

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

THERMAL POWER
ENGINEERING

УДК 66.071.7

Моделирование процесса осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС*

С.В. ГОЛДАЕВ¹, А.А. ХУШВАКТОВ²

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 30/А. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, д. ф.-м. н., профессор, e-mail: SVGoldaev@rambler.ru

² 734042, Республика Таджикистан, г. Душанбе, ул. Академиков Раджабовых, 10. Таджикский технический университет имени академика М.С. Осими, аспирант, e-mail: alisher1001@mail.ru

Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования средств защиты агрегатов пароводяного тракта ТЭС при простоях от стояночной атмосферной коррозии. Цель работы: в рамках кинетической модели адсорбции проанализировать процесс осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС. Методы исследования: реализация точного аналитического решения краевой задачи с привлечением численного метода нахождения определенного интеграла от функции Бисселя, описывающей изменение паров воды в воздухе и их распределение в слое силикагеля. Результаты: моделирование процесса осушения воздуха, заполняющего свободное пространство агрегатов пароводяного тракта ТЭС, показало, что при толщине слоя силикагеля равного 0,2 м и времени 3 ч происходит практически полное насыщение пор молекулами жидкости, поэтому дальнейшее использование силикагеля малоэффективно и контейнер с адсорбентом следует заменить. Это обеспечит снижение относительной влажности воздуха до 30 % и сохранит нормативные значения рабочего ресурса агрегатов.

Ключевые слова: атмосферная коррозия, моделирование, изотермы адсорбции, осушение воздуха, пароводяной тракт ТЭС, силикагель, диффузия, цеолит, адсорбер

ВВЕДЕНИЕ

Консервация агрегатов пароводяного тракта ТЭС проводится для защиты внутренних стальных поверхностей от стояночной атмосферной коррозии (САК) в период остановки оборудования на срок более семи дней [1, 2].

Для достижения требуемых условий применяются различные способы. Например, создаются на внутренней поверхности металла защитные пленки, образованные при ее пароводокислородной обработке [3] или использовании пленкообразующих аминов [4, 5], снижается относительная влажность воздуха путем его нагрева [6].

Однако такие решения, как отмечено в работах [6, 7], являются энергозатратными и их желательно усовершенствовать.

Перспективным представляется решение этой задачи путем использования адсорбентов (силикагелей, цеолитов), которые широко применяются для осушения воздуха [2], разделения газов и жидкостей [8–10], в процессах очистки воды [11], нефтепродуктов и химических веществ [12].

Для осушения больших расходов сжатого воздуха в теплоэнергетике, химической технологии, холодильной технике используются установки с адсорбентами [13–17].

* Статья получена 20 января 2014 г.

В промышленности при консервации оборудования, поддержании заданной влажности в замкнутых объемах и др. достаточно широко распространено осушение в статических условиях, при которых процесс насыщения силикагелей влагой характеризуется малой скоростью [17]. Длительность полного насыщения при комнатной температуре мелкопористых силикагелей составляет 40 ч, среднепористых – 50 ч и крупнопористых – 75 ч, а отработка адсорбционной емкости на 50 % достигается за 8, 10 и 22 ч соответственно [17–19].

Согласно рекомендациям ПТЭ для поддержания влажности в частично герметичном объеме водогрейного котла применяется сухой силикагель из расчета 1,5 ... 2,5 кг на 1 м³ внутреннего объема консервируемого котла. Подробности обоснования такой массы силикагеля в [2] не приведены.

В работе [20] на основе термодинамического подхода было получено, что для осушения воздуха, заполняющего агрегат вместимостью 100 м³ при температуре 290 К, имеющего φ₁ = 98 %, силикагелем с низкой поглощательной способностью (g_{ps} = 0,2) максимальное значение требуемой массы адсорбента составляет M_c ≈ 9,5 кг, что примерно в 25 раз меньше упомянутого выше значения. Вероятно, существенное расхождение значений адсорбентов обусловлено учетом в [2] дополнительной массы воды, сохраняющейся на днище котельного оборудования.

Силикагель можно разместить в разных местах резервуара в виде контейнеров, называемых поглотительными патронами [8].

