

УДК 66.047

Закономерности формирования массопроводных свойств керамических изделий на основе отходов промышленных котельных

Е.В. Гусев¹, А.И. Сокольский², А.А. Сергиенкова¹, Ю.А. Родьякаева²
¹ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический институт»,

г. Иваново, Российская Федерация;

E-mail: gusev_pcm@mail.ru

²ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: Интенсификация тепловой обработки влажных капиллярно-пористых тел и их качество во многом определяются внутренним переносом тепла и вещества в материале. Исследованию массопроводных свойств различных тел посвящены работы А.В. Лыкова, С.П. Рудобашты, Э.Н. Очнева, Н.В. Чураева, которые подтверждают важность определения характеристик внутреннего переноса влаги для расчета динамики полей концентраций по толщине материала и массообменных критериев, устанавливающих соотношение потоков влаги и тепла. Для изделий из глинозольной керамики, различных по составу и пористой структуре, определение динамики изменения коэффициентов массопроводности в ходе тепловой обработки является актуальным направлением исследований.

Материалы и методы: Для определения коэффициентов массопроводности высушиваемого материала использован кинетический метод, основанный на уравнении массопроводности и экспериментальных кривых сушки влажного материала различных толщин, составов и степени уплотнения (прессования) при конвективном подводе теплоты. Для обобщения и оптимизации экспериментальных данных использован достаточно известный в технологии сушки метод В.В. Красникова, на основании которого получены расчетные кривые сушки для глинозольных изделий-сырцов различных толщин.

Результаты: Получены обобщенные и расчетные кривые сушки для различных толщин исследуемого материала и зависимости коэффициентов массопроводности от влагосодержания глинозольных изделий-сырцов различных составов и удельных давлений прессования при изотермических условиях теплоподвода в целях анализа влияния состава и степени уплотнения на интенсивность перемещения влаги внутри высушиваемого тела.

Выводы: Полученные данные о кинетике сушки и коэффициентах массопроводности позволили установить виды связи влаги с материалом и механизмы ее переноса в изделиях-сырцах из глинозольной керамики, а также выявить пути к снижению энергозатрат для сушилок с конвективным подводом теплоты за счет регулирования составов, структур и толщин материала, что в конечном итоге оказывает значительное влияние на энергоэффективность процесса сушки.

Ключевые слова: массопроводность, глинозольная керамика, конвективная сушка, влагосодержание, капиллярно-пористое тело, давление прессования, интенсификация тепловой обработки, энергоэффективность.

Regularities of formation of mass conductivity properties of ceramics based on wastes of industrial boiler houses

E.V. Gusev¹, A.I. Sokolsky², A.A. Sergienkova¹, Y.A. Rodyakayeva¹

¹Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation,

²Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation

E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Abstract

Background: Intensification of heat treatment of wet capillary-porous bodies and their quality are largely determined by the internal transfer of heat and matter in the material. The problems of mass transfer properties in different bodies are considered in the works by A.V. Lykov, S.P. Rudobashta, E.N. Ochnev, N.V. Churayev that confirm the importance of obtaining the characteristics of internal moisture transfer for calculating the dynamics of concentration fields by the material thickness and mass transfer criteria determining the relation between the flows of moisture and heat. For products made of clay ceramics of different compositions and porous structures, a relevant research direction is determining the dynamics of the changes in mass conductivity coefficients under heat treatment.

Materials and methods: To determine the mass-conductivity coefficients of the material to be dried, we used a kinetic method based on the equation of mass conductivity and experimental curves for drying wet materials of different thicknesses, compositions, and compaction degrees (compression) under convective heat input. For generalization and optimization of the experimental data, we applied the well-known method proposed by V.V. Krasnikov, which allowed us to obtain the calculated drying curves for alumina articles of different thicknesses.

Results: We have obtained generalized and calculated drying curves for various thicknesses of the material and the dependence of the mass conductivity coefficients on the moisture content of alumina articles of various compositions and spe-

cific pressing pressures under isothermal conditions of heat supply for analyzing the effect of composition and compaction degree on the intensity of moisture movement inside the body during the drying process.

