагеля от объемного расхода воздуха

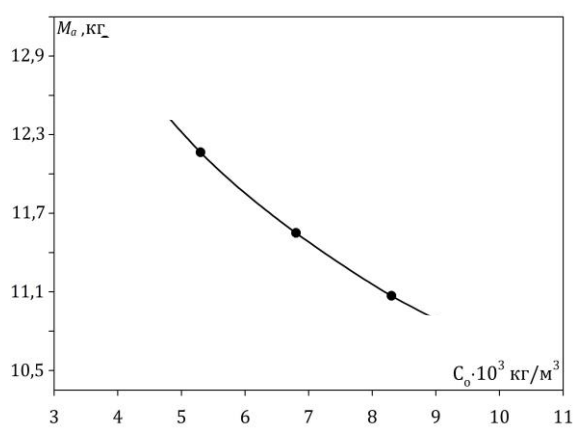


Рисунок 2. Зависимость массы силикагеля от начальной концентрации паров воды в воздухе

Математическое моделирование процесса нестационарной адсорбции паров воды из газовой смеси в слое твердого адсорбента проводилось в рамках кинетической модели: Дифференциальные уравнения, записанные на основе материального баланса, имели следующий вид:

$$m \frac{\partial a}{\partial \tau} = -(ma + b - C); \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = ma + b - C. \quad (7)$$

Использованы следующие обозначения:

C, a – мольные доли адсорбируемого пара в газе и в твердой массе;

C_s – мольная доля адсорбируемого пара, находящегося в равновесном состоянии с твердой массой, содержащей a мольных долей адсорбируемого пара;

G – массовая скорость газового потока, кг/(м²·с);

z – высота аппарата, считая от места поступления газового потока;

z_1 – высота, эквивалентная одной ступени адсорбции (массообмена), G/ks ;

n – число ступеней адсорбции, z/z_1 ;

θ – время, необходимое для массообмена в объеме, соответствующем одной ступени адсорбции; t – текущее время;

s_a – поверхность фазового контакта;

M_a, M_v – количества твердой массы и пара в аппарате;

k – коэффициент пропорциональности.

Принималось, что в начальный момент времени концентрация адсорбируемого пара в твердой массе распределена равномерно, т.е.

$$\text{при } \tau = 0 \quad a = a_0 = \text{const}, \quad (8)$$

и что содержание пара в газе при его поступлении в аппарат постоянно, т.е.

$$\text{при } z = 0 \quad C = C_0 = \text{const}. \quad (9)$$

Точное аналитическое решение краевой задачи (6) – (9), описывающее содержание пара в твердом адсорбенте и в газовом потоке, имеет следующий вид:

$$ma(n, \tau) - ma_0 = [C_0 - (ma_0 + b)] \exp(-n) \int_0^\tau \exp(-\tau) I_0(2\sqrt{n\tau}) d\tau; \quad (10)$$

$$C(n, \tau) - (ma_0 + b) = [C_0 - (ma_0 + b)] \left[1 + \exp(-\tau) \int_0^n \exp(-n) I_0(2\sqrt{n\tau}) dn \right]. \quad (11)$$

Здесь $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка от мнимого аргумента; $n = zka/G$ и $\tau = mt/r\theta$ – безразмерные концентрация адсорбируемого пара в силикагеле и время.

В известном пособии для зависимостей $a(n, \tau)$ и $C(n, \tau)$ представлены номограммы, выполненные в виде десятка кривых, плотно расположенных, что затрудняет проведение многовариантного анализа. Неоднократно применялось графическое интегрирование, что снижало точность окончательных результатов.

В разработанной автоматизированной методике расчета для вычисления значений $I_0(z)$ использовались аппроксимационные выражения. Нахождение определенных интегралов, входящих в (10), (11), осуществлено по методу трапеций. Тестирование программы проведено сравнением полученных результатов с данными из пособия.

Скорость воздуха, натекающего на слой силикагеля, существенно интенсифицирует процесс поглощения паров воды (рисунок 3).

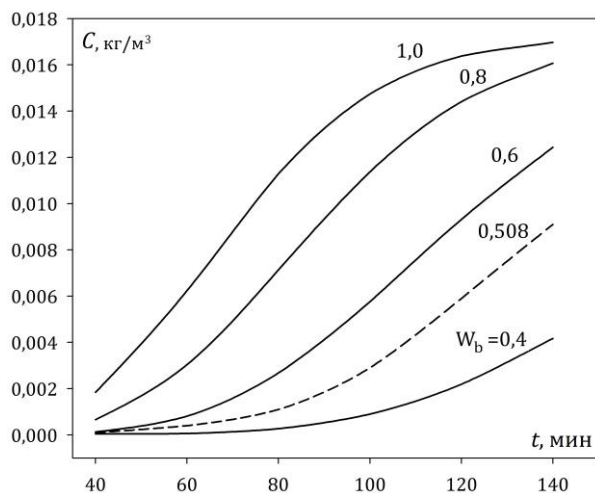


Рисунок 3. Зависимость концентрации паров воды в воздухе от времени для фиксированной марки силикагеля при различных скоростях воздуха

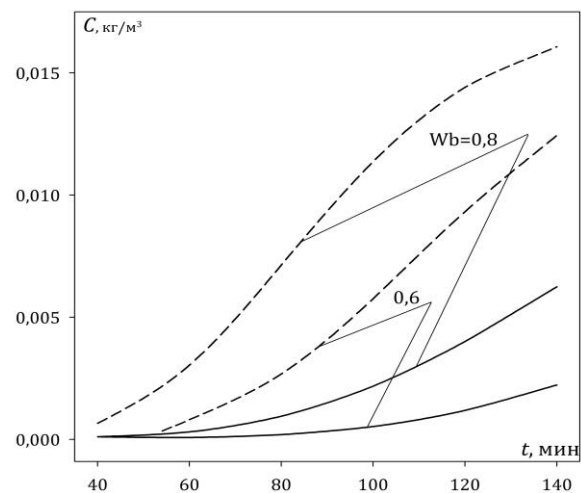


Рисунок 4. Зависимость концентрации паров воды от времени для разных марок силикагеля

Для обеспечения такой возможности требуется применять дополнительное оборудование, с помощью которого осуществляется циркуляция осушаемого воздуха.

