

ISSN 1561-8323 (Print)  
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 536.244, 536.27  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

Поступило в редакцию 23.04.2018  
Received 23.04.2018

**М. Ю. Лях, А. В. Акулич, член-корреспондент П. С. Гринчук**

*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь*

## СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПОЛУЧЕНИИ СТЕКЛЯННЫХ МИКРОСФЕР В ГАЗОПЛАМЕННОМ РЕАКТОРЕ

**Аннотация.** В работе была предложена модель, описывающая процесс получения стеклянных микросфер в газопламенном реакторе рекуперативного типа. На основе описанной математической модели нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке, учитывающей сопряженный теплообмен между рабочей средой реактора и рекуператором, проведено моделирование и оптимизация соответствующих процессов по геометрическим и режимным параметрам. В качестве оптимизируемой характеристики использовалось время пребывания частиц стекла в реакторе при температуре выше 1400 °С, которое определено на основе данных дифференциальной сканирующей колориметрии.

В результате оптимизационных расчетов найдена область параметров реактора (диаметр и высота, расход природного газа, расход продуваемого через рекуператор воздуха), а также режимных параметров (диаметр и расход частиц стекла), в которых возможно формирование микросфер. Полученная информация может служить основой для проектирования эффективного газопламенного реактора для получения стеклянных микросфер.

**Ключевые слова:** полые стеклянные микросферы, высокотемпературный газовый реактор, рекуператор

**Для цитирования:** Лях, М. Ю. Сопряженный теплообмен при получении стеклянных микросфер в газопламенном реакторе / М. Ю. Лях, А. В. Акулич, П. С. Гринчук // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 353–363. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

**Maria Yu. Liakh, Andrei V. Akulich, Corresponding Member Pavel S. Grinchuk**

*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

## CONJUGATE HEAT TRANSFER IN THE PRODUCTION OF GLASS MICROSPHERES IN A GAS-FLAME REACTOR

**Abstract.** A model for the process of glass microsphere production in a recuperative gas-flame reactor was proposed. Based on the described mathematical model of heating and motion of particles in a high-temperature gas stream, which takes into account conjugate heat exchange between the reactor's operating environment and the recuperator, the appropriate processes were modeled and optimized by geometric and regime parameters. The particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C, which was determined by data of differential scanning colorimetry, was used as an optimized characteristic.

As a result of optimization calculations, the reactor parameters (diameter and height, natural gas flow rate, air flow rate in the recuperator) were found, as well as regime parameters (diameter and flow rate of glass particles), under which microspheres can be formed. The information obtained can be a basis for designing an effective gas-flame reactor for production of glass microspheres.

**Keywords:** hollow glass microspheres, high temperature gas reactor, recuperator

**For citation:** Liakh M. Yu., Akulich A. V., Grinchuk P. S. Conjugate heat transfer in the production of glass microspheres in a gas-flame reactor. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 3, pp. 353–363 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-3-353-363>

**Введение.** Со стремительным развитием промышленности, строительства и медицины возникает необходимость в создании новых материалов, которые были бы устойчивы к интенсивным механическим и химическим воздействиям в широком температурном диапазоне и при этом обладали бы низким коэффициентом теплопроводности и малым весом. К таким материалам можно отнести композиционные материалы, использующие в качестве наполнителя полые стеклянные микросферы [1], которые представляют собой мелкодисперсные легкосыпучие по-

рошки, состоящие из тонкостенных (0,5–2 мкм) замкнутых газонаполненных стеклянных оболочек сферической формы диаметром 20–250 мкм. Правильная сферическая форма и состав стекла способствуют высокой механической прочности и химической стойкости данного материала, а также обеспечивают низкий коэффициент теплопроводности, малое водопоглощение и радиопрозрачность. Помимо указанных свойств, полые стеклянные микросферы обладают низкой насыпной плотностью и устойчивы к высоким температурам.

Полые стеклянные микросферы и материалы на их основе благодаря уникальным характеристикам имеют широкое применение в нефтегазодобывающей и химической промышленности (буровые растворы, тампонажные материалы, катализаторы), судо- и авиастроении (облегченные материалы), строительстве (лакокрасочные материалы, многослойные конструкционные, звукозащитные и другие строительные материалы), автомобилестроении (кузовные детали, панели внутренней отделки) и др. [2–8].

Среди известных способов получения полых стеклянных микросфер наибольшее распространение получили два: золь-гель и плавление фритты в высокотемпературном газовом потоке<sup>1</sup>.

Построение эффективного лабораторного и промышленного реактора для получения полых стеклянных микросфер возможно только на основе прогнозирования его параметров методами математического моделирования. Одна из ключевых проблем, решение которой необходимо найти – это конструкция реактора. Использование плазмы для технологии массового производства экономически неоправданно. Поэтому рассматриваются варианты создания реакторов с газопламенным обогревом. Достижение высокой температуры требует дополнительной тепловой изоляции стенок реактора. Но в этом случае при работе со стеклянным материалом через определенное время на стенках реактора начинает расти гарнисажный слой, который останавливает работу реактора. Использование неизолированного реактора требует или сверхвысоких затрат энергии или вообще не позволяет достичь требуемого уровня температур. В данной работе впервые рассматривается новый тип реактора для получения стеклянных микросфер – реактор рекуперативного типа. По щелевым каналам, организованным в стенках печи, продувается воздух. Этот воздух разогревается и подается на технологическую горелку реактора. Тем самым поднимается общая температура пламени, работа реактора становится более экономичной и энергоэффективной. Одновременно с этим, управление расходом воздуха позволяет управлять и температурой стенок реактора, что важно для устранения роста гарнисажного слоя. В данной работе представлена комплексная модель нагрева частиц исходного сырья в высокотемпературном газовом потоке, учитывающая сопряженный теплообмен между реактором и рекуператором.

