

УДК 66.071.7

Оценка целесообразности десорбции силикагеля при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС по усовершенствованной методике*

С.В. ГОЛДАЕВ¹, А.А. ХУШВАКТОВ²

¹ 634050, РФ, г. Томск, пр. Ленина, д. 30/А. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, доктор физико-математических наук, 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. В рамках процесса десорбции силикагеля по схеме создания псевдооживленного слоя, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС, выполнен расчет времени нагрева гранул до требуемой температуры, затраченной теплоты и оценена целесообразность реализации этого процесса с технической и экономической точек зрения. Реализация точного аналитического решения краевой задачи, моделирующей прогрев зерна сферической формы нагретым воздухом с вычислением коэффициента теплоотдачи по усовершенствованной методике, с привлечением соответствующих теоретических и экспериментальных данных по тепломассообмену между поверхностью гранулы во взвешенном слое и окружающей средой, а также с учетом зависимости физических свойств воздуха от температуры. При суммировании бесконечного ряда учтено три первых члена. Нахождение значений корней характеристического уравнения осуществлено по интерполяционным формулам. Автоматизирована методика расчета характеристик десорбции поглотителя влаги, функционирующего по принципу псевдооживленного слоя, позволяющая точнее по сравнению с существующей методикой, в которой используются номограммы, рассчитывать температурное поле внутри гранулы адсорбента и определять время ее высушивания, а также затраты теплоты на эту операцию. Она может быть использована в проектных организациях и учебном процессе. Учитывая малый расход силикагеля для осушения воздуха в пароводяном тракте ТЭС, его низкую цену, высокие энергетические затраты на проведение восстановления поглотительных свойств адсорбента, предложено отказаться от стадии регенерации адсорбента, что существенно упрощает и удешевляет процедуру осушения воздуха.

Ключевые слова: атмосферная коррозия, моделирование, диффузия, изотерма десорбции, осушение адсорбента, пароводяной тракт ТЭС, силикагель, цеолит, десорбер, время высушивания

DOI: 10.17212/1814-1196-2014-4-185-191

ВВЕДЕНИЕ

Восстановление поглотительной способности адсорбента необходимо в случаях реализации технологических циклов с непрерывной подачей большого количества воздуха [1, 2] либо в автономных условиях (самолеты, орбитальные станции, подводные лодки) [3]. Десорбция осуществляется нагретым воздухом или водяным паром [4–6]. Гидродинамическая картина взаимодействия газа с адсорбентом зависит от конструктивного исполнения установки [4]. Возможен вариант восстановления отработанных сорбентов за счет кондуктивного подвода энергии от внешнего теплоносителя, который применяется в адсорберах термотрансформато-

* Статья получена 5 июня 2014 г.

ров [7]. Для интенсификации теплообвода используется оребрение теплообменной поверхности, а адсорбент засыпается в межребренное пространство.

Адекватность разработанной математической модели в работе [8] проверялась расчетом десорбции воды из гранул цеолита, а параметрический анализ проводился для силикагеля.

О трудоемкости и об энергоемкости стадии десорбции можно судить по литературным данным. На силикагелевых установках осушения воздуха адсорбент в процессе регенерации нагревается до 373...383 К [4]. Чтобы подготовить силикагель для последующего поглощения, его охлаждают, продувая холодным воздухом или другим газом [1–3]. Применение температур выше или ниже оптимальной снижает адсорбционную емкость сорбента. Проведение десорбции при излишне высоких температурах также повышает энергоемкость процесса [3, 8]. Для высушивания адсорбента используется нагретый газ, имеющий для силикагеля температуру 573 К [1], а по данным [6] – не ниже 653 К. В диссертации [3] приведены значения максимальной температуры регенерирующего газа, равной 673 К, температура конца нагрева – 473 К.

В работе [6] приведено краткое описание нескольких способов промышленной десорбции: изотермической, низкотемпературной, вытеснительной.

Постановка задачи

Рассмотрим процесс десорбции по схеме псевдооживленного слоя (ПОС), в котором гранулы адсорбента находятся во взвешенном состоянии. Опишем усовершенствованную методику, позволяющую 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 , в непрерывно функционирующем аппарате со взвешенным слоем, характеризуемым числом псевдооживления k_p [8]. Адсорбент поступает в аппарат с начальной температурой T_0 . Известны его теплофизические характеристики: плотность (ρ), удельная массовая теплоемкость (c), теплопроводность (λ).

Требуется определить время, необходимое для нагрева зерна адсорбента до температуры T_k , близкой к температуре воздуха, и вычислить количество теплоты, затраченное на нагрев использованной массы адсорбента Q .