На рисунке 4 представлены результаты зависимости $C(t)$ для разных марок силикагеля, отличающихся плотностью: кривым, нанесенным пунктирной линией, соответствует $\rho_c = 625 \text{ кг/м}^3$, а сплошным кривым – $\rho_c = 1154 \text{ кг/м}^3$.

Параметрический анализ с помощью разработанной программы позволил определить (рисунок 5), что в течении 3-х часов происходит полное заполнение пор молекулами жидкости, и дальнейшее использование силикагеля малоэффективно, поэтому навеску с силикагелем следует заменить.

На рисунке 6 изображены профили концентрации паров воды в толще силикагеля для разных моментов времени, удовлетворяющих неравенству $Fo_D = D_c t / L_s^2 < 1,0$, для значения $D_c = 2,54 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ исследуемой марки силикагеля.

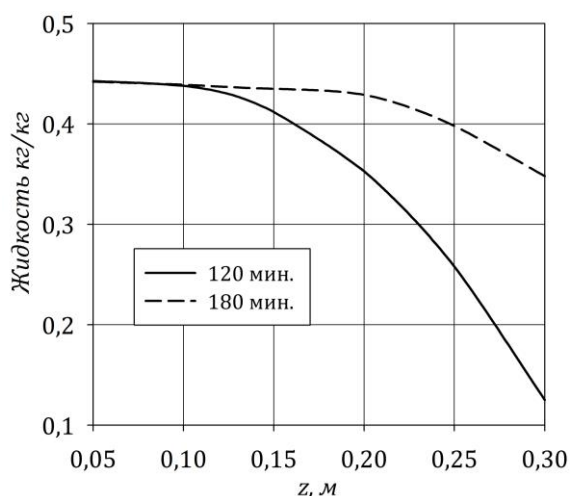


Рисунок 5. Распределение влаги в слое адсорбента при разных временах работы осушителя воздуха

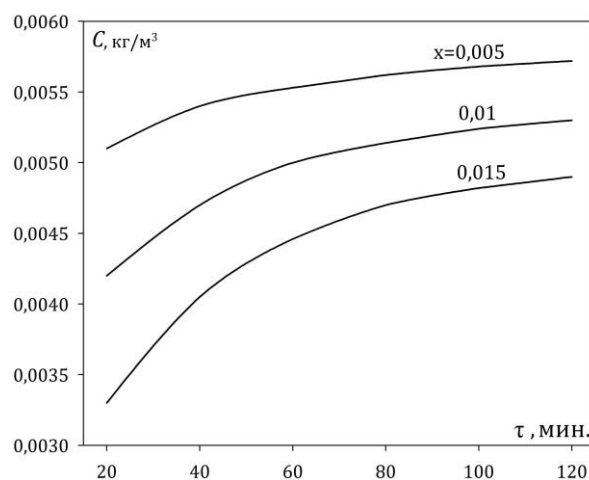


Рисунок 6. Зависимость концентрации паров воды от времени в разных сечениях навески силикагеля

Как видно, если процесс адсорбции определяется только свободной диффузией, то насыщение слоя силикагеля происходит достаточно медленно.

Восстановление поглощательной способности адсорбента осуществляется нагретым воздухом или водяным паром. Для высушивания силикагеля используется нагретый газ, имеющий температуру 573...653 К.

Модифицирована модель, позволяющая осуществлять уточненный расчет времени прогрева частичек адсорбента до выравнивания температуры по радиусу гранул и оценить соответствующие затраты энергии.

Адсорбент в виде частички сферической формы диаметром d омывается горячим воздухом, имеющим температуру t_b , и коэффициент теплоотдачи от него к зерну адсорбента α_b в непрерывно работающем аппарате со взвешенным слоем, характеризуемым числом псевдооживления k_p . Адсорбент поступает в аппарат с начальной температурой t_0 . Теплофизические свойства его (ρ , c , λ) известны. Требуется определить время, необходимое для нагрева зерна адсорбента до температуры t_k , близкой к температуре воздуха ($\Delta t = t_b - t_k = 5 \dots 10^\circ \text{C}$) и вычислить количество теплоты, затраченное на нагрев использованной массы адсорбента Q .

Процесс повышения температуры гранулы адсорбента с учетом сделанных допущений описывается следующей краевой задачей.

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right); \quad (12)$$

$$\text{при } \tau=0 \quad T=T_0; \text{ при } r=0 \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \text{ при } r=d/2 \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_b (T_b - T). \quad (13)$$

В пособии для расчета времени прогрева использовалась номограмма в виде зависимости относительной температуры центра гранулы от числа Био для разных чисел Фурье.

Для более корректного анализа использовалось точное аналитическое решение этой задачи, имеющее вид

$$T(r, \tau) = T_b - (T_b - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \exp(-\mu_n^2 Fo), \quad (14)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения

$$\mu_n \operatorname{ctg}(\mu_n) = 1 - \operatorname{Bi}. \quad (15)$$

Коэффициенты и параметры, входящие в (14), (15), определялись следующим образом:

$$\operatorname{Bi} = \frac{\alpha_b d_c}{2\lambda_c}; \quad Fo = \frac{4a_c \tau}{d_c^2}; \quad A_n = (-1)^{n+1} \frac{2\operatorname{Bi} \sqrt{\mu_n^2 + (\operatorname{Bi}-1)^2}}{\mu_n^2 + \operatorname{Bi}(\operatorname{Bi}-1)}; \quad B_n = 1. \quad (16)$$

Использованы интерполяционные формулы для первого корня уравнения (15)

$$\mu_1 = \sqrt{7,5 \left[\sqrt{1 + \operatorname{Bi}(0,8 + 0,04 \operatorname{Bi}^2)} \right] - 1} \quad \text{при } \operatorname{Bi} \leq 1; \quad (17,а)$$

$$\mu_1 = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \frac{1,5}{2 + \operatorname{Bi}} \left[\sqrt{1 + \frac{16(\operatorname{Bi}-1)(\operatorname{Bi}+2)}{3\pi^2}} - 1 \right] \right\} \quad \text{при } \operatorname{Bi} > 1. \quad (17,б)$$

Для вычисления второго и третьего корней привлекался интерполяционный многочлен Лагранжа второй степени.