Conclusions: The obtained data on the kinetics of drying and the coefficients of mass conductivity enabled us to establish the types of moisture bond with the material and the mechanisms of its transfer in the raw materials from clay ceramics, and also to identify the ways to reduce energy costs for dryers with convective heat supply by controlling the composition, structure and material thickness.

Key words: mass conductivity, clay ash pottery, convection drying, moisture content, capillary-porous body, compaction pressure, intensification of heat treatment, energy efficiency.

DOI: 10.17588/2072-2672.2018.1.033-039

Введение. Одним из направлений утилизации отходов промышленных котельных является использование их в производстве керамических изделий различного назначения путем термической обработки (сушки и обжига).

Использование в составе керамических изделий видоизменяемых (тонкодисперсных, менее 0,1 мм) сходных по химическим составам глины и золы гидроудаления дает возможность решать вопросы не только экологии окружающей среды, но и интенсификации процессов тепловой обработки в силу более развитой тонкопористой структуры и наличия внутренних источников теплоты [1].

В современных условиях для выбора способов термической обработки керамических изделий-сырцов, их аппаратного оформления с учетом режимов энергосбережения необходимо иметь данные об интенсивности удаления капиллярно-связанной влаги из материала различной структуры [2–4].

Процесс сушки является предварительной стадией перед обжигом керамических изделий, на которой формируется качество изделий-сырцов, их структурно-механические свойства.

Интенсификация процесса конвективной сушки, ее продолжительность при соответствующем качестве изделий в производстве глинозольной керамики (ГЗК) во многом определяются внутренней капиллярно-пористой структурой изделий-сырцов и их теплопроводными свойствами [4–7].

Основным параметром массопереноса во влажных материалах в условиях изотермической сушки является коэффициент теплопроводности, характер изменения которого при различных влагосодержаниях определяется формой связи влаги с материалом и видом ее перемещения в теле.

Рассмотрим определение коэффициентов переноса влаги внутри глинозольных образцов кирпичиков-сырцов трех составов (З:Г(%))={30:70; 40:60; 50:50} с разной степенью уплотнения (прессования) на основе обобщенно-расчетных кривых сушки при конвективном подводе теплоты.

Для изготовления исследуемых изделий использовалась технология полусухого формования из тонкодисперсного пресс-порошка.

В качестве сырьевых материалов для композиционного материала использовались:

глина Верхнеландеховского месторождения и зола гидроудаления Ивановской ТЭС-2, пригодные по химико-минералогическим составам для изготовления стеновых и отделочных керамических изделий [1].

Для получения тонкодисперсного пресс-порошка (менее 0,1 мм) после предварительной фракционной подготовки сырья использовался сушильный аппарат вихревого типа с восходящим закрученным газодисперсным потоком, позволяющий совмещать различные технологические процессы (сушка, смешивание, измельчение, распыливание и др.).

Полусухое формование изделий-сырцов влажностью 8–12 % производилось на гидравлическом прессе при скорости нагружения 0,5 МПа/с и различных удельных давлениях (15; 20; 25 МПа) с выдержкой продолжительностью 15 с [9].

Методы исследования. В настоящее время для описания внутреннего массопереноса в системах с твердой фазой используются следующие основные методы: физический, занимающийся анализом механизмов тепло-массопереноса; кинетический, использующий уравнения теплопроводности и кинетических закономерностей процесса; термодинамический, основывающийся на обработке экспериментальных кривых десорбций [5–6, 13]. Для тонколистовых и гранулированных материалов широко используется зональный кинетический метод для различных массообменных процессов (сушки, адсорбции, экстрагирования), основывающийся на данных кинетики процесса в условиях, исключающих внешнедиффузионное сопротивление в окружающей среде [10–12]. Для высушиваемых толстых тел наилучшие данные по теплопроводным свойствам в области капиллярно-связанной влаги получают при использовании кинетического метода, использующего уравнение теплопроводности и кинетические закономерности локальных концентраций в твердом теле [5–6].