Для оценки длительности процесса адсорбции, изменения концентраций поглощаемых паров воды, степени насыщения адсорбента необходимо проанализировать его динамическую стадию.

В работе [8] было проведено физико-математическое моделирование процессов очистки воздуха в модели отсека орбитальной станции с помощью силикагеля С–6В с насыпной плотностью ρ_c = 889 кг/м³. Выявлено, что для снижения температуры точки росы необходимо использовать поглотитель с максимально возможным значением его сорбционной емкости. Варьирование ρ_c от 770 кг/м³ до 889 кг/м³ привело к незначительному изменению температуры точки росы осушенного в адсорбере воздуха. Установлено, что основные затраты электроэнергии при работе установки связаны с регенерацией адсорбента. Поэтому основное внимание в [8] было уделено исследованию работы установки именно на стадии регенерации.

Однако этими результатами непосредственно воспользоваться затруднительно, так как вместимость отсека составляла 5...10 м³, φ < 60 %. Поэтому достаточно было использовать адсорбционный слой толщиной 0,1 м.

В работе [9] предложена математическая модель процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема, позволяющая изучать протекающие в ней процессы для различных состояний функционирования системы и использовать ее в системе управления технологией.

Описан алгоритм и особенности его численной реализации. К сожалению, отсутствуют примеры расчета конкретных адсорберов, и вопросы о достоверности и практической значимости остаются открытыми.

В связи с этим, целесообразно проанализировать переходной режим адсорбции паров воды из влажного воздуха, заполняющего свободное пространство агрегата пароводяного тракта ТЭС слоем твердого адсорбента.

Дифференциальные уравнения в частных производных первого порядка, записанные на основе материального баланса, имели следующий вид [21]:

$$M_a \frac{\partial a}{\partial t} = -k_s a (C_s - C); \quad (1)$$

$$G \frac{\partial C}{\partial z} = k_s a (C_s - C), \quad (2)$$

где 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; t – время; z – высота аппарата, считая от места поступления газового потока; k – коэффициент пропорциональности.

Дальнейший анализ проводится с использованием безразмерного времени, где $r = M_s/M_v$, θ – время, необходимое для массообмена в объеме, соответствующем одной ступени адсорбции; M_a и M_v – количество твердой массы и пара в аппарате; n – число ступеней адсорбции.

Исходная система приняла вид

$$m \frac{\partial a}{\partial \tau} = -(C_s - C); \quad (3)$$

$$\frac{\partial C}{\partial n} = C_s - C. \quad (4)$$

Коэффициент m определялся из равновесного соотношения

$$C_s = ma + b. \quad (5)$$

С помощью выражения (5) система уравнений (3) и (4) была представлена так:

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

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

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 объеме, имеет следующий вид [21]:

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

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

Здесь $I_0(z)$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка от мнимого аргумента.

В книге [21] отсутствует информация о численных методах, использованных при реализации сформулированной модели. Для зависимостей $a(n, \tau)$ и $C(n, \tau)$ представлены номограммы, выполненные в виде десятка кривых, плотно расположенных, что затрудняет проведение точных расчетов, тем более проведение многовариантного анализа. Кроме того, в методике неоднократно применяется графическое интегрирование, что повышает погрешность окончательных результатов.

Аналогичная краевая задача и ее аналитическое решение были описаны в пособии по уравнениям математической физики [22]. Графическое изображение распределения паров воды по толщине адсорбента было осуществлено с использованием результатов численного решения системы дифференциальных уравнений (6), (7) методом конечных разностей. Дополнительно в [22] было приведено асимптотическое решение для больших значений аргументов подынтегральных функций.

Бликие по структуре дифференциальные уравнения и их аналитические решения, описывающие поглощение содержащихся в воде примесей слоем адсорбента, получены в работе [23]. В ней отсутствуют ссылки на источники [21], [22], а результаты количественного исследования представлены в безразмерных переменных, что затрудняет их использование при анализе динамической стадии функционирования конкретных адсорбционных установок.