С целью уточнения расчета коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности гранулы сорбента во взвешенном слое, осуществленного в пособии с помощью номограммы, в диссертации привлечены соответствующие теоретические и экспериментальные зависимости.

При вычислении значения критерия Архимеда плотность и кинематическая вязкость воздуха находились по аппроксимационным зависимостям. Значение критического числа Лященко вычислялось через критерий Рейнольдса для скорости витания, определяемый из решения квадратного уравнения

$$0,351 \operatorname{Re}_v^2 + 18 \operatorname{Re}_v - \operatorname{Ar} \varepsilon^{4,75} = 0. \quad (18)$$

По значениям чисел Рейнольдса и Архимеда, определялась порозность псевдооживленного слоя с помощью интерполяционной формулы

$$\varepsilon_p = \left[\frac{\operatorname{Re}_v (18 + 0,36 \operatorname{Re}_v)}{\operatorname{Ar}} \right]^{0,21}. \quad (19)$$

Количество теплоты, требуемое для нагрева до температуры t_k массы адсорбента, оцененной по формуле (5), вычислялось обычным образом

$$Q_c = c_c M_c (T_k - T_{md}), \quad (20)$$

где T_{md} – усредненное значение температуры гранулы.

Описанный алгоритм был реализован на Турбо Паскале. Расчет проведен для цеолита NaX, имеющего $\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$, $c_c = 870 \text{ Дж/(кг·К)}$, $\lambda_c = 0,24 \text{ Вт/(м·К)}$, температура воздуха $t_b = 190^\circ\text{C}$, начальная температура гранулы $t_c = 20^\circ\text{C}$, конечная – $t_k = 185^\circ\text{C}$, число псевдоожижения $k_p = 4$.

Таблица 2. Значения характеристик псевдоожиженного слоя, определенных по «известной» и уточненной методикам.

Параметры	Ly_k	$w_k, \text{ м/с}$	Ly	Re	$\alpha, \text{ Вт/(м}^2\text{К)}$	$t_a, \text{ с}$
Романков П.Г.	2,75	1,09	174	773	290	16
Уточненная методика	4,20	1,27	268,8	1520	436,3	11,2

Сравнение результатов (таблица 2.) показало, что нахождение с помощью номограмм значений критического числа Лященко, порозности взвешенного слоя и критерия Fo дали погрешность 34 %, 66 и 43 %, соответственно. А это привело к большим значениям критерия Рейнольдса и коэффициента теплоотдачи от воздуха к грануле адсорбента и меньшему времени ее прогрева. Количество теплоты, затраченное на выполнение десорбции навески массой 1 кг ц цеолита NaX, равно 143,6 кДж.

Увеличение T_b от 473 до 673 К при десорбции гранулы силикагеля $d_c = 2,85 \text{ мм}$ показало, что время прогрева возрастает от 8,2 с до 10,3 с, а количество теплоты от 161,3 до 345,6 кДж. В случае использования гранулы $d_c = 5,8 \text{ мм}$ t_a возрастает от 25,5 до 29,8 с. Для обеспечения таких показателей необходим нагреватель мощностью 35 кВт.

Полученные результаты следует рассматривать как минимальные, так как осушение гранул предполагалось путем равномерного их обтекания. В случае реализации режима псевдоожиженного слоя внутри габаритных агрегатов пароводяного тракта ТЭС, рабочий участок будет охватывать небольшую зону и возникнет необходимость обеспечить направленное движение влажного воздуха на зону нахождения взвешенного слоя.

В рассматриваемом варианте удаляется влага из фиксированного количества воздуха в агрегате пароводяного тракта ТЭС, технический силикагель имеет низкую цену (50 Р/кг), выпускается в промышленных масштабах, поэтому можно отказаться от стадии его регенерации, что существенно упрощает процедуру осушения воздуха, реализовать одноразовые поглотительные патроны, снаряженные адсорбентом. При необходимости можно повторить несколько раз эту процедуру.

Использованный силикагель допустимо утилизировать в порядке, установленном для химических реагентов, или повторно использовать во вспомогательном оборудовании после регенерации, проведенной на специализированном участке.

Таким образом, предложенная схема консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС является простой в исполнении, экономичной, удовлетворяющей требованиям экологии.

В третьей главе приводятся описания схем лабораторных установок для исследования теплофизических и диффузионных свойств в зависимости от

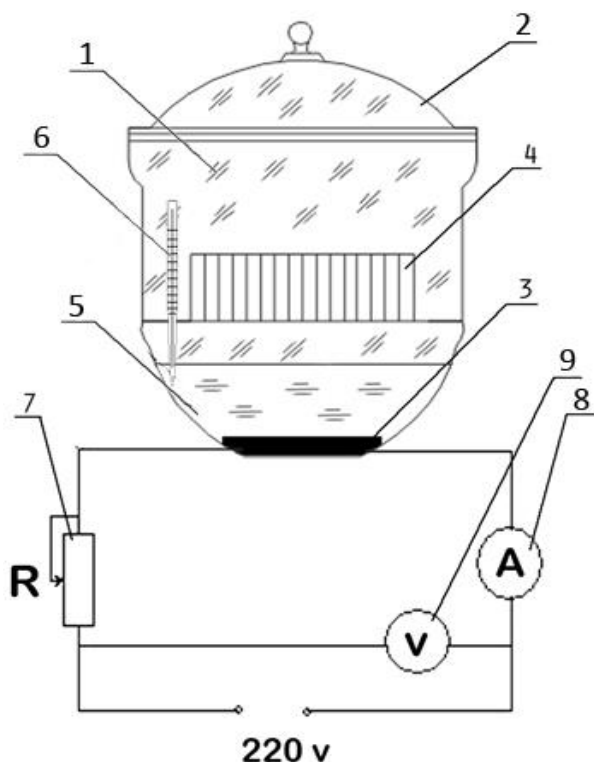


Рисунок 7. Разработанное устройство для определения коэффициента термодиффузии и массоотдачи дисперсных материалов. 1 – эксикатор, 2 – крышка эксикатора, 3 – маломощный электрический нагреватель, 4 – поддон, 5 – раствор насыщающий внутреннюю среду эксикатора, 6 – термометр, 7 – резистор, 8 – амперметр