Для расчета коэффициента переноса влаги a_m внутри тела в процессе сушки в изотермических условиях был применен кинетический метод на основе определения локальных влагосодержаний по толщине материала. При этом были использованы следующие выражения [2, 5]:

$$q_m = a_m \rho_o \nabla U = a_m \rho_o \frac{2(U_c - U_n)}{R}; \quad (1)$$

$$a_m = \frac{R^2}{K_{i_m} \bar{U}} \frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{R}{\Gamma} \frac{\partial U}{\partial \tau} \operatorname{tg} \varphi, \quad (2)$$

где q_m – плотность потока влаги, кг/(м²с); ρ_o – плотность сухого материала, кг/м³; $R = 0,5h$ – характерный размер (половина толщины пластины), м; $K_{i_m} = \Gamma \frac{R}{U} \operatorname{tg} \varphi$ – массообменный критерий Кирпичева ($0 < K_{i_m} < 2$); $\Gamma = 3$ – постоянный числовой коэффициент для пластины; $\operatorname{tg} \varphi = \frac{\nabla U}{\partial R}$ – тангенс угла наклона прямой, построенной из кривых сушки для приведенных толщин h при текущем времени τ и соответствующем ему влагосодержанию U .

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки по исследованию кинетических закономерностей конвективной сушки с замкнутой циркуляцией теплоносителя.

Для создания изотермических условий сушки в рабочей камере 1 поток нагретого теплоносителя, создаваемого вентилятором 2 и калорифером 4, контролировался за мерами температур термопарами 7 на входе и выходе. Влажный образец-сырец 5, помещенный в камеру 1, симметрично обтекался горячим потоком воздуха по обеим поверхностям высушиваемого материала. Рабочее оборудование 1–4 имеет теплоизоляцию.

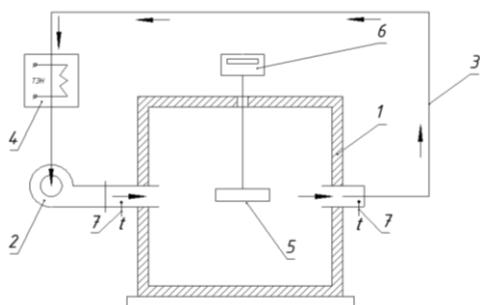


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – сушильная камера; 2 – радиальный (центробежный) вентилятор; 3 – газоход; 4 – воздухоподогреватель; 5 – высушиваемое изделие-сырец; 6 – весы электронные; 7 – термопары ХК

Экспериментальные исследования в сушильной камере по измерению веса образца и параметрам теплоносителя (температуры и скорости) выполнены с использованием электронного оборудования (соответственно, весами, термопарами ХК, цифровыми мультиметром и анемометром). Регулирование скорости и температуры потока теплоносителя осуществлялось регуляторами напряжения.

Зависимости влагосодержания от времени тепловой обработки (кривые сушки $U = f(\tau)$) для пластинчатых глинозольных образцов-

сырцов различных толщин, составов и степени уплотнения определялись при следующих параметрах сушильного агента (воздуха): температура 110 °С, скорость 3 м/с, относительная влажность воздуха 4–5 %.

В целях оптимизации снятых кинетических данных и расчета обобщенных кривых сушки был использован широко распространенный метод В.В. Красникова, по которому все кривые сушки материала, снятые при различных режимах и толщинах, должны объединяться в одну общую кривую сушки [8]. Данное предположение было проверено для глинозольных образцов-сырцов различных толщин.

Результаты исследования. На рис. 2–4 в качестве примера приведены кривые сушки для глинозольных образцов-сырцов различных толщин состава Г:З=70:30 % (масс.) при удельном давлении прессования 20 МПа.

