

© Д.Е. ИГОШИН

Институт теоретической и прикладной механики  
им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал)  
igoshinde@gmail.com

УДК 536.37

## МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛЕНТОЧНОЙ СУШИЛКИ

### SIMULATION OF BELT DRYER WORK

**АННОТАЦИЯ.** Ленточные сушилки широко распространены в различных производствах. Сушка каучука, как и функционирование большинства химических реакторов, представляет собой совокупность взаимосвязанных теплофизических и гидродинамических процессов. Предложена математическая модель процесса сушки пористого ленточного каучука, которая получена на основе законов сохранения масс и энергии в дифференциальной и интегральной формах с учетом кинетики испарения воды. Рассмотрен установившийся режим функционирования сушильной камеры. При известных параметрах секционной сушилки, ее геометрических размерах, мощности калориферов, задавая граничные условия на ее входе и на выходе (температуры и массовые расходы фаз; размеры ленты каучука и его пористость, содержание влаги) и решая краевую задачу, можно определить термо- и гидродинамическую обстановку в сушильной камере (распределение температур, влагосодержаний).

**SUMMARY.** Belt dryers are widely used in different industries. Rubber drying, the same as the functioning of most chemical reactors, is a set of interrelated thermal and hydrodynamic processes. A mathematical model of the drying process of porous rubber belt is presented. It is obtained on the base of the laws of conservation of mass and energy in the differential and integral forms taking into account the kinetics of water evaporation. It is considered a steady state operation of the drying chamber. It is possible to determine the thermal and hydrodynamic atmosphere in the drying chamber (temperature distribution, moisture content) in case we know the parameters of the sectional dryer, its geometrical dimensions, power heaters, if the boundary conditions at its inlet and outlet (temperature and mass flow rates of the phases; tape rubber dimensions and its porosity, moisture content) are set and if the boundary value problem is solved.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА.** Тепломассообмен, сушка, ленточная сушилка.

**KEY WORDS.** Heat and mass transfer, dryer, belt dryer.

**Введение.** В тех случаях, когда требуется щадящее обезвоживание материала, обычно используются секционные сушилки. Как правило, сушилки представляют собой вертикальные камеры, разделенные на зоны горизонтальными перегородками из теплозащитного материала. Сырье подается в сушилку сверху в виде ленты и перемещается по системе транспортеров вниз в потоке горячего воздуха, который циркулирует внутри каждой секции [1-3].

Скорость и температура газовых потоков определяют интенсивность тепло-массообмена между составляющими системы, т.е. скорость сушки, поэтому математическое описание рассматриваемых процессов требует совместного учета отмеченных явлений в рамках уравнений механики гетерогенных систем [4].

**Основные допущения.** Давление в камере постоянно и равно атмосферному, температура газа и концентрации его компонент постоянны в пределах каждой камеры (зоны). Парогазовая смесь состоит из двух компонент, а именно — водяного пара и сухого воздуха, не участвующего в фазовых переходах. Средняя по толщине температура однородна по ширине ленты. Лента толщиной  $h$  и шириной  $b$  движется с постоянной скоростью  $v_r$ ; плотность  $\rho_r$  (rubber — каучук) и пористость  $m$  каучука постоянны в процессе сушки. Под объемным влагосодержанием  $S_w$  (water — вода) будем понимать долю объема пор, занятого водой. Здесь и в дальнейшем нижние индексы  $r, w$  соответствуют каучуку и воде. При установившемся процессе локальное состояние ленты зависит только от положения в сушилке. В качестве такого параметра (координаты) примем расстояние  $l$  вдоль ленты, отсчитываемое от входа.

**Уравнения масс.** Под массовым расходом каучука  $M_r$  и воды  $M_w$  будем понимать массу вещества, проходящего в единицу времени через поперечное сечение ленты

$$M_r = (1 - m)bh\rho_r v_r, \quad M_w = mbh\rho_w v_r S_w, \quad (3.1)$$

причем  $v_r = v_w$ . В рамках принятых допущений уравнения сохранения масс для каучука и воды можно записать в виде:

$$\frac{dM_r}{dl} = 0, \quad \frac{dM_w}{dl} = -J, \quad (3.2)$$

где  $J$  — интенсивность испарения воды, отнесенная к единице длины ленты.

Для того чтобы описать массовые расходы вещества, поступающего в отдельную зону и выходящего из нее, будем пользоваться индексами  $i$  и  $i+1$  для верхней и нижней границ  $i$ -й зоны соответственно. Нумерация зон начинается сверху.