и секундомера чашки Петри, и осуществляются следующим образом. Дисперсный материал взвешивается в сухом состоянии и помещается в эксикатор, содержащий в днище раствор, насыщающий внутреннюю среду эксикатора, где воздух пропитан молекулами этого раствора, и нагревается до определенной температуры.

С интервалом в 1 час, исследуемый объект вынимается из эксикатора, и взвешивается; по формуле (21) рассчитывается степень набухания

$$\alpha = [\Delta m / m_1] \cdot 100 \%, \quad (21)$$

где $\Delta m = m_2 - m_1$, m_1 – первоначальная масса образца, m_2 – масса увлажненного образца, коэффициент термодиффузии,

$$D = (l / \pi)^2 \operatorname{tg}(\alpha). \quad (22)$$

Здесь l – толщина образца; $\pi = 3,14$; $\operatorname{tg}(\alpha)$ – определяется графически из наклона зависимости $\ln(1-\gamma)$ от $t_{\text{сек}}$:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = \ln(1-\gamma) / t, \quad (23)$$

где γ – коэффициент набухания.

$$\gamma = M_t / M_{\infty}. \quad (24)$$

температуры и давления. Для измерения ТФС силикагеля использован метод монотонного разогрева, осуществляемый при помощи установок ИТ-с-400 для

измерения теплоёмкости и ИТ-λ-400 – для определения теплопроводности исследуемых нами объектов.

Плотность адсорбента была измерена методом пикнометра, который основан на фиксации объема известной массы вещества, находящейся в прокалбированном стеклянном пикнометре.

Результаты значений свободной диффузии определены при помощи лабораторной установки, на которую был получен 02.11.2011 патент № TJ 473; состоящий из эксикатора, чашки Петри, электронных весов и секундомера.

Данные о степени набухания, массоотдачи и термодиффузии определены при помощи устройства, изображенного на рисунке 7, на которое получен 27.12. 2011 патент № TJ 490. Измерения проводятся в эксикаторе, на дне которого расположен маломощный электронагреватель 3, электронные весы и

Зная разность масс (Δm) исследуемых образцов, коэффициент массоотдачи рассчитывается по формуле

$$\beta_t = \Delta m / t, \text{ кг/с.} \quad (25)$$

Измерения бародиффузии осуществлялись при помощи устройства (рисунок 8), разработанного с участием соискателя. Оно представляет собой сосуд 1, внутри расположен поддон, на который устанавливается сетчатая металлическая чашка, в ней размещен исследуемый объект, крышка 2, мостик 3, удерживаемый державками 4, вентиль 5, прижимающий крышку устройства к корпусу сосуда. На крышке предусмотрен обратный клапан 6, к которому подключается компрессор, для создания давления, определяемого при помощи манометра 7. Между крышкой и корпусом расположена резиновая прокладка, способствующая удержанию давления в сосуде.

Приводятся результаты экспериментального определения плотности, теплопроводности, температуропроводности, удельной массовой теплоемкости, свободной термо- баро- и молекулярной диффузии, коэффициента массоотдачи и степени набухания сорбентов на основе силикагеля с размерами фракций ($d_1=2,85$ мм, $d_2=3,65$ мм, $d_3=4,68$ мм, $d_4=5,80$ мм), в интервале $T = 300 \dots 573$ К, и давлений $0,15 \dots 0,35$ МПа (для бародиффузии).

Установлено, что удельная массовая теплоемкость исследуемых адсорбентов зависит от температуры и размеров гранул (рисунок 9), причем при фиксированном размере фракции имеет экстремум. В частности, у образца с $d=5,8$ мм при $T=398$ К значение c_p в 2,5 раза превышает исходное.

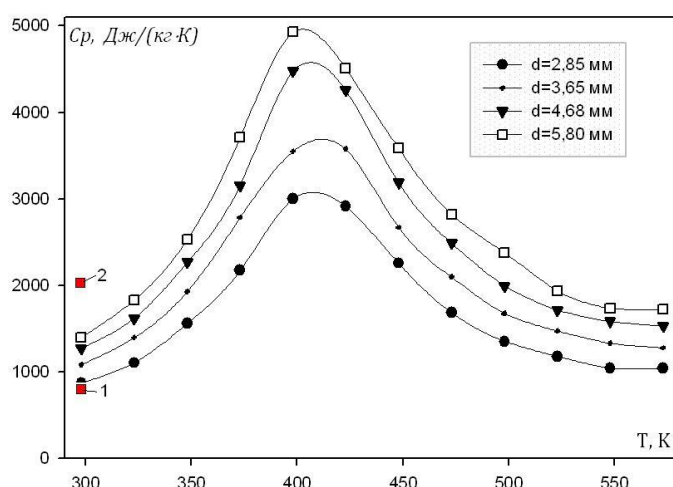


Рисунок 9. Удельная теплоемкость силикагеля в зависимости от температуры воздуха при различных фракциях, 1, 2 — теплоемкость сухого и влажного песка



Рисунок 8. Устройство для определения коэффициента бародиффузии дисперсных материалов.