Воспользуемся зависимостями (10), (11) для расчета адсорбции влаги из воздуха силикагелем и дополним их соотношениями, связывающими расходные характеристики потока с кинетическими характеристиками силикагеля. Известно, что для высоты эквивалентной ступени адсорбции применимо аппроксимационное выражение [21]

$$z_1 = \frac{1,42}{s_a} \left(\frac{d_c G}{\mu_b} \right)^{0,51} \quad (12)$$

Равновесное содержание для силикагеля имеет вид [21]

$$p_v = 1,82ap. \quad (13)$$

Величина p_v/p представляет собой относительную влажность газа φ при равновесном состоянии системы.

Разработаны более сложные уравнения для описания изотермы адсорбции [24, 25].

По закону Дальтона в процессе осушения воздуха при атмосферном давлении справедливо

$$p_v = C_s m_b p / m_c, \quad (14)$$

где m_b – средняя молекулярная масса воздуха; m_c – молекулярная масса адсорбтива; p – общее давление, равное 0,1 МПа.

Из сопоставления (13) и (14), получено

$$C_s = (1,82 / 1,62) p \cdot a = m \cdot a, \quad (15)$$

где $m = 1,122 \cdot p$.

Для случая изотермической адсорбции водяного пара силикагелем из (12) следует

$$\alpha = \frac{ks}{G} = \frac{1}{z_1} = 0,703s_c \left(\frac{d_c G}{\mu} \right)^{-0,51} \quad (16)$$

Параметр β вычисляется так:

$$\beta = \frac{m}{r\theta} = \frac{m}{\frac{\rho_a}{M_v} z_1} = \frac{mG}{\rho_a z_1} = \frac{1,122Gp \cdot 0,703s_a}{\rho_a} \left(\frac{d_c G}{\mu_b} \right)^{-0,51} \quad (17)$$

Опишем условия задачи и результаты ее решения, приведенные в [21]. Воздух при $t_b = 26,6$ °С с относительной влажностью $\varphi_1 = 80$ % ($C_0 = 0,0179$ кг/кг с. в.) и эффективной скоростью 0,508 м/с пропускался через слой силикагеля толщиной 0,3 м с насыпной плотностью $\rho_c = 625$ кг/м³, размер частиц в среднем составлял $d_c = 2,73 \cdot 10^{-3}$ м.

В ходе расчетов определялась влажность выходящего из установки воздуха по истечении двух часов и распределение влаги в слое адсорбента в течение этого периода времени.

Исходные данные дополнены справочными: $\rho_b = 1,145$ кг/м³; $G = 0,583$ кг/(м²·с); $\mu_b = 1,85 \cdot 10^{-5}$ кг/м·с; парциальное давление водяного пара при заданной температуре $p = 0,0345$ атм.; удельная поверхность силикагеля $s_c = 930$ м²/м³.

Значения безразмерных величин τ и n могут принимать достаточно большие значения, поэтому для численного интегрирования выражений, входящих в (10), (11), был использован метод трапеций [26]. Для вычисления значений модифицированной функции Бесселя первого рода нуле-

вого порядка от комплексного аргумента использовались аппроксимационные выражения из [27], которые здесь не приводятся из-за своего громоздкого вида. Описанный выше алгоритм был автоматизирован, и его тестирование осуществлено нахождением a и C для разных моментов времени и сравнением их с соответствующими величинами из [21].

Результаты расчетов по автоматизированной методике представлены в виде графиков, построенных с помощью распространенной программы Sigma Plot.

Увеличение скорости воздушного потока w_b , натекающего на слой адсорбента, существенно интенсифицирует процесс осушения воздуха и приводит к более полному насыщению силикагеля парами воды за тот же временной отрезок (рис. 1). Пунктирная кривая соответствует условиям тестового примера [21].

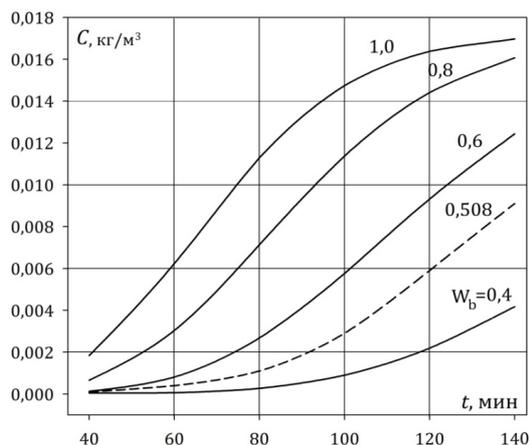


Рис. 1. Зависимость концентрации паров воды в воздухе от времени для марки силикагеля из книги [19] при различных скоростях воздуха

Для сокращения продолжительности этой стадии требуется применять дополнительное оборудование, с помощью которого производится циркуляция осушаемого воздуха, что повышает затраты на реализацию такого варианта консервации.