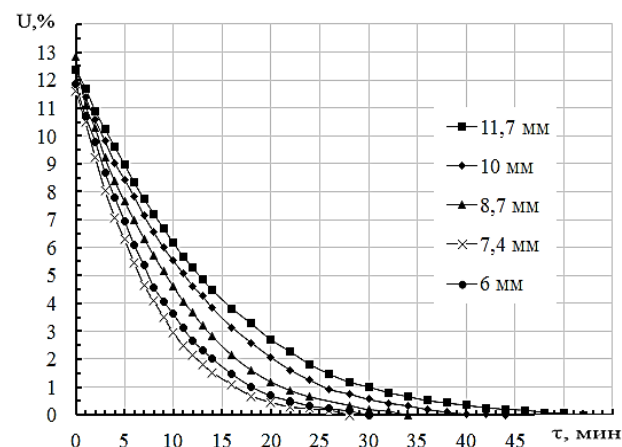


Рис. 2. Экспериментальные кривые сушки глинозольных образцов-сырцов различной толщины

Анализ приведенных зависимостей (рис. 2) показывает, что с увеличением толщины изделия продолжительность сушки возрастает, т.е. возрастают энергозатраты на тепловую обработку.

Анализ экспериментальных данных по кинетике сушки глинозольных образцов-сырцов в

системе координат $\frac{U - U_k}{U_n}; \frac{\tau}{\tau_c}$ показал, что се-

мейство кривых сушки, снятых при разных толщинах тела, трансформируется в единую обобщенную кривую сушки при соответствующих составах и степенях уплотнения (рис. 3).

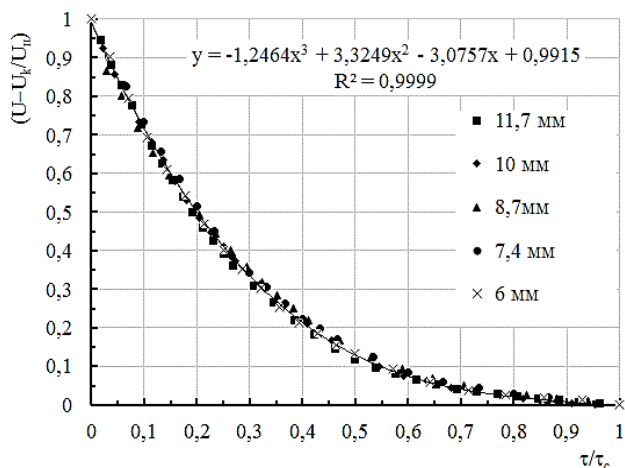


Рис. 3. Обобщенная кривая сушки глинозольных образцов-сырцов различной толщины

Исходные данные для расчета обобщенной кривой сушки приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры экспериментальных кривых сушки глинозольных образцов-сырцов состава Г:З=70:30 полусухого прессования при давлении 20 МПа

Параметры процесса	Значения параметров				
Толщина образца h , мм	11,7	10	8,7	7,4	6,0
Начальная влажность образца U_n , %	12,3	12,4	12,6	11,8	11,5
Конечная влажность образца U_k , %	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Время сушки τ_c , мин	52	44	36	31	28

Для получения оптимизированных данных по кинетике удаления влаги из материала, т.е. приведения начальной (12 %) и конечной влажности (0,3 %) к единому характеру в обратном порядке на основе обобщенной кривой сушки, были определены расчетные кривые сушки (рис. 4).

Таблица 2. Параметры расчетных кривых сушки глинозольных образцов-сырцов состава Г:З=70:30 полусухого прессования при давлении 20 МПа

Параметры процесса	Значения параметров				
Толщина образца h , мм	11,7	10	8,7	7,4	6,0
Начальная влажность образца U_n , %	12	12	12	12	12
Конечная влажность образца U_k , %	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Время сушки τ_c , мин	40	34	28	26	22