1 — корпус, 2 — крышка, 3 — мостик, 4 — державки, 5 — вентиль, 6 — обратный клапан, 7 — манометр

Подобная зависимость вызвана тем, что силикагель имеет большую площадь поверхности ($800 \text{ м}^2/\text{г}$), состоящую из групп $-\text{SiOH}$, расположенных на расстоянии $0,5$ нм друг от друга, являющихся активными центрами, причём активность конкретной партии силикагеля зависит от числа и активности таких центров. Если в адсорбенте удалена поглощенная на его поверхности вода, то многие центры будут активны. Такая активация происходит при нагревании геля до $150\text{--}200^\circ\text{C}$. При нагревании до $200\text{--}400^\circ\text{C}$ активность теряет-

ся в результате образования связей Si-O, происходящих с отщеплением воды. Эта стадия обратима. При нагревании выше 400°C размер поверхности силикагеля необратимо уменьшается. Активные центры взаимодействуют с полярными растворёнными веществами главным образом за счёт образования водородных связей.

Получены аппроксимационные зависимости, учитывающие влияние на ТФС температуры и размеров адсорбента, позволяющие провести расчет указанных величин в исследованном диапазоне температур.

Обработка опытных данных по термодинамическим или теплофизическим свойствам адсорбентов на основе силикагеля при различных температурах осуществлена использованием следующей функциональной зависимости.

$$y / y_1 = f(T / T_1), \quad (26)$$

где y, y_1 – свойства адсорбентов при температурах T и T_1 : $T_1 = 398$ К.

Представленные на рисунке 10 опытные данные по удельной массовой теплоемкости при разных температурах обобщены уравнениями, полученными методом наименьших квадратов:

для $T = 298 - 398$ К

$$c_p / c_{p1} = 3,763 - 10,216(T / T_1) + 7,45(T / T_1)^2 \quad (27.1)$$

при $T = 423 - 573$ К

$$c_p / c_{p1} = 10,59 - 14,63(T / T_1) + 5,22(T / T_1)^2 \quad (27.2)$$

где c_p, c_{p1} – удельные массовые теплоемкости при температурах T и $T_1 = 398$ К.

Зависимость значений c_{p1} от размеров (фракций) адсорбентов отражена на рисунке 11 и аппроксимирована уравнением:

$$c_{p1} = 1126,3 + 674485d \quad (28)$$

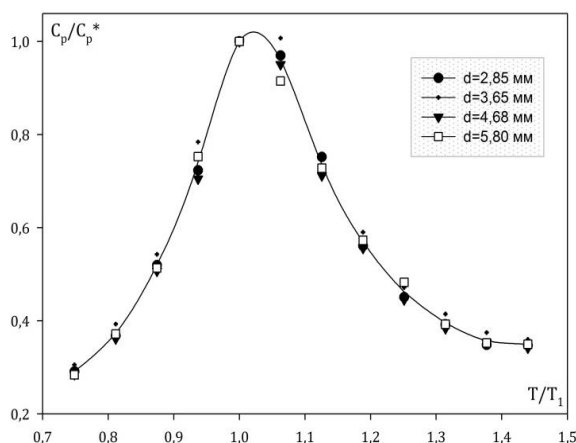


Рисунок 10. Зависимость безразмерной удельной массовой теплоемкости от безразмерной температуры (T/T_1)

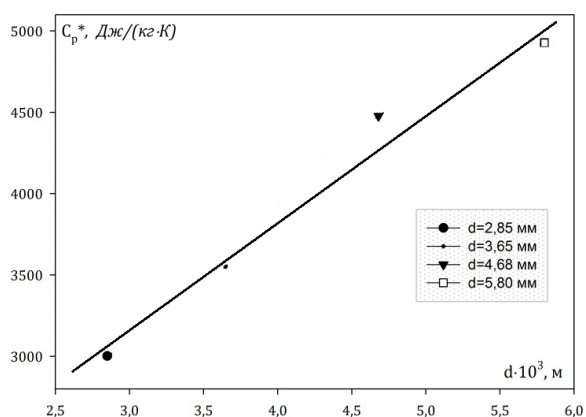


Рисунок 11. Зависимость изобарной удельной теплоемкости от размеров гранул адсорбентов на основе силикагеля при температуре $T_1 = 398$ К

Подставляя значения (d и T) в формулы (27.1, 27.2) и (28) можно рассчитать с погрешностью до 4 % удельную массовую теплоемкость в указанном диапазоне температур и размеров (фракций) адсорбентов на основе силикагеля.

Установлено, что теплопроводность исследуемых образцов с ростом температуры увеличивается примерно по квадратичному закону (рисунки 12, 13.). При

фиксированной температуре с увеличением размеров гранул теплопроводность уменьшается по линейному закону (рисунок 14).

В промежутке $T=323\text{--}573\text{ K}$ для образца с фракцией 4,68 мм коэффициент λ в среднем увеличился в 2,2 раза, а для адсорбента размером 5,8 мм значение λ возросло в среднем в 1,5 раза.

На рисунке 13 представлены опытные данные в виде (26) по теплопроводности адсорбентов на основе силикагеля при различных температурах (таблица 3). Результаты обобщены уравнением, полученным методом наименьших квадратов:

$$\lambda / \lambda_1 = 1,81 - 3,51(T / T_1) + 2,70(T / T_1)^2, \quad (29)$$

где λ, λ_1 – теплопроводности при температурах T и T_1 : $T_1=448\text{ K}$.