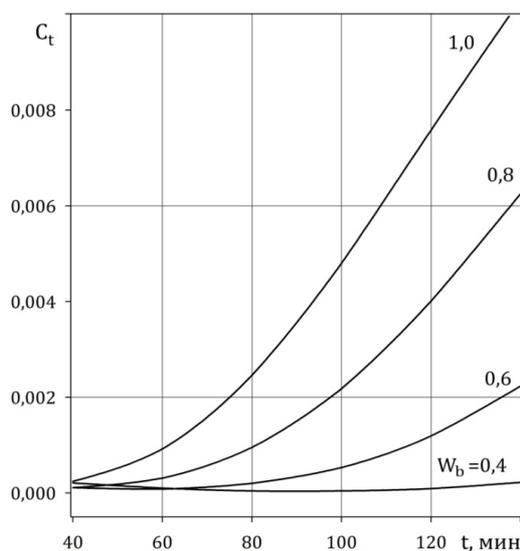


Рис. 2. Зависимость концентрации паров воды от времени для силикагеля, с $\rho_c = 1154 \text{ кг/м}^3$ при разных скоростях воздуха

На рис. 2 представлены аналогичные данные для силикагеля, имеющего $\rho_c = 1154 \text{ кг/м}^3$, диаметр гранул $d_c = 2,85 \text{ мм}$ и прежнюю удельную поверхность. Для силикагеля с большей плотностью (сплошные линии) наблюдается замедление процесса поглощения, поэтому следует предусмотреть влияние этого фактора при практическом использовании рассматриваемой схемы осушения воздуха.

Результаты зависимости $C(t)$ для разных марок силикагеля, отличающихся, в основном, насыпной плотностью, изображены на рис. 3: кривым, нанесенным пунктирной линией, соответствует $\rho_c = 625 \text{ кг/м}^3$, а сплошным кривым – $\rho_c = 1154 \text{ кг/м}^3$.

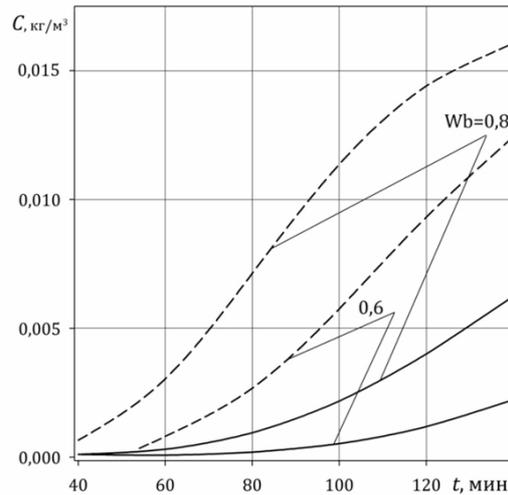


Рис. 3. Зависимость концентрации паров воды от времени для силикагеля с разной насыпной плотностью

Аналогичное влияние оказывает толщина слоя силикагеля (рис. 4).

Для сокращения продолжительности стадии поглощения паров воды следует использовать навески толщиной $0,1 \dots 0,15 \text{ м}$.

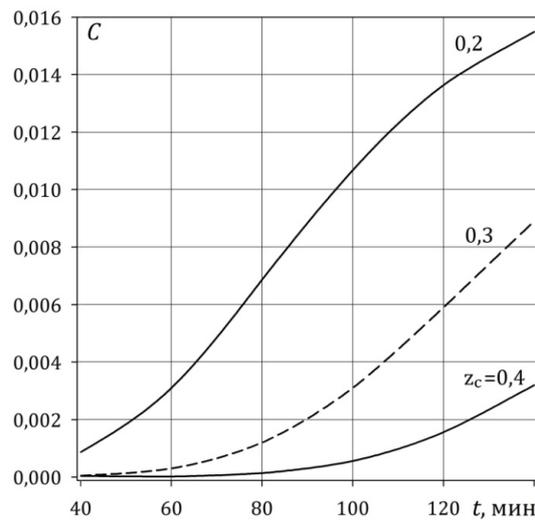


Рис. 4. Зависимость концентрации паров воды от времени для разных толщин навесок силикагеля