В  $i$ -ю зону снизу поступают водяной пар и воздух, массовый расход которого постоянен во всех зонах, так как он не испытывает фазовых переходов. Массовые расходы компонент газовой фазы  $i$ -й зоны связаны с общим массовым расходом газа  $M_{gi}$  соотношениями:

$$M_a = k_{ai} M_{gi}, \quad M_a = const, \quad M_{vi} = k_{vi} M_{gi} \quad (3.3)$$

$$M_{gi} = M_a + M_{vi}, \quad k_{ai} + k_{vi} = 1,$$

где  $k_{ai}, k_{vi}$  — массовые концентрации,  $M_{ai}, M_{vi}$  — массовые расходы воздуха и пара соответственно, индекс  $a$  относится к воздуху (air — воздух), индекс  $v$  относится к водяному пару (vapor — пар).

Если считать, что сушильная камера герметична, т.е. нет притока холодного атмосферного воздуха в отдельную зону, то массовые расходы воды и водяного пара связаны на границах зон следующим соотношением:

$$M_{vi} - M_{v\ i+1} = M_{wi} - M_{w\ i+1}, \quad (3.4)$$

где  $M_{wi}$  — массовый расход воды на входе в  $i$ -ю зону,  $M_{wi+1}$  — массовый расход воды на выходе из  $i+1$ -й зоны.

**Уравнения энергии.** Уравнение теплового баланса для влажной ленты запишем в виде:

$$(M_r c_r + M_w c_w) \frac{dT_r}{dl} = q_{gr} - JL \quad (4.1)$$

где  $T_r$  — средняя по толщине температура ленты,  $c_r, c_w$  — удельные теплоемкости каучука и воды,  $q_{gr}$  — интенсивность теплопереноса от газовой фазы к каучуку, отнесенная на единицу длины ленты,  $L$  — удельная теплота парообразования. Изменение температуры ленты происходит за счет теплообмена с газовой фазой (первое слагаемое) и затрат на испарение воды (второе слагаемое).

Для  $i$ -й зоны в целом условие теплового баланса можно записать в виде:

$$\begin{aligned} & (c_r M_r + c_w M_{w\ i+1})(T_{r\ i+1} - T_{r\ i}) + (c_a M_a + c_v M_{v\ i+1})(T_{g\ i} - T_{g\ i+1}) + \\ & + (M_{w\ i} - M_{w\ i+1})[c_w (T_k - T_{r\ i}) + L + c_v (T_{g\ i} - T_k)] = N_i, \end{aligned} \quad (4.2)$$

где  $c_v, c_a$  — удельные теплоемкости пара и воздуха,  $T_k$  — температура, к которой отнесена теплота испарения (индекс  $k$  — кипение)  $L, N_i$  — мощность калориферов  $i$ -й зоны. Здесь первое слагаемое описывает прогрев каучука с водой, выходящих вниз из  $i$ -й зоны, второе — прогрев газа, вошедшего снизу из  $(i+1)$ -й, третье — нагревание той массы воды, которая вошла в  $i$ -ю зону сверху с лентой при температуре  $T_{r\ i}$ , ее испарение, и дальнейшее нагревание пара до температуры  $T_{g\ i}$ , с которой он выходит вверх в общем потоке газа.

На основе уравнения теплового баланса (4.2) и полагая, что при прохождении каучука через сушилку происходит полное испарение воды, получим выражение для минимальной мощности калориферов  $N (N = \sum N_i)$ , необходимой для работы сушилки. Она зависит от температур  $T_{r0}, T_{g0}$  на входе и  $T_{re}, T_{ge}$  на выходе, от ее производительности  $M_r$ , расхода воздуха  $M_a$  и влаги  $M_w$ :

$$N = c_r M_r (T_{re} - T_{r0}) + c_a M_a (T_{g0} - T_{ge}) + M_{w0} [c_w (T_k - T_{r0}) + L + c_v (T_{g0} - T_k)]. \quad (4.3)$$