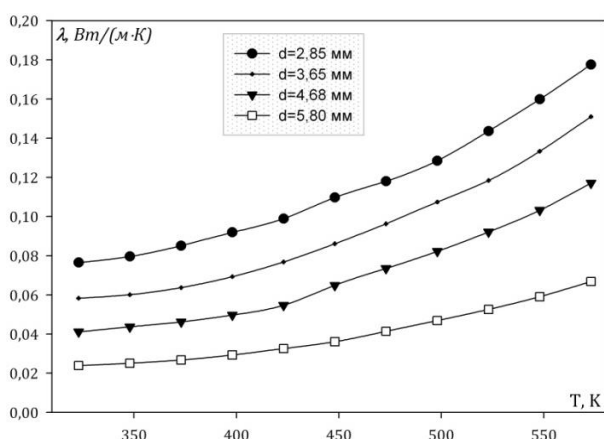


Рисунок 12. Теплопроводность силикагеля в зависимости от температуры при различных фракциях в воздухе

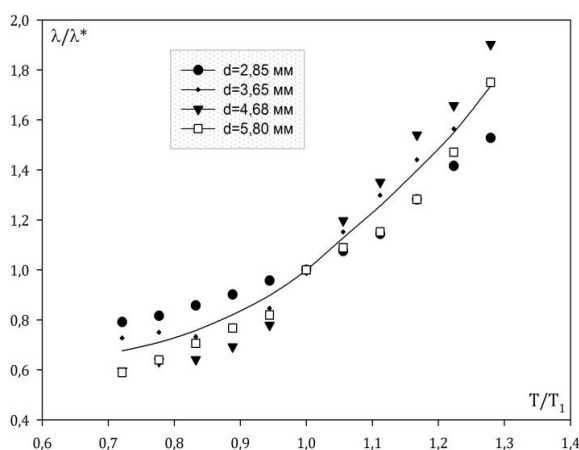


Рисунок 13. Зависимость относительной теплопроводности сорбента от относительной температуры

Таблица 3. Экспериментальные значения теплопроводности ($\lambda \cdot 10^2$, Вт/(м·К)) силикагеля в зависимости от температуры и различных фракций

$T, \text{ K}$ $d, \text{ мм}$	323	348	373	398	423	448	473	498	523	548	573
2,85	86,8	89,6	94,1	98,9	105	109	118	126	141	155	168
3,65	58,3	60,1	58,7	62,3	67,8	80,1	92,3	104	115	125	141
4,68	41,1	43,7	44,2	47,7	53,7	68,9	82,5	93,1	106	114	131
5,80	21,3	23,1	25,5	27,7	29,6	36,1	39,3	41,6	46,3	53,1	63,2

Анализ влияния размеров фракций адсорбентов на теплопроводность при температуре T_1 , показал ее уменьшение по закону, близкому к линейному. Опытные данные, приведенные на рисунке 13, описываются уравнением:

$$\lambda_1 = 0,175 - 23,93d \quad (30)$$

Зная диаметр капсул и температуру, можно рассчитать теплопроводность в широком диапазоне температур и размеров (фракций) адсорбентов на основе силикагеля, погрешность расчета по формулам (29), (30) не превышает 4,9 %.

Опытные значения плотности (ρ , кг/м³) исследуемых адсорбентов приведены в таблице. 4.

Температуропроводность вычислялась с использованием экспериментальных значений удельной массовой теплоемкости и теплопроводности

Таблица 4. Экспериментальные значения плотности адсорбентов на основе силикагеля различных фракций

$d \cdot 10^3, \text{ м}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$
2,85	1154
3,65	1142
4,68	1130
5,80	1118

$$a = \lambda / (\rho c_p), \text{ м}^2/\text{с}. \quad (31)$$

Для аппроксимации температуропроводности использована функциональная зависимость (26) и получены следующие эмпирические уравнения:

$$a / a_1 = 8,469 - 20,333(T / T_1) + 12,739(T / T_1)^2, \quad (32)$$

где a, a_1 – значения температуропроводностей при T и $T_1=498 \text{ К}$;

$$a_1 = (0,137 - 21d)10^{-6} \quad (33)$$

Таблица 5. Расчетные значения температуропроводности адсорбентов на основе силикагеля в зависимости от температуры и различных фракций

$T, \text{ К}$ $d, \text{ мм}$	323	348	373	398	423	473	498	523	548	573
2,85	6,80	4,97	3,76	2,85	3,13	6,07	8,04	10,3	12,6	13,9
3,65	3,65	2,73	1,84	1,53	1,66	3,86	5,44	6,86	8,25	9,66
4,68	2,25	1,71	1,24	0,94	1,12	2,93	4,13	5,47	6,39	7,58
5,80	1,04	0,82	0,61	0,50	0,58	1,25	1,56	2,14	2,73	3,28

Подставляя искомые значения в (32), (33), можно рассчитать температуропроводность в исследованном диапазоне температур и размеров (фракций) адсорбентов на основе силикагеля; максимальная погрешность 5 %.

Результаты определения по предложенной методике коэффициентов диффузии воды из-под крана г. Душанбе представлены в таблицах 6–8.

Таблица 6. Экспериментальные значения осредненных коэффициентов свободной диффузии адсорбентов на основе силикагеля

раствор	$d, \text{ мм}$	$\bar{D}_c \cdot 10^7, \text{ м}^2/\text{с}$
вода из-под крана (г. Душанбе)	2,85	2,54
	3,65	2,92
	4,68	4,17
	5,80	5,65

С использованием функциональной зависимости (26), получены эмпирические уравнения для определения молекулярной диффузии:

$$D_\mu / D_{\mu 1} = 9,295 - 22,408(T / T_1) + 13,979(T / T_1)^2 \quad (34)$$

где $D_\mu, D_{\mu 1}$ – молекулярная диффузия при температурах T и T_1 : $T_1=498 \text{ К}$.

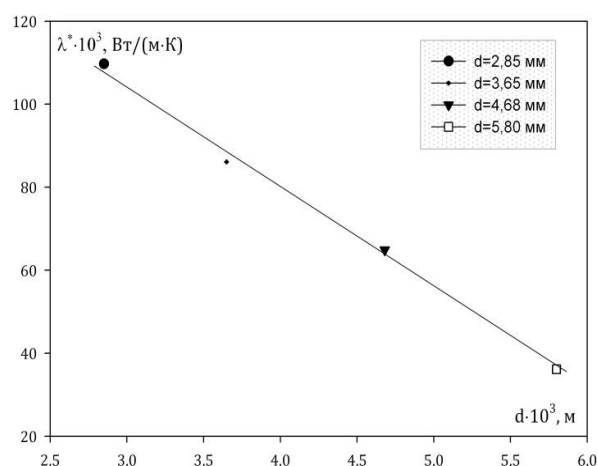


Рисунок 14. Зависимость теплопроводности λ_1 от размеров фракций (d) адсорбентов на основе силикагеля при $T_1=448 \text{ К}$

$$D_{\mu_i} = (0,011 - 1,6d) \cdot 10^{-6} \quad (35)$$

Таблица 7. Экспериментальные значения термодиффузии адсорбентов на основе силикагеля