Параметрический анализ, проведенный с помощью разработанной программы, позволил определить, что в течение трех часов происходит практически полное насыщение пор молекулами жидкости (рис. 5), поэтому дальнейшее использование технического силикагеля малоэффективно и контейнер с адсорбентом следует заменить. Видно, что с увеличением времени работы осушителя воздуха возрастает толщина слоя, который насыщается парами воды. Следовательно, можно выбрать эффективную толщину слоя силикагеля, равную 0,2 м. Это обеспечит снижение относительной влажности воздуха до 30 % и сохранит нормативные значения рабочего ресурса агрегатов. Изменение мольной доли влаги в слое адсорбата, представленное на рис. 5, качественно соответствует результатам работы [23], где отмечено, что преждевременная остановка фильтрования ведет к неполному использованию адсорбата. Необоснованное prolongation работы адсорбера обуславливает разное ухудшение качества очищаемой жидкости.

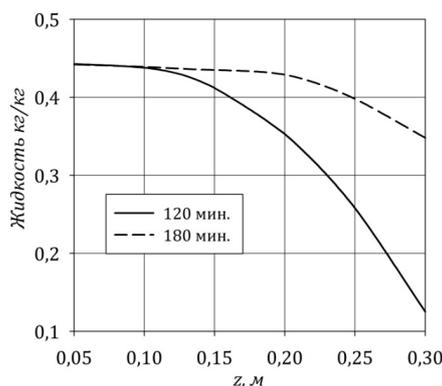


Рис. 5. Распределение влаги в слое адсорбата в разное время работы осушителя воздуха

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе математического моделирования динамических режимов осушения влажного воздуха, заполняющего свободное пространство в агрегатах пароводяного тракта ТЭС, осуществляемое с применением адсорбентов, выявлено влияние физико-химических свойств силикагеля на габаритно-массовые характеристики адсорбционного устройства, которое может быть использовано при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Глазырин А.И., Кострикина Е.Ю. Консервация энергетического оборудования. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 167 с.
- [2] Правила технической эксплуатации коммунальных отопительных котельных: утв. приказом Минстроя России от 11.11.92 г. № 251. – 40 с.
- [3] Кирилина А.В. Исследование стойкости защитных пленок, образованных при паро-водо-кислородной обработке внутренних поверхностей нагрева с целью консервации котельного оборудования: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2004. – 134 с.
- [4] Чернышов Е.В., Вепров Е.Н., Петров В.А. Повышение коррозионной стойкости оборудования при использовании пленкообразующих аминов // Электр. станции. – 2005. – № 11. – С. 15–18.
- [5] Полевич А.Н. Разработка, исследование и внедрение процессов и схем воздушной консервации теплоэнергетического оборудования: дис. ... канд. техн. наук. – М., 2001. – 137 с.
- [6] Вишневецкий Е.П., Чепурин Г.В. Консервация осушенным воздухом // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 5. – С. 8–12.
- [7] Лепявко А.П. Разработка осушителя воздуха // Холодильная техника. – 2000. – № 12. – С. 14–15.
- [8] Мозговой С.В. Исследование процессов тепло- и массообмена при очистке газовых смесей в адсорбционных установках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2001. – 133 с.