**Межфазный теплообмен.** Ввиду того, что температура ленты усреднена по толщине, теплообмен между газом и каучуком запишем с учетом теплового сопротивления обеих фаз [5-7]:

$$q_{gr} = \beta_{gr}^{(T)} (T_g - T_r), \quad \text{где} \quad \frac{1}{\beta_{gr}^{(T)}} = \frac{1}{\beta_{g\sigma}^{(T)}} + \frac{1}{\beta_{\sigma r}^{(T)}}, \quad (5.1)$$

$$\beta_{g\sigma}^{(T)} = \frac{2b\lambda_g}{h_g^{(T)}}, \quad h_g^{(T)} = \sqrt{\frac{\kappa_g b}{2\nu_g}}, \quad \kappa_g = \frac{\lambda_g}{\rho_g c_g}, \quad \beta_{\sigma r}^{(T)} = \frac{4b}{h} (\lambda_r (1-m) + \lambda_w m S_w),$$

где  $\beta_{gr}^{(T)}, \beta_{g\sigma}^{(T)}, \beta_{\sigma r}^{(T)}$  — коэффициенты теплообмена между газом и каучуком, газом и поверхностью ленты, поверхностью ленты и каучуком соответственно;  $\lambda_g, \lambda_r, \lambda_w$  — теплопроводности газа, каучука и воды соответственно;  $h_g^{(T)}$  — характерный размер пограничного слоя газа, в котором происходит выравнивание температуры газа и поверхности ленты;  $\kappa_g$  — коэффициент температуропровод-

ности газа;  $v_g$  — характерная линейная скорость газа в камере, определяемая воздействием вентиляторов.

Массоперенос между газом и лентой может происходить в двух режимах: диффузионном — когда его интенсивность определяется разностью концентраций пара в порах и в камере; тепловом — когда давление пара в порах равно атмосферному при  $T_r = T_k$ . При этом испарение лимитируется поступающим снаружи теплом. Интенсивность массообмена между газом и лентой за счет диффузии запишем аналогично теплообмену [6], [7], при этом концентрацию пара в порах  $k'_v$  считаем усредненной по толщине:

$$J_{gr} = -J = \beta_{gr}^{(M)} (k_v - k'_v), \quad \text{где} \quad \frac{1}{\beta_{gr}^{(M)}} = \frac{1}{\beta_{g\sigma}^{(M)}} + \frac{1}{\beta_{\sigma r}^{(M)}}, \quad (5.2)$$

$$\beta_{g\sigma}^{(M)} = \frac{2b\rho_g D_g}{h_g^{(M)}}, \quad h_g^{(M)} = \sqrt{\frac{D_g b}{2v_g}}, \quad \beta_{\sigma r}^{(M)} = \frac{4b\rho'_g D'_g m(1-s_w)}{h},$$

где  $\beta_{gr}^{(M)}$ ,  $\beta_{g\sigma}^{(M)}$ ,  $\beta_{\sigma r}^{(M)}$  — коэффициенты массообмена между газом и каучуком, газом и поверхностью ленты, поверхностью ленты и каучуком соответственно,  $D_g$  — коэффициент диффузии газа,  $h_g^{(M)}$  — характерная толщина диффузионного приграничного слоя газа, в котором происходит выравнивание концентрации пара в газе вблизи поверхности ленты, штрихи относятся к параметрам газа в порах.

Здесь отметим, что использование коэффициентов тепломассопереноса  $\beta_{\sigma r}^{(T)}$  и  $\beta_{\sigma r}^{(M)}$  вида (5.1) и (5.2) означает, что теплообмен и массообмен в слое каучука происходит в относительно вялом режиме, так что перепады температуры и концентрации в слое каучука происходят на расстояниях порядка полутолщины. Как показывают оценки и анализ, за счет создания более эффективного проветривания, достигаемого с помощью вентиляторов, реализуются условия, при которых интенсивность тепломассопереноса лимитируется слоем ленточного каучука ( $\beta_{g\sigma}^{(T)} \gg \beta_{\sigma r}^{(T)}$  и  $\beta_{g\sigma}^{(M)} \gg \beta_{\sigma r}^{(M)}$ ).

Будем считать, что давление парогазовой смеси в порах подчиняется закону Дальтона:

$$p = p' = p'_a + p'_v \quad (5.3)$$

Считаем парогазовую смесь калорически совершенным газом, поэтому из (5.3) следует:

$$\rho_g R_g T_g = \rho'_g R'_g T_r = \rho'_a R_a T_r + \rho'_v R_v T_r, \quad (5.4)$$

где  $R_g$ ,  $R'_g$ ,  $R_a$ ,  $R_v$  — приведенные газовые постоянные для парогазовой смеси в сушилке, в порах, для воздуха и пара соответственно.