раствор	температура раствора, К	306	318	338	349
	$D_T \cdot 10^7 \text{ м}^2/\text{с}$				
вода из-под крана (г. Душанбе)	$d_1=2,85\text{мм}$	0,617	0,823	1,23	1,47
	$d_2=3,65\text{мм}$	5,399	9,67	9,79	9,79
	$d_3=4,68\text{мм}$	13,63	21,08	22,4	22,40
	$d_4=5,80\text{мм}$	14,79	26,13	39,2	39,20

Для свободной диффузии в условиях опытов с водой из-под крана

$$\bar{D}_c = 7,8 \cdot 10^{-8} + 6,5 \cdot 10^{-5} d. \quad (36)$$

Термодиффузии:

$$D_t / D_{t1} = 0,288 + 0,313(t/t_1) + 0,344(t/t_1)^2, \quad (37)$$

$$D_{t1} = -2,3 \cdot 10^{-6} + 87 \cdot 10^{-5} d; \quad (38)$$

Бародиффузии:

$$D_6 / D_{61} = 0,816 + 8,38(t/t_1) + 7,04 \cdot 10^{-2} (t/t_1)^2, \quad (39)$$

$$D_{61} = -8,9 \cdot 10^{-7} + 4,3 \cdot 10^{-4} d. \quad (40)$$

Таблица 8. Экспериментальные значения бародиффузии адсорбентов на основе силикагеля

Раствор	давление, МПа	0,198	0,247	0,296	0,345
	$D_B \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$				
вода из-под крана (г. Душанбе)	$d_1=2,85\text{мм}$	3,49	3,84	4,11	4,32
	$d_2=3,65\text{мм}$	5,39	6,07	6,75	7,42
	$d_3=4,68\text{мм}$	9,62	11,05	11,18	11,65
	$d_4=5,80\text{мм}$	15,3	16,2	16,5	19,5

Используя приведенные выражения можно рассчитать с погрешностью до 5 % коэффициенты свободной, термо- и бародиффузии в адсорбентах на основе силикагеля в различных средах насыщения в зависимости от размеров фракций.

В **Приложении** приводятся таблицы и рисунки результатов исследований, листинги программ по расчету осушения воздуха адсорбентами и их десорбции; акты внедрения и копии малых патентов, полученные при регистрации изобретений установок, которые использовались для изучения ТФС рабочего вещества в широкой области изменения параметров состояния.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Анализ повышения рабочего ресурса агрегатов пароводяного тракта ТЭС путем воздушной консервации с использованием силикагеля показал следующее:

1. На основе термодинамического подхода получено, что для сохранения рабочего ресурса агрегата пароводяного тракта ТЭС за счет снижения скорости

стояночной коррозии необходимо уменьшить относительную влажность воздуха от 98 % до 20 %; в частности, при вместимости агрегата 10 м^3 требуется 1 кг технического силикагеля с минимальной влагоемкостью (0,2), что в 25 раз меньше значения, рекомендуемого в ПТЭ.

2. В рамках модели адсорбционной установки с кипящим слоем определена необходимая масса силикагеля 7...12 кг для осушения влажного воздуха с объемным расходом, соответствующем промышленным адсорберам; этот режим эффективен из-за развитой поверхности массообмена, с другой стороны энергоемок и сложнее по конструкции, нежели предложенный вариант с одноразовыми контейнерами, заполненными силикагелем.

3. Анализ динамических режимов осушения влажного воздуха, заполняющего свободное пространство в агрегате пароводяного тракта ТЭС, показал, что в течение 3 часов наиболее эффективно использование технического силикагеля, находящегося в контейнере диаметром 0,3 м и высотой 0,2 м. Это обеспечит снижение относительной влажности воздуха до 30 % и повысит рабочий ресурс до нормативных значений.

4. На основе усовершенствованной модели десорбции поглотителя влаги определено время высушивания гранулы, составляющее 14,2 с, которое на 40 % меньше найденного по приближенной методике; затраты теплоты на эту процедуру составили 153 кДж, что подтверждает высокую ее энергоемкость. Принимая во внимание низкую цену технического силикагеля, предложено при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС не проводить его регенерацию, а использовать свежий адсорбент.

5. Впервые получены опытные данные по теплофизическим свойствам адсорбентов на основе силикагеля при температурах 300 – 600 К, которые могут быть использованы в процессе десорбции. Установлено, что теплопроводность исследованных адсорбентов монотонно увеличивается, массовая теплоемкость при температуре $\sim 420 \text{ К}$ в 2,5 раза превышает начальную, а температуропроводность приобретает минимальное значение.

6. На разработанных оригинальных установках определены значения коэффициентов свободной диффузии, термодиффузии и бародиффузии силикагеля различных фракций в интервалах температур 300...360 К, которые были использованы при реализации математической модели поглощения паров воды силикагелем.

7. Основные результаты параметрических исследований по консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля получили подтверждение в ходе опытной проверки на АООТ «Душанбинская ТЭЦ».