- [9] **Матвейкин В.Г., Путин С.Б., Скворцов С.А.** Математическое моделирование процесса адсорбционного концентрирования углекислого газа в системе жизнеобеспечения условно-замкнутого объема // *Вопр. соврем. науки и практики*. – 2011. – № 3 (34). – С. 64–71.
- [10] **Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М.** Адсорбция органических веществ из воды. – Л.: Химия, 1990. – 256 с.
- [11] Adsorption equilibrium of water on silica gel / Z.X. Zai, J.C. Chuan, K.K. Jeremiah, Z.W. Ru, Q.H. Jin // *J. of Chemical and Engineering Data*. – 2008. – Vol. 53, № 10. – P. 2462–2465.
- [12] **Романков П.Г., Фролов В.Ф.** Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
- [13] **Алексеев В.П., Вайнштейн Г.Е., Герасимов П.В.** Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние. 1987. – 280 с.
- [14] Thermo-physical properties of silica gel for adsorption desalination cycle / K. Thu, A. Chakraborty, B.B. Saha, K.C. Ng // *Appl. Thermal Engineering*. – 2013. – Vol. 50, № 2. – P. 1596–1602.
- [15] Использование силикагелей для осушения сжатого воздуха [Электронный ресурс]. – <http://www.air-part.ru/product/silikagel-donaldson-ultrafilter/> (дата обращения: 18.10.2013).
- [16] Оптимизация технологии осушки воздуха в промышленных блоках УОВ-30, УОВ-100 с использованием природного цеолита [Электронный ресурс]: статья / Н.И. Родина, И.М. Рябинина, Н.С. Шевцова, В.И. Юрьева; ОАО «Фосфорит». – Кингиссеп, [2013]. – URL: http://www.zeolite.spb.ru/air_dry.htm (дата обращения: 29.09.2013).
- [17] **Кельцев Н.В.** Основы адсорбционной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
- [18] **Шумяцкий Ю.И.** Промышленные адсорбционные процессы. – М.: КолосС, 2009. – 183 с.
- [19] **Морозов В.С., Морозов Е.В., Вихрова С.В.** Остаточное содержание влаги в воздухе, осушенным силикагелем // *Техн. газы*. – 2005. – № 6. – С. 34–36.
- [20] **Голдаев С.В., Хушвактов А.А.** Об использовании силикагелей для повышения долговечности котельного оборудования // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы тр. XIX Всерос. науч.-техн. конф., Том. политехн. ун-т, 4–6 дек. 2013 г. – Томск: Скан, 2013. – Т. 2. – С. 386–389.
- [21] **Батунер Л.М., Позин М.Е.** Математические методы в химической технике. – Изд. 5-е. – М.: Химия, 1971. – 854 с.
- [22] **Тихонов А.Н., Самарский А.А.** Уравнения математической физики. – Изд. 5-е, стер. – М.: Наука, 1977. – 736 с.
- [23] **Поляков В.П.** Моделирование процесса водоочистки в загрузке адсорбера // *Докл. Нац. акад. наук Украины*. – 2012. – № 5. – С. 63–71.
- [24] Investigation on the isotherm of silica gel+water systems / X. Wang, W. Zimmermann, K.C. Ng, A. Chakraborty, J.U. Keller // *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*. – 2004. – Vol. 76, № 2. – P. 659–669.
- [25] Assessment of adsorption-desorption characteristics of adsorbents for adsorptive desiccant cooling system / Y. Tashiro, M. Kubo, Y. Katsumi, T. Meguro, K. Komeya // *J. of Materials Science*. – 2004. – Vol. 39, № 4. – P. 1315–1319.
- [26] **Голдаев С.В.** Математическое моделирование и расчеты теплотехнических систем на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 188 с.
- [27] **Абрамовиц М., Стиган И.** Справочник по специальным функциям. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

Голдаев Сергей Васильевич, доктор физико-математических наук, профессор Энергетического института ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». Основное направление научных исследований – математическое моделирование функционирования устройств на базе унитарных твердых топлив для выполнения подводно-технических работ. Имеет более 150 публикаций. E-mail: SVGoldaev@rambler.ru

Хушвактов Алишер Асанович, аспирант кафедры теплотехники и теплотехнического оборудования Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими. Основное направление научных исследований – тепловые электрические станции, теплофизические свойства материалов. Имеет более 25 публикаций. E-mail: alisher1001@mail.ru

Simulation of the dehumidification air process by a silica gel layer used for TPP steam and water tract unit protection*

S.V. GOLDAEV¹, A.A. KHUSHVAKTOV²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30/A, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation, D.Sc. (Phys. & Math.), professor, e-mail: SVGoldaev@rambler.ru

² Tajik Technical University named after Academician M.S. Osimi, 10, Academicians Rajabovs St, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan, post-graduate student, e-mail: alisher1001@mail.ru