Кроме того, давление насыщенных паров должно удовлетворять уравнению Клапейрона-Клаузиуса:

$$p_v = p_* \exp\left(-\frac{T_*}{T_r}\right), \quad (5.5)$$

где  $p_*$  и  $T_*$  — эмпирические параметры. Учитывая, что приведенные газовые постоянные для компонент газа выражаются через универсальную газовую постоянную и молярную массу:

$$R_a = \frac{R}{\mu_a}, \quad R_v = \frac{R}{\mu_v},$$

из (5.4) с учетом (5.5) получим выражение для плотности насыщенных паров:

$$\rho'_v = \frac{\mu_v p^*}{RT_r} \exp\left(-\frac{T_*}{T_r}\right), \quad (5.6)$$

для плотности газа в порах имеем:

$$\rho'_g = \rho'_a + \rho'_v = \frac{1}{RT_r} \left[ \mu_a p - (\mu_a - \mu_v) p^* \exp\left(-\frac{T_*}{T_r}\right) \right] \quad (5.7)$$

Из (5.6) и (5.7) можно получить выражение для массовой концентрации паров воды в порах

$$k'_v = \frac{\rho'_v}{\rho'_g} = \left( 1 + \frac{\mu_a}{\mu_v} \left( \frac{p}{p^*} \exp\left(\frac{T_*}{T_r}\right) - 1 \right) \right)^{-1}. \quad (5.8)$$

Если реализуется тепловой режим сушки, то уравнение (4.1) с учетом того, что  $dT_r/dl = 0$ , принимает вид:

$$0 = q_{gr} - JL \quad (5.9)$$

откуда имеем:

$$J = \frac{q_{gr}}{L} \quad \text{при} \quad T_r = T_k \quad (5.10)$$

**Результаты численных расчетов.** Расчеты проводились для сушилки со следующими конструкционными характеристиками. Сушилка разделена на 4 зоны. В первой (верхней) зоне размещены 5 горизонтальных транспортеров, во второй — 5, в третьей 7, в четвертой — 2. Сверху вниз по транспортерам непрерывно движется влажная каучуковая лента. Переходя с одного горизонтального транспортера на другой, каучук опускается вниз, оmyвается горячим воздухом и выходит из сушилки в сухом виде. Снизу сушилки подается сухой воздух, который, поднимаясь, постепенно насыщается влагой и выходит сверху через вытяжные вентиляторы. По бокам от движущейся ленты расположены вентиляторы, которые засасывают воздух из сушильной камеры, подают его на калориферы, где он подогревается и поступает обратно в сушильную камеру. Тем самым обеспечивается его непрерывная циркуляция, при которой лента обдувается горячим воздухом, что в свою очередь способствует интенсивному испарению. В четвертой зоне калориферов нет, в ней происходит охлаждение каучука и частичное нагревание холодного воздуха, поступающего снизу.

Ниже приведены расчеты для двух режимов (рис. 1, 2), отличающихся начальным влагосодержанием  $S_{w0}$ . Представлены распределения температурных (а) и концентрационных (б) полей, а также влагосодержания (в) по длине ленты. Лента и воздух подаются в сушилку при температуре окружающей среды:  $T_{r0} = T_{w0} = T_{ge} = 20^\circ\text{C}$ . Объемный расход выходящей из сушилки парогазовой смеси  $V = 3,5 \text{ м}^3/\text{с}$ . Характерные скорости газа, циркулирующего по зонам, взяты из оценки реально работающих ленточных сушилок:  $v_{g1} = 10 \text{ м}/\text{с}$ ,  $v_{g2} = 10 \text{ м}/\text{с}$ ,  $v_{g3} = 5 \text{ м}/\text{с}$ ,  $v_{g4} = 0,1 \text{ м}/\text{с}$ . Мощности калориферов  $N_i$  распределены в следующем

соотношении  $K_1=0.55$ ,  $K_2=0.4$ ,  $K_3=0.05$ ,  $K_4=0$ , где  $K_i=N_i/N$ . Длина одного транспортера  $l_i=27$  м, ширина ленты  $b=2.0$  м, толщина ленты  $h=0.4$  см, скорость движения ленты  $v_r=0.17$  м/с, пористость каучука  $m=0.5$ , начальное влагосодержание  $S_{w0}=0.9$  (рис. 1) и  $S_{w0}=0.8$  (рис. 2). Для параметров, отвечающих за теплофизические свойства, межфазный теплообмен и кинетику испарения, использованы следующие величины:  $\rho_r=925$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w=1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $c_r=1000$  Дж/(кг\*К),  $c_w=4200$  Дж/(кг\*К),  $c_a=1025$  Дж/(кг\*К),  $c_v=2000$  Дж/(кг\*К), удельная теплота парообразования воды  $L=2.26*10^6$  Дж/кг соответствует температуре кипения  $T_k=100^\circ\text{C}$ ,  $\lambda_r=0.15$  Дж/(м\*К\*с),  $\lambda_{N_2}=0.0324*(T_g/300)^{0.8}$  Дж/(м\*К\*с),  $\lambda_{O_2}=0.0267*(T_g/300)^{0.83}$  Дж/(м\*К\*с),  $\lambda_v=0.0251*(T_g/373)^{1.23}$  Дж/(м\*К\*с),  $D_g=2.05*10^{-5}*(T_g/273)^{2.072}$  м<sup>2</sup>/с [8-10].

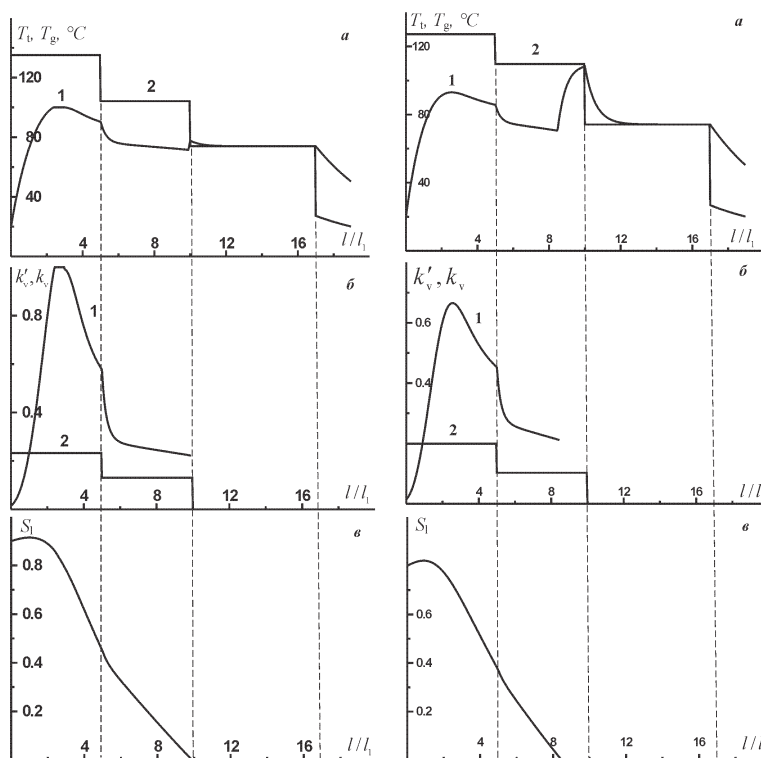


Рис. 1

Рис. 2

Распределение температур, °С (а), концентраций пара (б) и влагосодержания (в) по длине ленты при начальном влагосодержании  $S_{w0}=0.9$  (рис. 1) и  $S_{w0}=0.8$  (рис. 2). Линия 1 соответствует ленте, 2 — газу

На входе в сушилку лента находится при температуре окружающей среды, поэтому, как видно из рис. 1, концентрация паров воды в порах меньше их концентрации в выходящем потоке горячего газа. Продвигаясь по транспортерам, каучук прогревается, концентрация водяных паров в порах растёт. Для некоторого положения ленты, определяемого температурой  $T=T_g$ , она становится больше концентрации водяных паров в омывающем потоке газа. Начиная с этого положения ( $l>l_g$ ) происходит испарение воды.

В зависимости от начального влагосодержания температура ленты может стабилизироваться на различных значениях. При  $S_{w0}=0.9$  (рис. 1) в силу малой “живой пористости”  $m' = m(1-S_w)$  диффузионный массообмен на этапе прогрева затруднен, поэтому подводимое снаружи тепло идет в основном на прогрев ленты, температура которой довольно быстро достигает  $T_k$  и нагревание прекращается, испарение переходит в кипение. При этом все подводимое тепло, поступающее от газа к каучуку, идет на парообразование. По мере высушивания материала “живая пористость” увеличивается. Во-первых, это приводит к тому, что уменьшается теплообмен, т.к. он идет и по каучуку, и по жидкости. Во-вторых, увеличивается диффузионный массообмен, при этом лента даже начнет охлаждаться. При меньшем начальном влагосодержании  $S_{w0}=0.8$  (рис. 2) по указанным причинам температура ленты во время сушки в первой зоне так и не достигает  $T_k$ .