8. Усовершенствованные методики прогнозирования различных схем и стадий консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС с помощью силикагеля и определения его ТФС используются в учебных процессах Душанбинского филиала Национального исследовательского университета «МЭИ», Таджикского технического университета, Национального исследовательского Томского политехнического университета.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. **Хушвактов, А. А.** Анализ вариантов осушения влажного воздуха с помощью силикагеля при консервации агрегатов пароводяного тракта тепловой электрической станции / А. А. Хушвактов, С. В. Голдаев // **Известия** Томского политехнического университета. 2014. – Т. 325. – № 2. – С. 120-126.
2. **Хушвактов, А. А.** Совершенствование методик расчета характеристик осушителей воздуха с использованием силикагеля / А. А. Хушвактов, С. В. Голдаев // **Известия** вузов. Проблемы энергетики. – 2014. – № 7-8. – С. 14-22.
3. **Хушвактов, А. А.** Моделирование процесса осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС / А. А. Хушвактов, С. В. Голдаев // **Научный вестник** Новосибирского государственного технического университета НГТУ. – 2014. – Т. 55. – № 2.(55) – С. 166-175.
4. **Хушвактов, А. А.** Изменение коэффициента самодиффузии и количества диффундируемых молекул воды в ультрадисперсных никелевых катализаторах на основе силикагеля / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // **Вестник** Таджикского технического университета. – Душанбе, – 2011. – № 4. – С. 5–10.
5. **Хушвактов, А. А.** Степень набухания, коэффициент термодиффузии и массоотдачи ультрадисперсных никелевых катализаторов в насыщенных конденсированных средах на основе силикагеля / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев и др. // **Вестник** Таджикского Национального Университета. – Душанбе, – 2012 – № 1/3 (85). – С. 160–165.
6. **Хушвактов, А. А.** Коэффициент молекулярной диффузии ультрадисперсных никелевых катализаторов в зависимости от температуры / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров // **Вестник** педагогического университета. – Душанбе, – 2013 – № 3 (52). – С. 27–32.
7. **Хушвактов, А. А.** Влияние раствора системы (этиловый спирт и вода) на изменение коэффициентов диффузии, и бародиффузии в ультрадисперсных никелевых катализаторах на основе силикагеля / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // **Вестник** Таджикского технического университета. – Душанбе, – 2013. – № 3(23). – С. 11–15.
8. Пат. № TJ 473. Республика Таджикистан, МПК (2011.01) G 01 N5/02. Способ определения коэффициентов самодиффузии и массоотдачи дисперсных материалов / **А. А. Хушвактов.**, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев. – № TJ 473; заявл. 11.10.11; опубл. 02.11.11, 4 с.
9. Пат. № TJ 490. Республика Таджикистан, МПК (2011.01) B 01 L7/00. Устройство для определения степени набухания, коэффициентов термодиффузии и массоотдачи дисперсных материалов / **А. А. Хушвактов,** М. М. Сафаров, Д. С. Джураев. – № TJ 490; заявл. 08.11.11; опубл. 27.12.11, 3 с.
10. **Хушвактов, А. А.** Об использовании силикагелей для повышения долговечности котельного оборудования / А. А. Хушвактов, С. В. Голдаев // **Энергетика: Эффективность, надежность, безопасность: материалы трудов XIX Всероссийской научно-технической конференции.** – Томск: Изд-во «Скан». – 2013. – Т. 2. – С. 386–389.
11. **Хушвактов, А. А.** Оценка толщины слоя силикагеля и времени его насыщения парами воды при осушении воздуха в ходе консервации агрегатов ТЭС / А. А. Хушвактов, С. В. Голдаев // **Теплофизические проблемы энергетических**

технологий: материалы трудов международной молодежной научной школы-семинара. Изд. ТПУ. – Томск, – 2014. – С. 26–31.

12. **Хушвактов, А. А.** Область применения силикагеля в науке и технике // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Перспективы энергетики Таджикистана». – Душанбе, 2011. – С. 32–35.

13. **Хушвактов, А. А.** Теплофизические свойства ультрадисперсных никелевых катализаторов на основе силикагеля, насыщенных парами воды / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // Труды Международной научно-технической конференции «Композиционные строительные материалы, теория и практика». – Пенза, – 2011. – С. 165–168.

14. **Хушвактов, А. А.** Теплостойкость ультрадисперсных никелевых катализаторов на основе силикагеля и их применение / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // Труды Международной Конференции «Современные проблемы химии, химической технологии и металлургии». – Душанбе, 2011. – С. 18–19.

15. **Хушвактов, А. А.** Расчетно-экспериментальные значения коэффициента массоотдачи катализаторов на основе силикагеля / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Д. С. Джураев // Материалы Республиканской научно-технической конференции «Перспективы развития исследований в области химии координационных соединений». – Душанбе, – 2011. – С. 180–182.

16. **Хушвактов, А. А.** Экспериментальная установка для определения степени набухания, коэффициентов термодиффузии и массоотдачи дисперсных материалов / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, Т. Ш. Сангов, Д. С. Джураев // Труды восьмой Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения в энерго- и ресурсосбережении, при контроле и управлении качеством процессов, продукции и услуг». – Душанбе, – 2012. – С. 313–316.

17. **Khushvaktov, A. A.** Isobaric specific heat and bulk density of ultrafine nickel catalysts based on silica gel, depending on the temperature / A. A. Khushvaktov, M. M. Safarov, D. S. Juraev, B. M. Boltuev // 18th Symposium on Thermo physical Properties. – Boulder, – 2012. – Paper ID. 1036.

18. **Khushvaktov, A. A.** Molecular diffusion of ultrafine nickel catalysts, based on silica gel, depending on the temperature / A. A. Khushvaktov, M. M. Safarov, D. S. Juraev // 10th Asia Thermophysical Properties Conference, (ATPC). – Daejeon, South Korea, – 2013. Paper № 1-82.

19. **Khushvaktov, A. A.** Analysis of moist air unwatering by adsorbent in fluidized bed for thermal power stations units conservation / A. A. Khushvaktov, S. V. Goldaev // EPJ Web of Conferences, 2014, V. 76, P. 01011-1-01011-5.

20. **Khushvaktov, A. A.** Computational simulation characteristics desorption in TPS aggregates / A. A. Khushvaktov, S. V. Goldaev // EPJ Web of Conferences, – 2014, V. 76, P. 01041-1-01041-4.

21. **Хушвактов, А. А.** Математическое моделирование регенерации адсорбентов в аппарате с псевдоожиженным слоем / А. А. Хушвактов, М. М. Сафаров, С. В. Голдаев // Труды девятой Международной теплофизической школы «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий». – Душанбе, – 2014. – С. 369–378.