The relevance of the work is determined by the necessity to improve facilities for atmospheric corrosion protection of TPP steam and water tract units during downtime periods. The main aim of the study is to analyze the process of air dehumidification by a silica gel layer used in the conservation of TPP steam and water tract units within the frame-

* Manuscript received January 20, 2014.

work of the adsorption kinetic model. The methods used in the study include the implementation of an exact analytical solution of the boundary-value problem with the involvement of a numerical method for finding the definite integral of the Bissell function describing the change of water vapor in the air and their distribution in the silica layer. The results obtained by modeling the drying process of the air filling the space of the TPP steam and water tract units have shown that with the layer thickness of the silica gel of 0.2 m and the time of 3 h almost complete saturation of pores by water molecules occurs, so the continued use of silica gel is ineffective and the container with an adsorbent should be replaced. This will provide a reduction in the relative air humidity up to 30% and will retain standard values of unit endyrance.

Keywords: atmospheric corrosion, modeling, adsorption isotherms, dehumidification, steam-tract TPP, silica gel, diffusion, zeolite adsorption

REFERENCES

- [1] Glazyrin A.I., Kostrikina E.Ju. *Konservacija jenergeticheskogo oborudovanija* [Conservation of energy equipment]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 167 p.
- [2] *Pravila tehnichej ekspluatcii kommunalnyh otopitelnyh kotelnyh Utverzhdeny Prikazom Ministroj Rossii* [Rules of technical operation of municipal heating plants approved by Order Russian Ministry of Construction]. 11.11.92, no. 251. 40 p.
- [3] Kirilina A.V. *Issledovanie stojkosti zashhitnyh plenok, obrazovannyh pri paro-vodo-kislorodnoj obrabotke vnutrennih poverhnostej nagreva s cel'ju konservacii kotel'nogo oborudovanija. Kand. Diss.* [Study of resistance of protective films formed by water-steam-oxygen treatment of the internal heating surfaces of the boiler with the aim of preservation equipment. PhD diss.]. Moscow, 2004. 134 p.
- [4] Chernyshov E.V., Veprov E.N., Petrov V.A. Povyshenie korrozionnoj stojkosti oborudovanija pri ispolzovanii plenkoobrazujushhih aminov [Increased corrosion resistance equipment using film-forming amines]. *Jelektricheskie stancii – Power Plants*, 2005, no. 11, pp. 15-18.
- [5] Polevich A.N. *Razrabotka, issledovanie i vnedrenie processov i shem vozdušnoj konservacii teplojenergeticheskogo oborudovanija. Kand. Diss.* [Development, research and implementation of processes and shem air conservation of thermal power equipment. PhD Diss.]. Moscow, 2001. 137 p.
- [6] Vishnevskij E.P., Chepurin G.V. Konservacija osushennym vozduhom [Preservation with dry air]. *Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie – Plumbing, heating, conditioning*, 2010, no. 5, pp. 8-12.
- [7] Lepjavko A.P. *Razrabotka osushitelja vozduha* [Development of air dryer]. *Kholodilnaja tekhnika - Refrigerating technics*, 2000, no. 12, pp. 14-15.
- [8] Mozgovoy S.V. *Issledovanie processov teplo- i massoobmena pri ochistke gazovyh smesej v adsorbcionnyh ustanovkah. Kand. Diss.* [Study of heat and mass transfer in the purification of gas mixtures in adsorption units. PhD Diss.]. Moscow, 2001. 133 p.
- [9] Matveykin V.G., Putin S.B., Skvortsov S.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa adsorbtsionnogo kontsentrirvaniya uglekislogo gaza v sisteme zhizneobespecheniya uslovno-zamknutogo obema [Mathematical modeling of sorption concentration of carbon dioxide in the life support system conditionally closed volume]. *Voprosy sovremennoj nauki i praktiki – Problems of Contemporary Science and Practice*, 2011, no. 3 (34), pp. 64-71.
- [10] Koganovskiy A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M. *Adsorbtsiya organicheskikh veshchestv iz vody* [Adsorption of organic compounds from water]. Leningrad, Chemistry Publ., 1990. 256 p.
- [11] Zai Z.X., Chuan J.C., Jeremiah K.K., Ru Z.W., Jin Q.H. Adsorption equilibrium of water on silica gel. *J. of Chemical and Engineering Data*, 2008, Vol. 53, no. 10, pp. 2462-2465.
- [12] Romankov P.G., Frolov V.F. *Massobmennye protsessy khimicheskoy tekhnologii* [Mass transfer processes of chemical technology]. Leningrad, Chemistry Publ., 1990. 384 p.
- [13] Alekseev V.P., Vajnshtejn G.E., Gerasimov P.V. *Raschet i modelirovanie apparatov kriogenykh ustanovok* [Calculation and simulation of cryogenic devices]. Leningrad, Energoatomizdat, 1987. 280 p.
- [14] Thu K., Chakraborty A., Saha B.B., Ng K.C. Thermo-physical properties of silica gel for adsorption desalination cycle. *Appl. Thermal Engineering*, 2013, vol. 50, no. 2, pp. 1596-1602.
- [15] *Ispolzovanie silikagelej dlya osusheniya szhatogo vozdukh* [Using silica gel for drying compressed air]. Available at: <http://www.air-part.ru/product/silikagel-donaldson-ultrafilter/> (Accessed 18 October 2013).
- [16] Rodina N.I., Ryabinina I.M., Shevtsova N.S., Yureva V.I. *Optimizatsiya tekhnologii osushki vozdukh* v promyshlennykh blokakh UOV-30, UOV-100 s ispolzovaniem prirodnoogo tselolita [Optimization of air drying technology in industrial blocks UOV-30-100 UOV using natural zeolite]. Kingissep, [2013]. Available at: http://www.zeolite.spb.ru/air_dry.htm. (Accessed 29 September 2013).
- [17] Keltsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoj tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, Chemistry Publ., 1984. 592 p.
- [18] Shumyatskiy Yu.I. *Promyshlennye adsorbtsionnye protsessy* [Industrial adsorption processes]. Moscow, KolosS Publ., 2009. 183 p.
- [19] Morozov V.S., Morozov E.V., Vihrova S.V. Ostatochnoe sodержanie vlagi v vozduhe, osushennym silikagelem [Residual moisture content in the air, with dry silica gel]. *Tehnichekie gazy – Industrial Gases*, 2005, no. 6, pp. 34-36.
- [20] Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. Ob ispolzovanii silikagelej dlja povysheniya dolgovechnosti kotelnogo oborudovanija [On the use of silica gel to improve durability of the boiler equipment]. *Jenergetika: jeffektivnost, nadezhnost, bezopasnost: materialy trudov XIX Vserossijskoj nauchno-tehnichej konferencii [Energy: efficiency, reliability, safety: material works XIX Russian scientific and technical conference]*. Tomsk, 2013, vol. 2, pp. 386-389.