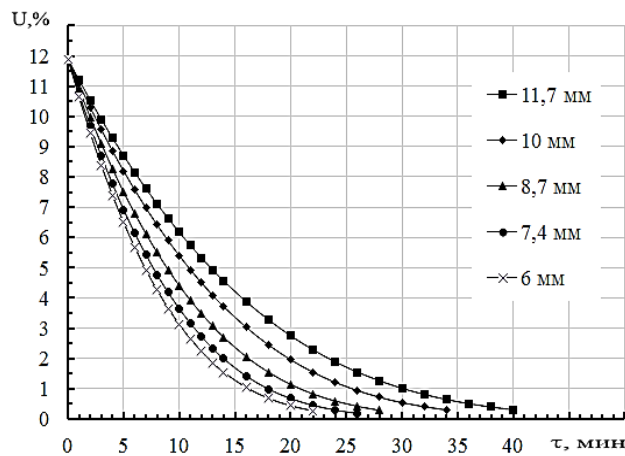


Рис. 4. Расчетные кривые сушки глинозольных образцов-сырцов различной толщины

Аналогичные эксперименты и расчеты по кинетике сушки были произведены для различных составов глинозольных образцов-сырцов и удельных давлений прессования.

В результате графо-аналитической обработки расчетных кривых сушки глинозольных образцов кирпичиков-сырцов различных толщин были определены зависимости $tg\varphi = f(\tau)$, характеризующие изменение градиентов влагосодержаний в ходе тепловой обработки. В качестве примера для состава Г:З=70:30 % (масс.) и давления прессования 20 МПа кривая $tg\varphi = f(\tau)$ приведена на рис. 5.

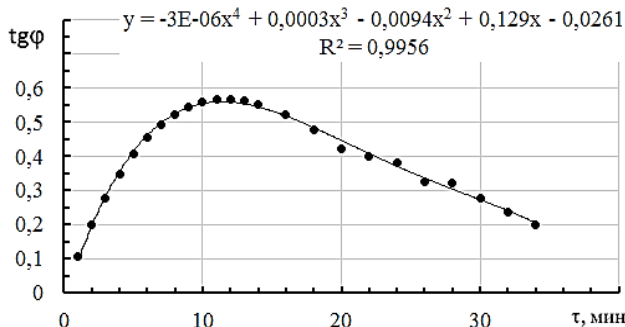


Рис. 5. Зависимость тангенсов наклона прямых в процессе сушки для образцов-сырцов состава Г:З=70:30 при давлении прессования 20 МПа

Полученные расчетные закономерности кинетики сушки, по сравнению с экспериментальными кривыми, позволяют более точно определить величину $tg\varphi = f(\tau)$ (по величине достоверности аппроксимации R^2) и характер ее изменения (рис. 5).

Результаты по определению коэффициентов массопроводности для приведенной толщины изделия $h = 10$ мм различных составов и давлений прессования по выражению (2) представлены на рис. 6–8.

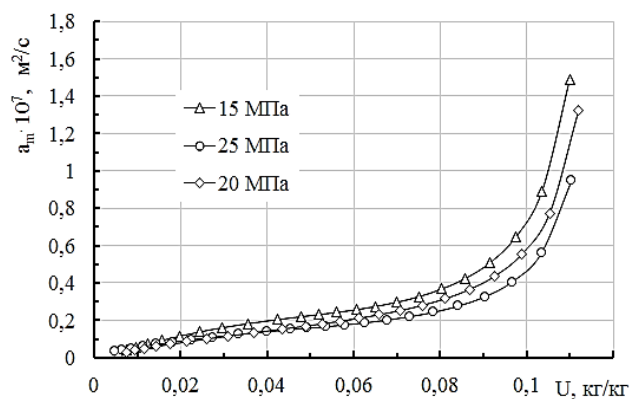


Рис. 6. Зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания для образцов-сырцов состава Г:3=70:30 при различных давлениях прессования