Процесс прогрева гранулы адсорбента с учетом сделанных допущений описывается следующей краевой задачей [8]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

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

Здесь α_b – коэффициент теплоотдачи от нагретого воздуха к зерну адсорбента.

В работе [8] для расчета времени прогрева гранулы использовалась номограмма в виде зависимости относительной температуры ее центра от числа Био для разных чисел Фурье.

Решение задачи

Для более корректного описания и облегчения проведения параметрического анализа на персональном компьютере использовалось точное аналитическое решение этой задачи, имеющее вид [9]:

$$T(r, \tau) = T_b - (T_b - T_0) \sum_{n=1}^{\infty} A_n B_n \exp(-\mu_n^2 \text{Fo}), \quad (3)$$

где μ_n – корни характеристического уравнения

$$\operatorname{ctg}(\mu_n) = (1 - \operatorname{Bi}) / \mu_n. \quad (4)$$

Числа Био и Фурье, а также коэффициенты, входящие в (3) и (4), вычислялись следующим образом:

$$\operatorname{Bi} = \frac{\alpha_b d}{2\lambda}; \quad \operatorname{Fo} = \frac{4a\tau}{d^2}; \quad A_n = (-1)^{n+1} \frac{2\operatorname{Bi} \sqrt{\mu_n^2 + (\operatorname{Bi}-1)^2}}{\mu_n^2 + \operatorname{Bi}(\operatorname{Bi}-1)}; \quad B_n = \frac{d \sin\left(\mu_n \frac{2r}{d}\right)}{2r \cdot \mu_n}. \quad (5)$$

В монографии [9] приведены значения первых шести корней для разных значений критерия Био. В прикладных задачах допустимо использовать два-три корня.

При автоматизированном расчете табличные представление корней неудобно, а используется какой-либо численный метод решения трансцендентного уравнения (4) или различные интерполяционные формулы. В работе [10] предложены такие аппроксимации:

$$\mu_1 = \sqrt{7,5 \left[\sqrt{1 + \operatorname{Bi} (0,8 + 0,04 \operatorname{Bi}^2)} \right] - 1} \quad \text{при } \operatorname{Bi} \leq 1; \quad (6)$$

$$\mu_1 = \frac{\pi}{2} \left\{ 1 + \frac{1,5}{2 + \operatorname{Bi}} \left[\sqrt{1 + \frac{16(\operatorname{Bi}-1)(\operatorname{Bi}+2)}{3\pi^2}} - 1 \right] \right\} \quad \text{при } \operatorname{Bi} > 1. \quad (6a)$$

Для второго и третьего корней использовался интерполяционный многочлен Лагранжа второй степени [11]. При моментах времени, для которых число Фурье больше 0,25, допустимо ограничиться первым членом ряда в выражении (3) [9].

С целью уточнения расчета коэффициента теплоотдачи от воздуха к поверхности гранулы сорбента во взвешенном слое, осуществленного в работе [8] с помощью номограммы, ниже привлечены соответствующие теоретические и экспериментальные зависимости для тепло-массообмена в такой среде.

Вычисляется значение критерия Архимеда по формуле

$$\operatorname{Ar}_b = \frac{g \rho_b \rho_a d_a^3}{\mu_b^2}, \quad (7)$$

в которой плотность и кинематическая вязкость воздуха берутся для температуры T_b . При их расчете использовались аппроксимационные зависимости из справочника [12]. В отличие от книги [8], где значение критического числа Лященко находилось из номограммы, в усовершенствованной методике оно вычислялось через критерий Рейнольдса для скорости витания

$$\operatorname{Ly}_k = \operatorname{Re}_v^3 / \operatorname{Ar}_b, \quad (8)$$

определяемый из решения квадратного уравнения [4]

$$0,351 \operatorname{Re}_v^2 + 18 \operatorname{Re}_v - \operatorname{Ar} \varepsilon^{4,75} = 0. \quad (9)$$

Затем находилась критическая скорость псевдооживления

$$w_k = \left(g \rho \mu_b \operatorname{Ly}_k / \rho_b^2 \right)^{1/3}. \quad (10)$$

Рабочая скорость воздуха, отнесенная к полному поперечному сечению аппарата, равна

$$w_b = k_p w_k.$$

Для этой скорости рассчитывается критерий Лященко

$$Ly = \rho_b w_b^3 / (g \rho v_b). \quad (11)$$

По значениям чисел Рейнольдса и Архимеда определяется порозность ПОС [4]:

$$\varepsilon_p = [\text{Re}_v (\text{Re}_v / \text{Ar}) (18 + 0,36 \text{Re}_v)]^{0,21}. \quad (12)$$

В книге [8] эта величина находилась с помощью номограммы.