**Постановка задачи. Математическая модель.** Схема реактора с расчетной областью представлена на рис. 1. Образование полых стеклянных микросфер происходит в вертикальном цилиндрическом реакторе (зона 1) высотой  $H$  и радиусом  $R_0$ . Подача дымовых газов, образованных в результате сжигания смеси воздуха и природного газа в необходимой стехиометрической пропорции, осуществляется снизу реактора с заданным расходом  $G_g$ , соответствующим мощности горелки. Частицы стекла подаются в реактор с одинаковой начальной скоростью  $U_{p,0}$  и температурой  $T_{p,0}$  с помощью транспортного газа (аргона). Рекуператор представляет собой систему двух кольцевых каналов (зона 2 и 3), соединенных снизу, подача воздуха в который осуществляется с расходом  $G_a$  и температурой  $T_{a,0}$ , соответствующей температуре окружающей среды  $T_{env}$ . Толщины внутреннего и внешнего каналов рекуператора соответственно равны  $d_{int}$  и  $d_{ext}$ . Высота внутреннего канала совпадает с высотой реактора, а высота внешнего ( $H_0$ ) несколько меньше из-за конструктивных особенностей подачи воздуха в реактор. Следует отметить, что в рамках данного исследования рассмотрены только случаи работы реактора с первичной подачей воздуха по внутреннему каналу рекуператора, поскольку ранее нами была показана нецелесообразность варианта работы рекуператора с первичной подачей воздуха по внешнему каналу.

При формулировке математической модели использовались следующие допущения:

скорость  $U_g$  и температура  $T_g$  газового потока одинаковы по горизонтальному сечению и зависят только от вертикальной координаты  $z$ ;

<sup>1</sup> Способ получения полых стеклянных микросфер: пат. 2059574 Российская Федерация: МПК C03B19/10 / В. В. Бурдов, А. В. Косяков, В. Г. Калыгин, Ф. М. Филиппков, А. Д. Ишков; дата публ.: 10.05.1996.

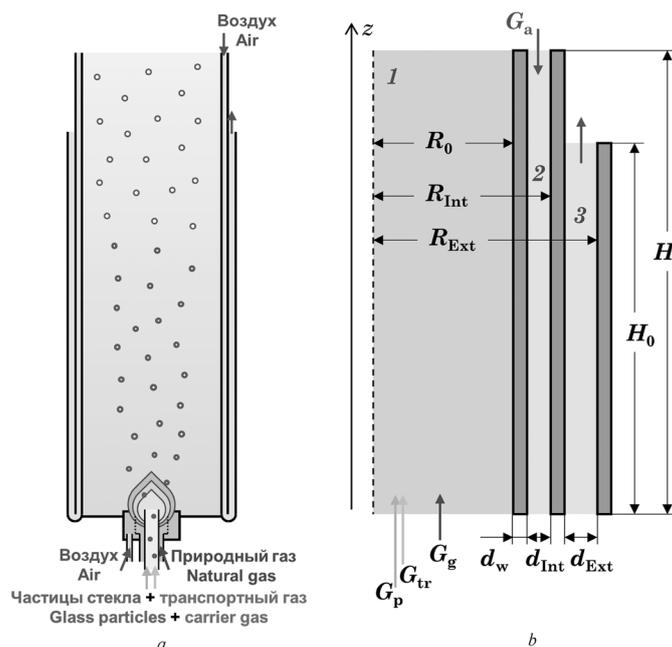


Рис. 1. Схема работы газопламенного реактора рекуперативного типа для получения полых стеклянных микросфер (а) и схема расчетной области рассматриваемой системы (b): 1 – рабочее пространство реактора, 2 – внутренний и 3 – внешний каналы рекуператора

Fig. 1. Scheme of operation of gas-flame reactor of recuperative type for producing hollow glass microspheres (a) and scheme of the calculated region of considered system (b): 1 – working space of the reactor, 2 – internal and 3 – external recuperator channel

подача частиц и транспортного газа происходит с равными расходами ( $G_p = G_{tr}$ );  
 при движении частицы распределяются равномерно по сечению реактора;  
 не рассматривается изменение размеров сферических частиц, а процесс формирования и образования полых микросфер оценивается временем пребывания частиц в требуемом температурном режиме;  
 нагреваемая частица рассматривается не изотермической (рассчитывается температурное поле внутри нее), причем внешний тепловой поток, падающий на нее, полагается сферически симметричным;  
 тепловое взаимодействие между частицами осуществляется через газовую среду.  
 С учетом поставленной задачи и сделанных допущений математическая модель нагрева и движения частиц стекла в газовом потоке описывается следующими уравнениями.  
 Уравнение для температуры газовой смеси

$$\tilde{c}_{pg} (G_g + G_{tr}) \frac{dT_g}{dz} = -2\pi R_0 \sigma_0 \epsilon_{g,w} (T_g^4 - T_{w1}^4) - 2\pi R_0 \alpha_g (T_g - T_{w1}) - (N_p \pi d_p^2) \pi R_0^2 \alpha_p (T_g - T_p), \tag{1}$$

где  $\tilde{c}_{pg}$  – удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении;  $\sigma_0$  – постоянная Стефана–Больцмана;  $\epsilon_{g,w}$  – приведенная степень черноты в системе газ/стенка реактора;  $T_{w1}$  – температура на внутренней поверхности стенки реактора;  $N_p$  – концентрация частиц стекла;  $d_p$  – диаметр частиц стекла;  $\alpha_p$  – коэффициент конвективного теплообмена частиц стекла с газовым потоком и  $T_p$  – температура частиц стекла.

Начальная температура газа в сечении подачи частиц в реактор определяется из условия мгновенного перемешивания дымовых газов и транспортного газа на основе теплового баланса

$$T_g \Big|_{z=0} = \frac{C_{ptr} T_{tr,0} G_{tr} + C_{pg} T_{g,0} G_g}{\tilde{c}_{pg} (G_g + G_{tr})}, \tag{2}$$

где  $C_{pg}$  и  $C_{ptr}$  – удельная теплоемкость дымовых газов и транспортного газа;  $T_{g,0}$  и  $T_{tr,0}$  – начальная температура дымовых газов и транспортного газа.

Уравнения для температуры внутренней и наружной поверхностей (цилиндрической) стенки реактора

$$R_0 \sigma_0 \varepsilon_{g,w} (T_g^4 - T_{w1}^4) + R_0 \alpha_g (T_g - T_{w1}) + R_0 \sigma_0 \varepsilon_{p,w} (T_p^4 - T_{w1}^4) = \frac{\lambda_w}{\ln \left( 1 + \frac{d_w}{R_0} \right)} (T_{w1} - T_{w2}), \quad (3)$$

$$\frac{\lambda_w}{\ln \left( 1 + \frac{d_w}{R_0} \right)} (T_{w1} - T_{w2}) = (R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}), \quad (4)$$

где  $\alpha_g$  – коэффициент конвективного теплообмена стенок внутри реактора с газами;  $\varepsilon_{p,w}$  – приведенная степень черноты в системе облако частиц/стенка реактора;  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности стенки реактора;  $d_w$  – толщина стенки реактора;  $T_{w2}$  – температура на внешней поверхности стенки реактора;  $\alpha_{a,int}$  – коэффициент конвективного теплообмена воздуха со стенками внутреннего канала рекуператора;  $T_{a,int}$  – температура воздуха во внутреннем канале рекуператора.

Уравнение для температуры воздуха в обоих каналах рекуператора

$$\begin{aligned} -G_a C_{pa} \frac{dT_{a,int}}{dz} &= 2\pi(R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}) - 2\pi(R\alpha)_{int,ext} (T_{a,int} - T_{a,ext}), \quad 0 \leq z \leq H_0, \\ -G_a C_{pa} \frac{dT_{a,int}}{dz} &= 2\pi(R_0 + d_w) \alpha_{a,int} (T_{w2} - T_{a,int}), \quad H_0 \leq z \leq H, \\ G_a C_{pa} \frac{dT_{a,ext}}{dz} &= 2\pi(R\alpha)_{int,ext} (T_{a,int} - T_{a,ext}) - 2\pi(R\alpha)_{ext,env} (T_{a,ext} - T_{env}), \end{aligned} \quad (5)$$

где  $C_{pa}$  – удельная теплоемкость воздуха;  $T_{a,ext}$  – температура воздуха во внешнем канале рекуператора. Параметры  $(R\alpha)_{int,ext}$  и  $(R\alpha)_{ext,env}$ , характеризующие теплоотдачу стенок внешнего канала рекуператора, описываются выражениям

$$\begin{aligned} (R\alpha)_{int,ext} &= \left( \frac{1}{\alpha_{a,int} R_{int}} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \left( 1 + \frac{d_w}{R_{int}} \right) + \frac{1}{\alpha_{a,ext} (R_{int} + d_w)} \right)^{-1}, \\ (R\alpha)_{ext,env} &= \left( \frac{1}{\alpha_{a,ext} R_{ext}} + \frac{1}{\lambda_w} \ln \left( 1 + \frac{d_w}{R_{ext}} \right) + \frac{1}{\alpha_{env} (R_{ext} + d_w)} \right)^{-1}, \end{aligned}$$

где  $\alpha_{a,ext}$  и  $\alpha_{env}$  – коэффициент конвективного теплообмена воздуха со стенками внешнего канала рекуператора и стенки установки с окружающей средой.

Граничные условия для температуры воздуха следующие:

$$\begin{aligned} T_{a,int} \Big|_{z=H} &= T_{a,0}, \\ T_{a,ext} \Big|_{z=0} &= T_{a,int} \Big|_{z=0}. \end{aligned} \quad (6)$$

Нагрев частицы описывается одномерным нестационарным уравнением теплопроводности в сферических координатах с соответствующими граничными и начальными условиями

$$\rho_p c_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( \lambda_p r^2 \frac{\partial T_p}{\partial r} \right), \quad (7)$$

$$-\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0 \quad \text{и} \quad -\lambda_p \frac{\partial T_p}{\partial r} \Big|_{r=d_p/2} = (\alpha_p (T_g - T_p) + \sigma_0 \varepsilon_{w,1p} (T_{w1}^4 - T_p^4)), \quad (8)$$

$$T_p|_{t=0} = T_{p,0}, \quad (9)$$

где  $\rho_p$ ,  $c_p$  и  $\lambda_p$  – плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности частиц стекла;  $t$  – время;  $r$  – расстояние от центра сферической частицы (координата);  $\varepsilon_{w,lp}$  – приведенная степень черноты в системе частица/стенка реактора.

Скорость частиц в реакторе определяется из уравнения движения следующего вида:

$$\frac{dU_p}{dz} = -\frac{g}{U_p} - \frac{3}{4} \frac{C_d(Re_p)}{d_p} \frac{\rho_g}{\rho_p} \frac{(U_p - U_g)}{U_p} |U_p - U_g|, \quad (10)$$

где  $U_p$  – средняя скорость частиц;  $g$  – ускорение свободного падения;  $\rho_g$  – плотность газовой смеси;  $C_d$  – коэффициент сопротивления, определяемый соотношением  $C_d = \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{Re_p^{2/3}}{6} \right)$ ;  $Re_p$  – критерий Рейнольдса для частицы. Полагается, что частицы стекла подаются в реактор со скоростью  $U_{p,0}$

$$U_p|_{z=0} = U_{p,0}. \quad (11)$$

Из-за небольшой доли частиц в газовом потоке (для базового варианта объемная и массовая доля частиц соответственно равны  $3,0 \cdot 10^{-6}$  и  $3,6 \cdot 10^{-2}$ ), влиянием частиц на течение газа в реакторе можно пренебречь. Поэтому при такой постановке задачи нет необходимости в решении соответствующего уравнения движения для газа, а скорость газовой смеси рассчитывается на основе выражения

$$U_g = \frac{(G_g + G_{tr})}{\rho_g \pi R_0^2}. \quad (12)$$

Таким образом, математическая модель нагрева и движения частиц стекла в высокотемпературном газовом потоке включает в себя систему уравнений с граничными и начальными условиями (1)–(12). Коэффициент теплообмена и приведенная степень черноты, входящие в уравнения, определялись по соответствующим стандартным корреляциям [9–12].

Сопряженная задача нагрева и движения частиц в газовом потоке решалась совместно с температурной задачей для воздуха в рекуператоре итерационным методом, причем распределение температуры в частице на каждом шаге рассчитывалось методом прогонки.

**Результаты и их обсуждение.** Согласно поставленной задаче и сформулированной модели было проведено моделирование нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке. В расчетах в качестве базового варианта выбраны следующие значения параметров:  $R_0 = 0,15$  м,  $H = 1$  м,  $H_0 = 0,83$  м,  $d_w = 3$  мм,  $d_{int} = 7$  мм,  $d_{ext} = 19$  мм,  $G_g = 32$  г/с (соответствует мощности горелки 100 кВт),  $G_p = G_{tr} = 1$  г/с,  $G_a = 32$  г/с,  $T_{g,0} = 1600$  °С,  $T_{tr,0} = T_{p,0} = T_{a,0} = T_{env} = 20$  °С,  $U_{p,0} = 2$  м/с и  $d_p = 50$  мкм.

На рис. 2 приведены результаты моделирования, полученные при установленных (базовых) параметрах. Из рис. 2, а следует, что частицы, подаваемые в реактор, нагреваются до температуры, близкой к температуре газовой смеси на достаточно коротком начальном участке реактора  $\sim 0,05$  м, затем, при дальнейшем движении, температура газового потока с частицами постепенно снижается за счет теплообмена со стенками реактора-рекуператора. Аналогичным образом ведут себя скорости газового потока и частиц в зависимости от высоты реактора, что показано на рис. 2, б.

Согласно результатам дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) стекла, используемого для получения микросфер, в диапазоне температур 1348–1400 °С происходит выделение газообразного оксида серы  $SO_3$ . Именно выделение этого газа формирует полости внутри микросфер. Отсюда следует, что для формирования микросферы необходим ее нагрев до температуры не менее 1400 °С. По этой причине цель исследования заключалась в оптимизации параметров системы, при которых время пребывания частиц стекла в реакторе при условиях, когда ее температура выше 1400 °С  $\Delta t_{1400}$  была бы достаточной для образования полых микросфер.

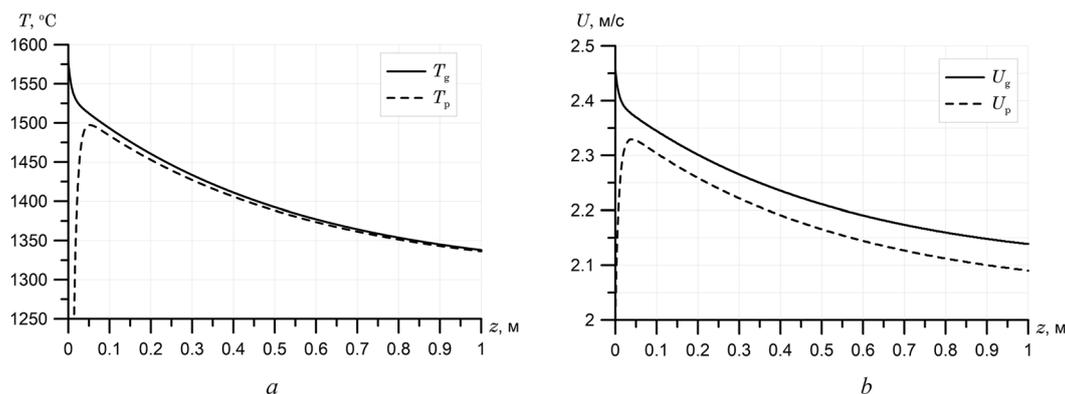


Рис. 2. Зависимости температуры газа и частиц (а) и их скорости (b) от высоты реактора  
 Fig. 2. Dependences of the temperature of the gas and particles (a) and its velocity (b) on reactor height

Если предположить, что химические реакции диссоциации стекла происходят очень быстро, и процесс роста микросферы из частицы лимитируется диффузией растворенных газов в стекле, то в качестве минимального времени нахождения частицы в высокотемпературной зоне реактора можно использовать характерное время диффузии выделяющегося газа.

Для оценки характерного времени диффузии используется соотношение Эйнштейна  $\langle x^2 \rangle = 2D\Delta t_D$  [13], где характерное расстояние диффузии  $x$  принимается равным радиусу частицы. Коэффициент диффузии для  $\text{SO}_3$  в стекле оценивается соотношением  $D_{\text{SO}_3} \approx D_{\text{He}} \sqrt{\frac{M_{\text{He}}}{M_{\text{SO}_3}}}$  на основе величины коэффициента диффузии для гелия в боросиликатном стекле [14] и с учетом того, что коэффициент диффузии газов обратно пропорционален квадратному корню из молярной массы газа. Используя закон Аррениуса, описывающий связь коэффициента диффузии и температуры, зависимость характерного времени диффузии от температуры можно выразить

$$\Delta t_D \approx \frac{d_p^2}{8D_{0,\text{SO}_3} \exp\left(-\frac{E}{R_g T}\right)}, \text{ где}$$

$D_0$  – предэкспоненциальный множитель;  $E$  – энергия активации;  $R_g$  – универсальная газовая постоянная. При увеличении температуры происходит снижение характерного времени, но следует отметить, что температура, до которой можно нагреть частицу горячим потоком дымовых газов, теоретически ограничена адиабатической температурой горения (для природного газа 1960 °C). По этой причине нагреть частицы даже до температуры выше 1500 °C практически очень сложно. Для базового размера частиц 50 мкм при температуре порядка 1400 °C, когда начинается активное выделение  $\text{SO}_3$  в стекле, характерное время диффузии составляет около 150 мс. Поэтому в данной работе для базового размера частиц минимальное время, необходимое для образования полых микросфер, предполагается равным 150 мс.

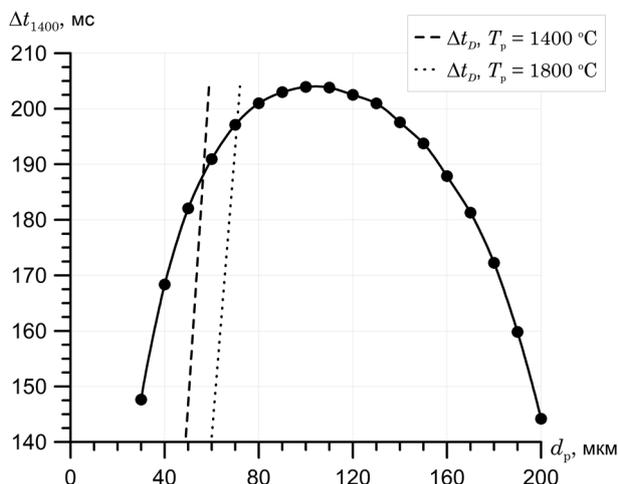


Рис. 3. Зависимость времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °C от диаметра частиц  $d_p$  при прочих базовых параметрах. Пунктирные линии – зависимости соответствующего времени диффузии от размера частиц при температуре 1400 и 1800 °C

Fig. 3. Dependence of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C on the particle diameter  $d_p$  with other basic parameters. Dashed lines are the dependences of the corresponding diffusion time scale on the particle size at a temperature of 1400 and 1800 °C

На рис. 3 приведена зависимость времени нагрева частиц (параметра  $\Delta t_{1400}$ ) от их диаметра

тра. Наличие максимума на графике указывает на диапазон оптимальных размеров частиц 80–120 мкм. Однако исходя из зависимостей характерного времени диффузии  $\text{SO}_3$  при температурах 1400 и 1800 °С, изображенных на рис. 3 штриховой и пунктирной линиями, следует, что в частицах с большими размерами (>50 мкм) для формирования полых микросфер может быть недостаточно времени. Поэтому для рассмотренных условий оптимальным размером частиц является  $d_p \leq 50$  мкм.

На рис. 4, *a* приведены зависимости времени нагрева частиц стекла при температуре выше 1400 °С от радиуса реактора при разных расходах дымовых газов. С увеличением расхода дымовых газов происходит рост времени нахождения частиц при температуре вышеустановленной  $\Delta t_{1400}$ . Также из приведенных зависимостей видно наличие максимума времени нагрева в рассматриваемом диапазоне радиусов реактора, причем не зависимо от расхода дымовых газов максимум соответствует приблизительно одному радиусу ( $R_0 \approx 0,1$  м). Следует отметить, что при высоких расходах дымовых газов (в данном случае 32 г/с) и малых радиусах реактора (до 0,1 м) частицы достаточно быстро проходят зону реактора, в которой осуществляется формирование и образование полых микросфер. Однако несмотря на то что в этих случаях на выходе из реактора частицы имеют температуру выше 1400 °С, времени может быть недостаточно для окончательного образования микросфер при ограниченной (фиксированной) высоте данной зоны.

На рис. 4, *b* показаны зависимости температуры воздуха на выходе из рекуператора от радиуса реактора при разных расходах дымовых газов. Из рисунка следует, что при увеличении расхода дымовых газов температура воздуха на выходе из рекуператора растет, а при увеличении радиуса реактора данный параметр снижается. При установленных базовых значениях радиуса реактора и расхода дымовых газов температура воздуха на выходе из рекуператора равна 340 °С.

Изменение времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной скорости частиц показано на рис. 5, *a*. Из рисунка следует, что с увеличением начальной скорости частиц происходит снижение рассматриваемого интервала времени, причем при сравнительно высоких скоростях (>1 м/с) это изменение происходит медленнее. Весь рассматриваемый диапазон начальных скоростей, в том числе и выбранная в качестве базовой начальная скорость частиц  $U_{p,0} = 2$  м/с, соответствуют установленному минимальному времени нахождения частиц при температуре выше 1400 °С ( $\geq 150$  мс).

Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной температуры дымовых газов представлены на рис. 5, *b*. Из рисунка следует, что при увеличении температуры дымовых газов происходит рост рассматриваемой характеристики.

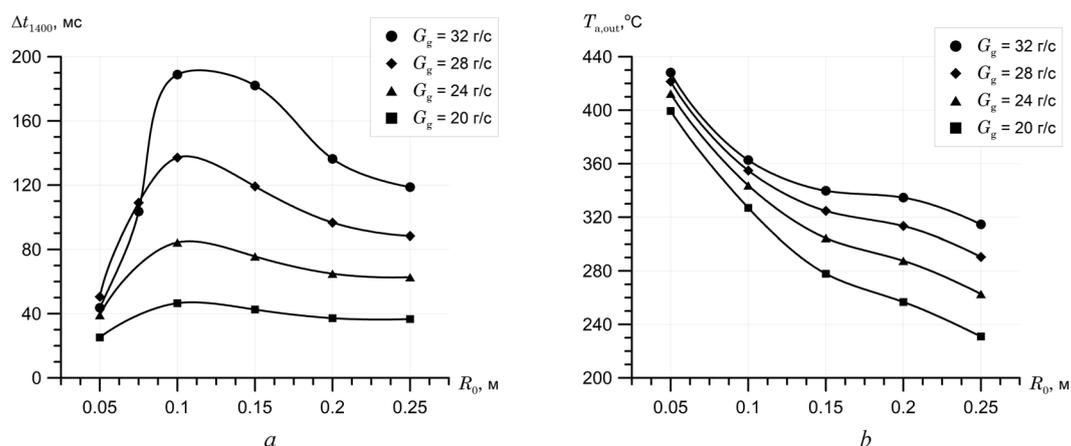


Рис. 4. Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С (*a*) и температуры воздуха на выходе из рекуператора (*b*) от радиуса реактора  $R_0$  для разных расходов дымовых газов при прочих равных базовых параметрах

Fig. 4. Dependences of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °С (*a*) and air temperature at the outlet from the recuperator (*b*) on the reactor radius  $R_0$  for different mass flow of smoke fumes with other equal basic parameters

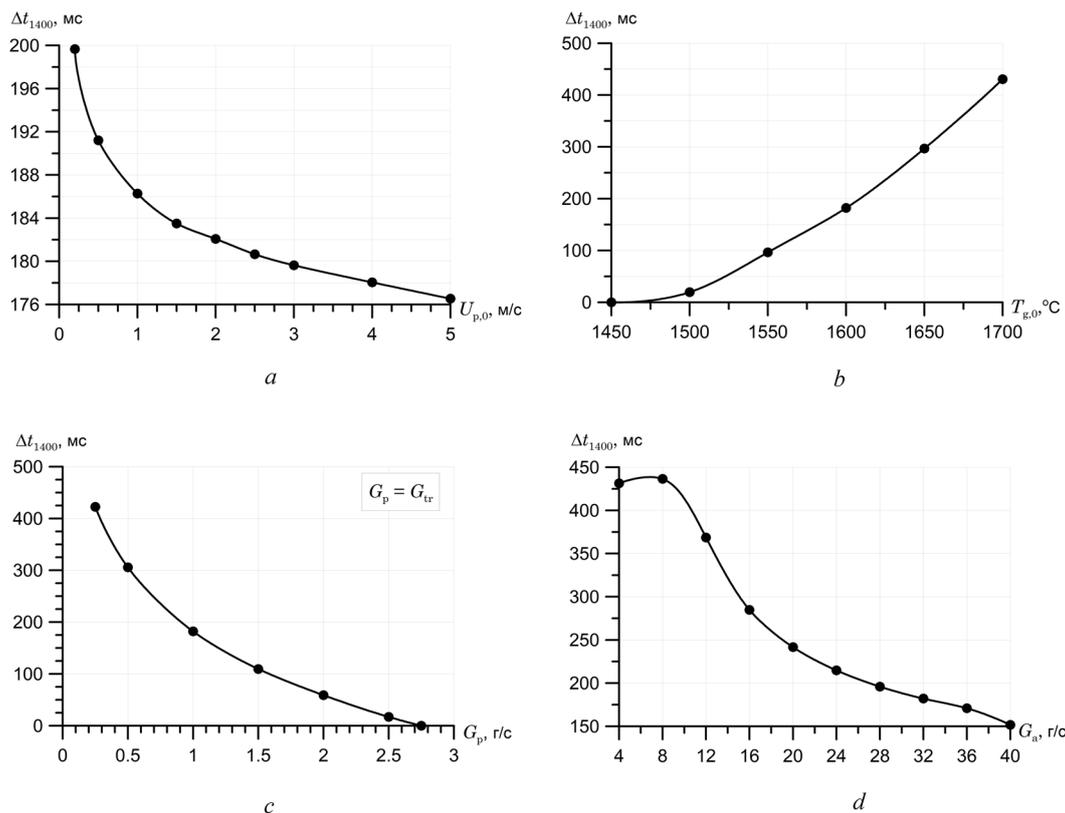


Рис. 5. Зависимости времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от начальной скорости частиц  $U_{p,0}$  (a), начальной температуры газов  $T_{g,0}$  (b), расхода частиц  $G_p$  (c) и расхода воздуха в рекуператоре  $G_a$  (d) при прочих базовых параметрах

Fig. 5. Dependences of the particle location time in the reactor at a temperature above 1400 °C on the initial particle velocity  $U_{p,0}$  (a), the initial gas temperature  $T_{g,0}$  (b), the particle flow rate  $G_p$  (c) and the air flow rate in the recuperator  $G_a$  (d) with other basic parameters

Однако следует отметить, что начальная температура дымовых газов (на входе в реактор) ограничена соответствующей адиабатической температурой горения.

На рис. 5, c приведена зависимость времени нахождения частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от расхода частиц. Из рисунка следует, что с ростом расхода частиц время их пребывания при температуре выше 1400 °С падает и при расходах  $>2,7$  г/с частицы не нагреваются до установленной температуры. В данной работе в качестве базового значения расхода частиц используется 1 г/с (3,6 кг/ч), выбор которого связан с задачей получить необходимую продолжительность пребывания частиц в установленном интервале температур, не снижая при этом производительность установки.

Поскольку конструкция рассматриваемой установки по получению полых микросфер включает в себя рекуператор, интерес представляет исследование влияния расхода воздуха в рекуператоре на работу системы. На рис. 5, d приведена зависимость времени пребывания частиц в реакторе при температуре выше 1400 °С от расхода воздуха. Из представленных данных следует, что при малых расходах воздуха в рекуператоре тепловые потери на стенки реактора невелики, и частицы достаточно долго находятся в необходимом температурном диапазоне. Как упоминалось выше, управление расходом воздуха в рекуператоре дает эффективный дополнительный механизм управления технологическим процессом. Следует отметить, что в модели величина расхода воздуха и величина расхода дымовых газов не согласованы по принципу, что весь нагретый в рекуператоре воздух подается к горелке. В качестве базового расхода воздуха используется 32 г/с, что соответствует базовому расходу дымовых газов и предполагает возможность сброса определенного количества воздуха перед подачей его к горелке.

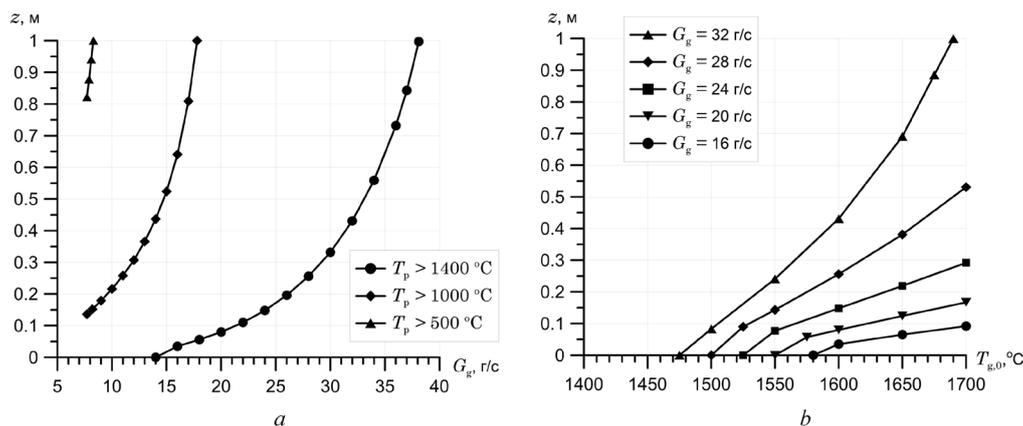


Рис. 6. Зависимости координаты точки внутри реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400, 1000 и 500 °С, от расхода дымовых газов  $G_g$  (а) и координаты точки внутри реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400 °С, от начальной температуры дымовых газов  $T_{g,0}$  (б) при прочих базовых параметрах

Fig. 6. Dependences of the reactor height, at which the particle temperature becomes below 1400, 1000 and 500 °С, on the smoke fumes flow  $G_g$  (a) and the reactor height, at which the particle temperature becomes below 1400 °С, on the initial temperature of the smoke fumes  $T_{g,0}$  (b) at other basic parameters

При проектировании установки по получению полых микросфер важным также является знание того, как по высоте реактора распределена температура частиц, в частности, на какой высоте прекращаются процессы формирования микросфер. На рис. 6, а приведены зависимости высоты реактора, на которой температура частиц снижается до величины 1400, 1000 и 500 °С соответственно, от расхода дымовых газов. С ростом расхода происходит увеличение размеров зоны реактора, в которой частицы находятся в соответствующем температурном диапазоне. Как уже было показано выше, при высоких расходах дымовых газов (в данном случае  $>38$  г/с) частицы выходят из реактора высотой 1 м при температуре выше 1400 °С, а при малых расходах ( $<14$  г/с) – не нагреваются до температуры в 1400 °С. При установленном базовом варианте параметров рассматриваемой системы частицы в реакторе нагреты до температуры выше 1400 °С вплоть до высоты около 42 см.

На рис. 6, б представлены зависимости координаты точки в рабочем пространстве реактора, в которой температура частиц становится ниже 1400 °С, от начальной температуры дымовых газов при различных расходах. Из рисунка следует, что с увеличением температуры газа на входе в реактор высота, на которой температура частиц соответствует установленным температурным диапазонам, возрастает, причем, чем выше расход дымовых газов, тем выше данная высота.

**Закключение.** В работе предложена модель, описывающая процесс получения стеклянных микросфер в газопламенном реакторе рекуперативного типа. На основе описанной математической модели нагрева и движения частиц в высокотемпературном газовом потоке, учитывающей сопряженный теплообмен между рабочей средой реактора и рекуператором, проведено моделирование и оптимизация соответствующих процессов по геометрическим и режимным параметрам. В качестве оптимизируемой характеристики использовалось время пребывания частиц стекла в реакторе при температуре выше 1400 °С.

В результате оптимизационных расчетов найдена область параметров реактора (диаметр и высота, расход природного газа, расход продуваемого через рекуператор воздуха), а также режимных параметров (диаметр и расход частиц стекла), в которых возможно формирование микросфер. Полученная информация может служить основой для проектирования эффективного газопламенного реактора для получения микросфер, а разработанная модель – для прогнозирования параметров реакторов других типоразмеров.

**Благодарности.** Авторы выражают благодарность заведующему отделом электродуговой плазмы Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси В. В. Савчину за предоставленные данные по свойствам стекла, используемого при получении микросфер.