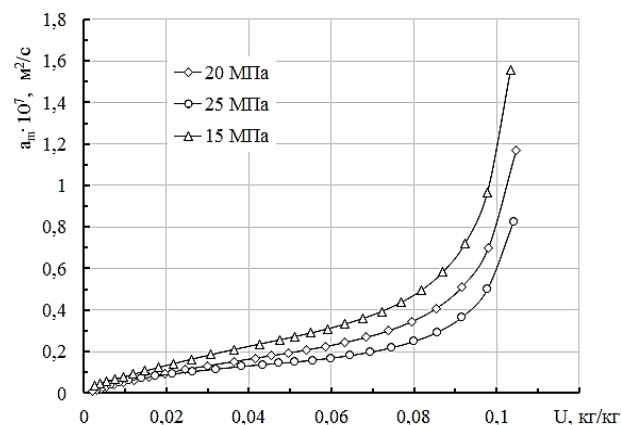


Рис. 7. Зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания для образцов-сырцов состава Г:3=60:40 при различных давлениях прессования

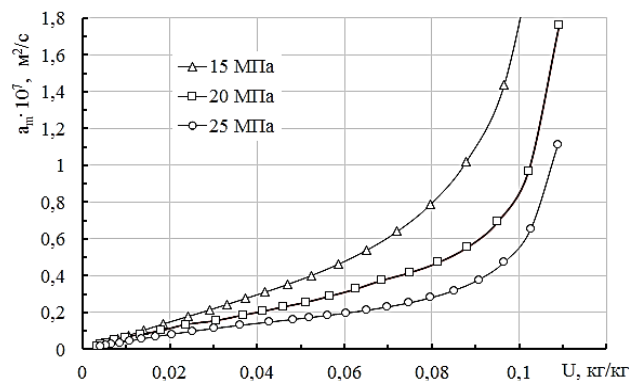


Рис. 8. Зависимость коэффициента массопроводности от влагосодержания для образцов-сырцов состава Г:3=50:50 при различных давлениях прессования

Анализ приведенных зависимостей коэффициентов массопроводности от влагосодержаний (рис. 6–8) показывает, что с увеличением содержания золы интенсивность удаления влаги из внутренних слоев материала к его поверхности существенно повышается, а с увеличением степени уплотнения (давления прессования) – снижается; перенос влаги внутри материала

осуществляется в основном в виде жидкости (правые ветви кривых соответствуют капиллярному массопереносу, а левые ветви кривых осмотическому и незначительно пародиффузионному [6]).

Зависимости $a_m = f(U)$ для глинозольных прессованных масс аналогичны зависимостям для керамических капиллярно-пористых материалов при их сушке по характеру и величине коэффициента массопроводности, для приближенного определения которого предложены следующие выражения [5–6]:

$$\frac{a_{mo}}{a_m} = 1 - A\rho_0 U; \quad (3)$$

$$a_{mo} = \frac{1}{3600A_0} \left(\frac{T_c}{273} \right)^n = 0,42 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}, \quad (4)$$

где для керамических влажных изделий имеются следующие постоянные коэффициенты: $A = 0,0032$, $\rho_0 = 1600 \text{ кг/м}^3$, $A_0 = 57,4 \cdot 10^5$, $T_c = 383 \text{ К}$ [2].

Дальнейшая тепловая обработка (обжиг) глинозольных образцов в автоматизированной муфельной печи при скорости подъема температуры $3 \text{ }^\circ\text{C/мин}$ и температуре обжига $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ показала, что изготовленные керамические изделия по физико-механическим свойствам соответствуют маркам М150-200.

Выводы. На основе полученных результатов можно сделать ряд выводов:

1. Установлена возможность применения метода обобщения В.В. Красникова для оптимизации экспериментальных данных по кинетике сушки в зависимости от ее продолжительности и начальной влажности материала из глинозольной керамики.

2. По результатам исследования установлена зависимость интенсивности переноса влаги внутри глинозольного материала различного состава от степени уплотнения (прессования) структуры тела.

3. При сравнении полученных кривых массопроводности глинозольных образцов различного состава и степени уплотнения с аналогичными данными при сушке керамических изделий установлено, что коэффициенты массопроводности в обоих случаях имеют тот же порядок величин и относятся к капиллярно-пористым телам.