**Заключение.** Представленная модель, описывающая конвективную сушку ленточного каучука, позволяет рассматривать различные режимы функционирования сушилки, что является первым этапом при нахождении оптимальных режимов данного технологического процесса. В частности, рассмотрены режимы с различной влажностью и скоростью ленты. Показано, что с увеличением начального влагосодержания и скорости движения ленты высушивание материала происходит ближе к концу сушилки, при этом температура ленты остается существенно ниже температуры газа, благодаря чему предотвращается перегрев ленты.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рашковская Н.Б. Сушка в химической промышленности. Л.: Химия, 1977. 364 с.
2. Сажин Б.С., Сажин В.Б. Научные основы техники сушки. М.: Наука, 1997.
3. Сажин Б.С., Булеков А.П., Сажин В.Б. Оценка эффективности работы аппаратов с активным гидродинамическим режимом на основе их эксергетических характеристик // ТОХТ. 1999. Т. 33. № 5. С. 521.
4. Нигматуллин Р.И. Динамика многофазных систем. М.: Наука, 1987.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. Изд. 4-е, доп. Новосибирск: Наука, 1970. 659 с.
6. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса. М., 1959. 364 с.
7. Лыков А.В. Теория сушки. М.: Энергия, 1968. 467 с.
8. Енохович А.С. Справочник по физике и технике. М.: Просвещение, 1976. 174 с.
9. Краткий справочник физико-химических величин. Изд. 8-е, перераб. / Под ред. А.А. Равделя и А.М. Пономаревой. Л.: Химия, 1983. 232 с.
10. Физические величины: Справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

#### REFERENCES

1. Rashkovskaja, N.B. *Sushka v khimicheskoi promyshlennosti* [Drying in the chemical industry]. Leningrad, 1977. 364 p. (in Russian).
2. Sazhin, B.S., Sazhin, V.B. *Nauchnye osnovy tekhniki sushki* [Scientific bases of drying techniques]. Moscow: Nauka, 1997. (in Russian).
3. Sazhin, B.S., Bulekov, A.P., Sazhin, V.B. Assessment of the active hydrodynamic regime devices effectiveness on the basis of their exergetic characteristics. *ТОХТ — Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 1999. V. 33. № 5. P. 521. (in Russian).

4. Nigmatullin, R.I. *Dinamika mnogofaznykh sistem* [Dynamics of multiphase systems]. Moscow: Nauka, 1987. (in Russian).
5. Kutateladze, S.S. *Osnovy teorii teploobmena. Izd. 4-e, dop.* [Fundamentals of the heat transfer theory. 4<sup>th</sup> ed.]. Novosibirsk: Nauka, 1970. 659 p. (in Russian).
6. Lykov, A.V., Mikhailov, Iu.A. *Teoriia teplo- i massoperenosa* [Theory of heat and mass transfer]. Moscow, 1959. 364 p. (in Russian).
7. Lykov, A.V. *Teoriia sushki* [Theory of drying]. Moscow, 1968. 467 p. (in Russian).
8. Enokhovich, A.S. *Spravochnik po fizike i tekhnike* [Handbook of Physics and Technology]. Moscow, 1976. 174 p. (in Russian).
9. *Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin. Izd. 8-e, pererab.* [Quick reference of physical and chemical variables. 8<sup>th</sup> ed.] / Ed. by A.A. Ravdelia, A.M. Ponomareva. Leningrad, 1983. 232 p. (in Russian).
10. Babichev, A.P., Babushkina, N.A., Bratkovskii, A.M. *Fizicheskie velichiny: Spravochnik* [Physical variables: Reference]. / Ed. by I.S. Grigor'ev, E.Z. Meilikhov. Moscow, 1991. 1232 p. (in Russian).

#### **Автор публикации**

**Игошин Дмитрий Евгеньевич** — научный сотрудник Института теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (Тюменский филиал), кандидат физико-математических наук

#### **Author of the publication**

**Dmitry E. Igoshin** — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (Tyumen Branch)