**Acknowledgements.** The authors are grateful to the Head of Electric Arc Plasma Section of A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the NAS of Belarus V. V. Savchin for the provided data on the properties of the glass used in the preparation of microspheres.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Будов, В. В. Полые стеклянные микросферы. Применение, свойства, технология / В. В. Будов // *Стекло и керамика*. – 1994. – № 7/8. – С. 7–11.
2. Пахарев, А. В. Свойства тампонажного камня, сформированного в условиях скважины Томской области / А. В. Пахарев, К. В. Беляев // *Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море*. – 2012. – № 6. – С. 42–44.
3. Иноземцев, А. С. Полые микросферы – эффективный наполнитель для высокопрочных легких бетонов / А. С. Иноземцев, Е. В. Королев // *Промышленное и гражданское строительство*. – 2013. – № 10. – С. 80–83.
4. Структурообразование в полимерных композиционных материалах с полыми стеклянными микросферами / И. Д. Симонов-Емельянов [и др.] // *Пластические массы*. – 2012. – № 11. – С. 6–10.
5. Казимиренко, Ю. А. Формирование конструкций плавучих композитных сооружений для перевозки и хранения радиоактивных грузов / Ю. А. Казимиренко // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – Т. 6, № 5 (20). – С. 7–9.
6. Аппаратурное оформление химической металлизации полых стеклянных микросфер / А. Н. Симбиркина [и др.] // *Вопр. проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. науч. тр.* – Харьков: ХАИ, 2016. – Вып. 1. – С. 109–122.
7. Многослойные конструкции со сферопластиками для изделий авиационной техники / И. И. Соколов [и др.] // *Конструкции из композиционных материалов*. – 2014. – № 1 (133). – С. 37–42.
8. German, M. L. Mathematical model for calculating the heat-protection properties of the composite coating “ceramic microspheres–binder” / M. L. German, P. S. Grinchuk // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. – 2002. – Vol. 75, N 6. – P. 1301–1313. <https://doi.org/10.1023/a:1022150523156>
9. Михатулин, Д. С. Конспект лекций по тепломассообмену / Д. С. Михатулин, А. Ю. Чирков. – Москва: Янус-К, 2008. – 2 ч.
10. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – 2-е изд. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.
11. Практикум по теплопередаче / А. П. Солодов [и др.]; под ред. А. П. Солодова. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
12. Исаченко, В. П. Теплопередача / В. П. Исаченко, В. А. Осипов, А. С. Сукомел. – М.: Энергия, 1981. – 416 с.
13. Einstein, A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme für die Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen / A. Einstein // *Annalen der Physik*. – 1905. – Vol. 322, N 8. – P. 549–560. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>
14. Kawasaki, K. Permeation of Helium Gas through Glass / K. Kawasaki, K. Senzaki // *Japanese Journal of Applied Physics*. – 1962. – Vol. 1, N 4. – P. 223–226. <https://doi.org/10.1143/jjap.1.223>

### References

1. Budov V. V. Hollow glass microspheres. Use, properties, and technology. *Glass and ceramics*, 1994, vol. 51, no. 7–8, pp. 230–235. <https://doi.org/10.1007/bf00680655>
2. Pakharev A. V., Belyaev K. V. Properties of a grouting stone formed in the conditions of a well in the Tomsk Region. *Stroitelstvo neftyanykh i gazovykh skvazhin na sushe i na more* [Construction of oil and gas wells on land and at sea], 2012, no. 6, pp. 42–44 (in Russian).
3. Inozemtsev A. S., Korolev E. V. Hollow microspheres are an effective aggregate for high-strength lightweight concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*, 2013, no. 10, pp. 80–83 (in Russian).
4. Simonov-Emelyanov I. D., Trofimov A. N., Apeksimov N. V., Zubkov S. B. Structure formation in polymeric composite materials with hollow glass microspheres. *Plasticheskiye massy* [Plastic mixtures], 2012, no. 11, pp. 6–10 (in Russian).
5. Kazimirenko Yu. A. Formation of constructions of floating composite structures for transportation and storage of radioactive cargos. *Tekhnologicheskij audit i rezervy proizvodstva = Technology audit and production reserves*, 2014, vol. 6, no. 5(20), pp. 7–9 (in Russian).
6. Simbirkina A. N., Nefedov V. G., Chervakov O. V., Globa N. I. Hardware design of chemical metallization of hollow glass microspheres. *Voprosy proyektirovaniya i proizvodstva konstruksyy letatelnykh apparatov: sbornik nauchnykh trudov* [Questions of design and manufacturing of aircraft structures: collection of scientific papers]. Khar'kov, Kharkov Aviation Institute, 2016, iss. 1, pp. 109–122 (in Russian).
7. Sokolov I. I., Kogan D. I., Raskutin A. E., Babin A. N., Filatov A. A., Morozov B. B. Sandwich constructions with syntactic core for the aerospace parts. *Konstrukcii iz kompozitsionnykh materialov* [Composite materials constructions], 2014, no. 1(133), pp. 37–42 (in Russian).
8. German M. L., Grinchuk P. S. Mathematical model for calculating the heat-protection properties of the composite coating «ceramic microspheres–binder». *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2002, vol. 75, no. 6, pp. 1301–1313. <https://doi.org/10.1023/a:1022150523156>
9. Mikhatulina, D. S., Chirkov A. Yu. *Lecture notes on heat and mass transfer. 2 Parts*. Moscow, Yanus-K Publ., 2009 (in Russian).
10. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. *Basic foundation of heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1977. 344 p. (in Russian).
11. Solodov A. P., Tsvetkov F. F., Eliseev A. V., Osipova V. A. *Practical work on heat transfer*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1986. 296 p. (in Russian).
12. Isachenko V. P., Osipov V. A., Sukomel A. S. *Heat transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1981. 416 p. (in Russian).

13. Einstein A. Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen. *Annalen der Physik*, 1905, vol. 322, no. 8, pp. 549–560 (in German). <https://doi.org/10.1002/andp.19053220806>

14. Kawasaki K., Senzaki K. Permeation of Helium Gas through Glass. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1962, vol. 1, no. 4, pp. 223–226. <https://doi.org/10.1143/jjap.1.223>

### Информация об авторах

*Лях Мария Юрьевна* – канд. физ.-мат. наук, науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [liakhmaria@gmail.com](mailto:liakhmaria@gmail.com).

*Акулич Андрей Владимирович* – науч. сотрудник. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [akulich.av@mail.ru](mailto:akulich.av@mail.ru).

*Гринчук Павел Семенович* – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, заведующий отделом. Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [gps@hmti.ac.by](mailto:gps@hmti.ac.by).

### Information about the authors

*Liakh Maria Yuryevna* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [liakhmaria@gmail.com](mailto:liakhmaria@gmail.com).

*Akulich Andrei Vladimirovich* – Researcher. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [akulich.av@mail.ru](mailto:akulich.av@mail.ru).

*Grinchuk Pavel Semenovich* – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Department. A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [gps@hmti.ac.by](mailto:gps@hmti.ac.by).