4. Представленные кинетические зависимости формы связи влаги с материалом от структуры материала позволяют интенсифицировать процесс конвективной сушки изделий-сырцов из глинозольной керамики не только за счет повышения температуры теплоносителя на 30–40 %, но и за счет формирования пористой структуры и геометрических размеров изделий, влияющих на энергоэффективность процессов тепломассопереноса.

Список литературы

1. **Сайбулатов С.Ж., Сулейменов С.Т., Кулбеков М.** Золоы ТЭС в производстве строительной керамики. – Алма-Ата: Казахстан, 1986. – 144 с.

2. **Тепловые** процессы в технологии силикатов / Ралко А.В., Крупа А.А., Племянников Н.Н. и др. – Киев: Вища шк. Головное изд-во, 1986. – 232 с.

3. **Сажин В.Б., Сажин Б.С.** Научные основы стратегии выбора эффективного сушильного оборудования / под общ. ред. Б.С. Сажина. – М.: Химия, 2013. – 554 с.

4. **Федосов С.В.** Теплоперенос в технологических процессах строительной индустрии. – Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. – 364 с.

5. **Лыков А.В.** Теплообмен: справочник. – М.: Энергия, 1971. – 560 с.

6. **Рудобашта С. П.** Массоперенос в системах с твердой фазой. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

7. **Чураев Н.В.** Физикохимия процессов массопереноса в пористых телах. – М.: Химия, 1990. – 272 с.

8. **Красников В.В.** Кондуктивная сушка. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

9. **Гусев Е.В., Сокольский А.И.** Оценка возможности использования местных сырьевых материалов для производства глинозольного кирпича // Сборник научных трудов по материалам круглого стола, посвященного научной школе акад. РААСН, д-ра техн. наук, проф. С.В. Федосова. – Иваново, 2013. – С. 74–76.

10. **Зональный** метод определения зависимости коэффициента массопроводности от концентрации / Э.Н. Очнев, С.П. Рудобашта, А.Н. Плановский, В.М. Дмитриев // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – Т. IX, № 4. – С. 491–495.

11. **Натареев А.С., Созинов В.П.** Применение зонального метода для определения теплофизических характеристик пластических масс // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 4. – С. 18–19.

12. **Основные** параметры математической модели процесса сушки листовой фибры / А.Л. Павлов, С.В. Федосов, В.А. Круглов, Е.В. Гусев // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 1994. – Т. 37, вып. 9. – С. 155–161.

13. **Гусев Е.В., Сокольский А.И., Аксенчик К.В.** Определение массопроводных свойств капиллярно-пористых тел в области адсорбционно-связанной влаги // Материалы международной научной конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XIX Бенардосовские чтения). Т. II (Теплоэнергетика). – Иваново, 2017. – С. 210–214.

References

1. Saybulatov, S.Zh., Suleymenov, S.T., Kulbekov, M. *Zoly TES v proizvodstve stroitel'noy keramiki* [Ashes of thermal power plants in the production of structural ceramics]. Alma-Ata, Kazakhstan, 1986. 144 p.

2. Ralko, A.V., Krupa, A.A., Nemyev, N.N., Alek-senko, N.V., Zinko, Yu.D. *Teplovyye protsessy v tekhnologii silikatov* [Thermal processes in the technology of

silicates]. Kiev, Vishcha shk. Golovnoye izd-vo, 1986. 232 p.

3. Sazhin, V.B., Sazhin, B.S. *Nauchnye osnovy strategii vybora effektivnogo sushil'nogo oborudovaniya* [Scientific foundations of selecting the strategy of effective drying equipment]. Moscow, Khimiya, 2013. 554 p.

4. Fedosov, S.V. *Teplomassopereenos v tekhnologicheskikh protsessakh stroitel'noy industrii* [Heat and mass transfer in the technological processes of construction industry]. Ivanovo, ИПК «ПресСто», 2010. 364 p.

5. Lykov, A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass transfer: a reference book]. Moscow, Energiya, 1971. 560 p.

6. Rudobashta, S.P. *Massopereenos v sistemakh s tverdoy fazoy* [Mass transfer in solid-phase systems]. Moscow, Khimiya, 1980. 248 p.