- [21] Batuner L.M., Pozin M.E. *Matematicheskie metody v khimicheskoy tekhnike* [Mathematical methods in chemical engineering]. Moscow, Chemistry Publ., 1971. 854 p.
- [22] Tikhonov A.N., Samarskiy A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1977. 736 p.
- [23] Polyakov V.P. Modelirovanie protsessa vodoochistki v zagruzke adsorbera [Simulation of the process of water purification in the absorber boot]. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Ukrainy* [Proceedings of the National academy of Sciences of Ukraine], 2012, no. 5. pp. 63-71.
- [24] Wang X., Zimmermann W., Ng K.C., Chakraborty A., Keller J.U. Investigation on the isotherm of silica gel+water systems. *J. of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2004, vol. 76, no. 2, pp. 659-669.
- [25] Tashiro Y., Kubo M., Katsumi Y., Meguro T., Komeya K. Assessment of adsorption-desorption characteristics of adsorbents for adsorptive desiccant cooling system. *J. of Materials Science*, 2004, vol. 39, no. 4, pp. 1315-1319.
- [26] Goldaev S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschety teplotekhnicheskikh sistem na JVM* [Mathematical modeling and calculations of thermal systems on PC]. Tomsk, Tomsk Polytechnical University Publ., 2011. 188 p.
- [27] Abramovits M., Stigan I. *Spravochnik po spetsialnym funktsiyam* [Handbook of Mathematical Functions]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 832 p.