Критерий Рейнольдса для потока воздуха

$$\text{Re}_b = w_b d / (\varepsilon_p v_b). \quad (13)$$

Критерий Нуссельта для рассматриваемого режима теплообмена

$$\text{Nu}_b = 0,4 \text{Re}_b^{0,67} \text{Pr}_b^{0,33}. \quad (14)$$

Коэффициент теплоотдачи от воздуха к поверхности гранулы

$$\alpha_b = \lambda_b \text{Nu}_b / d. \quad (15)$$

Входящие в (14) и (15) критерий Прандтля и коэффициент теплопроводности определялись при температуре T_b .

Далее вычисляется критерий Био, находятся значения первых трех корней трансцендентного уравнения (4), вычисляются коэффициенты A_n , B_n и по формуле (3) находятся значения температуры для разных моментов времени (чисел Фурье).

Количество теплоты, требуемое для нагрева массы адсорбента до температуры T_k , вычислялось обычным образом:

$$Q = c \cdot M (T_k - T_c), \quad (16)$$

где T_c – усредненное значение температуры.

Тестирование программы

Описанный алгоритм был реализован на Турбо Паскале. Для тестирования составленной программы была рассмотрена задача из книги [8], решенная с использованием двух номограмм. В качестве адсорбента подразумевался цеолит NaX, имеющий плотность $\rho = 1100 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $\lambda = 0,24 \text{ Вт/(м·К)}$, удельную массовую теплоемкость $c = 870 \text{ Дж/(кг·К)}$, температуру воздуха $T_b = 463 \text{ К}$, начальную температуру гранулы $T_0 = 293 \text{ К}$, конечную температуру $T_k = 458 \text{ К}$, число псевдоожижения $k_p = 4$.

В таблице приведены значения характеристик ПОС, определенных с помощью номограмм и по уточненной методике.

Значения характеристик ПОС, определенных с помощью номограмм и по уточненной методике

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

Сравнение результатов показало, что нахождение с помощью номограмм значений критического числа Лященко и порозности взвешенного слоя дали погрешность 34 % и 66 % соответственно. Это привело к большим значениям критерия Рейнольдса и коэффициента тепло-

отдачи от воздуха к грануле адсорбента и меньшему времени ее прогрева. Количество теплоты, затраченное на выполнение десорбции навески массой 1 кг цеолита NaX, равно 143,6 кДж.

Для выполнения параметрического анализа использовались теплофизические характеристики силикагеля при температуре 293 К: $\rho_c = 1100 \text{ кг/м}^3$, $c_c = 920 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$, $\lambda_c = 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ [8]. Расчет при этих данных показал, что t_a возрастает до 14,2 с, а Q_c – до 153,1 кДж.

Варьирование T_b от 473 до 673 К при десорбции гранулы силикагеля диаметром 2,85 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 диаметром 5,8 мм t_a повышается от 25,5 до 29,8 с, а Q_c – от 162 до 345,7 кДж. 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 ПОС внутри агрегатов ТЭС рабочий участок будет охватывать небольшую зону и возникнет необходимость обеспечить направленное движение влажного воздуха на зону нахождения взвешенного слоя.

В альтернативном варианте осушения воздуха в агрегатах ТЭС силикагель предполагается разместить в разных местах резервуара в виде контейнеров, называемых поглотительными патронами массой 2...3 кг [13]. При толщине слоя силикагеля 0,2 м время насыщения парами воды составляет 3 ч [14]. Согласно обзору [15], в СНГ на ноябрь 2013 г. цена 1 кг технического силикагеля в среднем составляла 50 ₽, а цеолита 140 ₽. Следовательно, затраты на его приобретение и использование будут малы.

Если возникает необходимость осушить фиксированное количество воздуха и адсорбент имеет низкую цену, выпускается в промышленных масштабах, то допустимо реализовать одноразовые поглотительные патроны, снаряженные силикагелем или цеолитом. При необходимости эту процедуру можно повторить несколько раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Усовершенствована методика расчета характеристик десорбции поглотителя влаги, функционирующего по принципу псевдооживленного слоя, позволяющая точнее по сравнению с существующей методикой, в которой используются номограммы, рассчитывать температурное поле внутри гранулы адсорбента и определять время ее высушивания, а также затраты теплоты на эту процедуру. Она может быть использована в проектных организациях и учебном процессе.

Учитывая затраты энергии на восстановление поглотительной способности силикагеля, а также его низкую цену, предложено отказаться от стадии регенерации силикагеля при проведении консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС, а также от стадии регенерации адсорбента, что существенно упрощает и удешевляет процедуру осушения воздуха.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.
2. Алексеев В.П., Вайнштейн Г.Е., Герасимов П.В. Расчет и моделирование аппаратов криогенных установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 280 с.
3. Мозговой С.В. Исследование процессов тепло- и массообмена при очистке газовых смесей в адсорбционных установках: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – М., 2001. – 133 с.
4. Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: учебник. В 2 кн. Кн. 2 / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов, В.В. Захаренко, Т.В. Зиновкина, А.Л. Таран, А.Е. Костянян. – М.: Физматкнига: Логос, 2006. – С. 891–1758. – (Новая университетская книга).
5. Процессы и аппараты пищевых производств: в 2 кн.: кн. 2 / А.Н. Остриков, Ю.В. Красовицкий, А.А. Шевцов, Г.В. Алексеев, А.В. Логинов; под общ. ред. А.Н. Острикова. – СПб.: ГИОРД, 2007. – С. 707–1305.
6. Фролов В.Ф. Лекции по курсу «Процессы и аппараты химической технологии». – 2-е изд., испр. – СПб.: Химиздат, 2008. – 608 с.
7. Никитенко Н.И., Снежкин Ю.Ф., Сорокобая Н.Н. Математическое моделирование диффузионно-фильтрационного теплопереноса при регенерации твердых сорбентов в адсорбере с развитой поверхностью теплопровода // Промышленная теплотехника. – 2009. – Т. 31, № 5. – С. 20–28.

8. Романков П.Г., Фролов В.Ф. Массообменные процессы химической технологии. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
9. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967. – 600 с.
10. Видин Ю.В., Журавлев В.М., Колосов В.В. Теоретические основы теплотехники. Тепломассообмен: учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 344 с.
11. Голдаев С.В. Математическое моделирование и расчеты теплотехнических систем на ЭВМ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 188 с.
12. Бажан П.И., Каневец Г.Е., Селиверстов В.М. Справочник по теплообменным аппаратам. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.
13. Голдаев С.В., Хушвактов А.А. Анализ вариантов осушения влажного воздуха с помощью силикагеля при консервации агрегатов пароводяного тракта тепловой электрической станции // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 325, № 2. – С. 120–126.
14. Голдаев С.В., Хушвактов А.А. Моделирование процесса осушения воздуха слоем силикагеля, используемого при консервации агрегатов пароводяного тракта ТЭС // Научный вестник НГТУ. – 2014. – № 2 (55). – С. 166–175.
15. Обзор рынка силикагеля в СНГ [Электронный ресурс] / Объединение независимых экспертов в области минеральных ресурсов металлургии и химической промышленности. – М.: Инфомайн, 2013. – 65 с. – URL: <http://www.infomine.ru/research/18/441> (дата обращения: 15.11.2013).

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

Assessment of the silica gel desorption feasibility during the conservation of TPS steam circuit units by an improved methodology*

S.V. GOLDAEV¹, A.A. KHUSHVAKTOV²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, 30/A Lenin Prospekt, 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 Street, Dushanbe, 734042, Republic of Tajikistan, post-graduate student. E-mail: alisher1001@mail.ru

The relevance of the work is determined by the need to improve TPP water-steam circuit protection units during downtime to prevent atmospheric corrosion.

The main aim of the study is to calculate the time of heating pellets to the desired temperature and the heat consumed as well as to assess technical feasibility and economic efficiency of implementing the process of silica gel desorption based on the procedure of producing a fluidized bed used in the conservation of TP steam circuit units.

The methods of implementation include exact analytical solutions of the boundary value problem that simulates the process of warming spherical shape grains by hot air, the calculation of the heat transfer coefficient for the improved method, the involvement of relevant theoretical and experimental data on heat-mass exchange between the surface of the granules in the fluidized bed and the environment as well as taking into account the dependence of the physical properties on air temperature. The first three terms are considered in the summation of an infinite series. Finding the values of the roots of the characteristic equation is implemented by interpolation formulas.

The method of calculating the desorption characteristics of the moisture absorber that acts as a fluidized bed which allows a more accurate calculation of the temperature field inside the adsorbent pellet and the time of its drying as well as the heat consumed in this operation in comparison with the existing procedure which uses a nomogram. It can be used in the design organizations and in the training process. Given a low consumption of silica gel to dry the air in the TPP water-steam circuit, its low price and high energy costs of restoring the absorptive properties of the adsorbent, it is proposed to abandon the stage of regeneration of the adsorbent, which greatly simplifies and reduces the cost of the dehumidification procedure.

Keywords: atmospheric corrosion, modeling, diffusion, desorption isotherms, draining adsorbent, thermal power plant water-steam circuit, silica gel, zeolite

* Received 5 June 2014.

REFERENCES

1. Keltsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoi tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p.
2. Alekseev V.P., Vainshtein G.E., Gerasimov P.V. *Raschet i modelirovanie apparatov kriogennykh ustanovok* [Calculation and simulation devices cryogenic plants]. Leningrad, Energoatomizdat, 1987. 280 p.
3. Mozgovoi S.V. *Issledovanie protsessov teplo- i massoobmena pri ochildke gazovykh smesei v adsorbtsionnykh ustanovkakh*. Diss. kand. fiz.-mat. nauk [Study of heat and mass transfer in the purification of gas mixtures in adsorption units. PhD phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2001. 133 p.
4. Ainshtein V.G., Zakharov M.K., Nosov G.A., Zakharenko V.V., Zinovkina T.V., Taran A.L., Kostanyan A.E. *Obshchii kurs protsessov i apparatov khimicheskoi tekhnologii* [The general course of processes and devices of chemical technology]. Moscow, Fizmatkniga&Logos Publ., 2006, vol. 2, pp. 891–1758.
5. Ostrikov A.N., Krasovitskii Yu.V., Shevtsov A.A., Alekseev G.V., Loginov A.V. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and equipment for food production]. St. Petersburg, GIORD Publ., 2007, vol. 2, pp. 707–1305.
6. Frolov V.F. *Leksii po kursu «Protsessy i apparaty khimicheskoi tekhnologii»*. [Lectures on "Processes and apparatuses of chemical technology"]. St. Petersburg, Khimizdat Publ., 2008. 608 p.
7. Nikitenko N.I., Snezhkin Yu.F., Sorokovaya N.N. *Matematicheskoe modelirovanie diffuzionno-filtratsionnogo teplomassoperenosa pri regeneratsii tverdykh sorbentov v adsorbere s razvitoi poverkhnost'yu teploprovoda* [Mathematical modelling of diffusion-percolation heat mass transfer at regenerations of firm sorbents in the adsorber with the advanced surface of the supply of heat]. *Promyshlennaya teplotekhnika – Industrial Heat Engineering*, 2009, vol. 31, no. 5, pp. 20–28.
8. Romankov P.G., Frolov V.F. *Massobmennye protsessy khimicheskoi tekhnologii* [Mass transfer processes of chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990. 384 p.
9. Lyikov A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [The theory of heat conduction]. Moscow, Vyssh. Shkola Publ., 1967. 600 p.
10. Vidin Yu.V., Zhuravlev V.M., Kolosov V.V. *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki. Teplomassoobmen*. [Theoretical basics of heat. Heat and mass transfer]. Krasnoyarsk, KGTU Publ., 2005. 344 p.
11. Goldaev S.V. *Matematicheskoe modelirovanie i raschety teplotekhnicheskikh sistem na EVM* [Mathematical modeling and calculations of thermal systems on PC]. Tomsk, TPU Publ., 2011. 188 p.
12. Bazhan P.I., Kanevets G.E., Seliverstov V.M. *Spravochnik po teploobmennym apparatam* [Handbook of heat transfer devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 368 p.
13. Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. *Analiz variantov osusheniya vlazhnogo vozdukha s pomoshch'yu silikagelya pri konservatsii agregatov parovodyanogo trakta teplovoi elektricheskoi stantsii* [Analyzing options of moist air dehumidifying with silica gel at conservation of units of steam and water tract at thermal power plant]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 120–126.
14. Goldaev S.V., Khushvaktov A.A. *Modelirovanie protsessa osusheniya vozdukha sloem silikagelya, ispol'zuemogo pri konservatsii agregatov parovodyanogo trakta TES* [Simulation of the dehumidification air process by a silica gel layer used for TPP steam and water tract unit protection]. *Nauchnyi vestnik NGTU – Science Bulletin of Novosibirsk State Technical University*, 2014, no. 2 (55), pp. 166–175.
15. *Obzor rynka silikagelya v SNG* [Market overview of silicain the CIS]. Moscow, Infomain Publ., 2013. 65 p. Available at: <http://www.infomine.ru/research/18/441/> (accessed 15.11.2013).