7. Churayev, N.V. *Fizikokhimiya protsessov massopereenosa v poristyykh telakh* [Physicochemistry of mass transfer processes in porous bodies]. Moscow, Khimiya, 1990. 272 p.

8. Krasnikov, V.V. *Konduktivnaya sushka* [Conductive drying]. Moscow, Energiya, 1973. 288 p.

9. Gusev, E.V., Sokolsky, A.I. *Otsenka vozmozhnosti ispol'zovaniya mestnykh syr'evykh materialov dlya proizvodstva glinozol'nogo kirpicha* [Evaluation of the possibility of using local raw materials for the production of clay bricks]. *Sbornik nauchnykh trudov po materialam kruglogo stola, posvyashchennogo nauchnoy shkole akad. RAASN, d-ra tekhn. nauk, prof. S.V. Fedosova* [Collected scientific works of the round table devoted to the Scientific School of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences of Professor S.V. Fedosov, Doctor of Engineering]. Ivanovo, 2013, pp. 74–76.

10. Ochnev, E.N., Rudobashta, S.P., Planovskiy, A.N., Dmitriev, V.M. *Zonal'nyy metod opredeleniya zavisimosti koeffitsienta massoprovodnosti ot kontsentratsii* [A zonal method for determining the dependence of mass-conductivity coefficient on concentration]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1975, vol. IX, no. 4, pp. 491–495.

11. Natarayev, A.S., Sozinov, V.P. *Primenenie zonal'nogo metoda dlya opredeleniya teplofizicheskikh kharakteristik plasticheskikh mass* [Application of the zonal method to determining of plastics thermophysical characteristics]. *Vestnik IGEU*, 2007, issue 4, pp. 18–19.

12. Pavlov, A.L., Fedosov, S.V., Kруглов, V.A., Gusev, E.V. *Osnovnye parametry matematicheskoy modeli protsessa sushki listovoy fibry* [The main parameters of the mathematical model of sheet fiber drying]. *Izvestiya vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 1994, vol. 37, no. 9, pp. 155–161.

13. Gusev, E.V., Sokolsky, A.I., Ak-senchik, K.V. *Opredelenie massoprovodnykh svoystv kapillyarno-poristykh tel v oblasti adsorbtsionno-svyazannoy vlagi* [Determination of the mass-transfer properties of capillary-porous bodies in the region of adsorption-bound moisture]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektro- i teplo-tekhnologii» (XIX Benardosovskie chteniya), T.II (Teploenergetika)* [Proceedings of the International Scientific Conference «Status and Prospects of Developing Electric and Heat Technologies» (XIX Benardos Readings)]. Ivanovo, 2017, pp. 210–214.

Гусев Евгений Валентинович,

ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,

кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения, специальных технологий и технологических комплексов,

e-mail: gusev_pcm@mail.ru ; k_pcm@ivgpu.com

Gusev Evgeny Valentinovich,
Ivanovo State Polytechnic University,
Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of the Construction Materials Science, Special Technologies and Technological Complexes Department,
e-mail: gusev_pcm@mail.ru; k_pcm@ivgpu.com

Сокольский Анатолий Иванович,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru
Sokolsky Anatoly Ivanovich,
Ivanovo State Power Engineering University,
Doctor of Engineering Sciences (Post-Doctoral Degree), Professor of the Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Сергиенкова Алена Андреевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный политехнический университет»,
аспирант кафедры строительного материаловедения, специальных технологий и технологических комплексов,
e-mail: k_pcm@ivgpu.com
Sergienkova Alena Andreyevna,
Ivanovo State Polytechnic University,
Post-Graduate Student of the Construction Materials Science, Special Technologies and Technological complexes Department,
e-mail: k_pcm@ivgpu.com

Родякаева Юлия Алексеевна,
ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант 1 курса,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru
Rodyakayeva Yulia Alekseyevna,
Ivanovo State Power Engineering University,
1st Year Master-Program Student,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru