

УДК 66.015.23

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛО- И МАССООТДАЧИ В НАСАДОЧНЫХ СЛОЯХ

<sup>1</sup>Лаптев А.Г., <sup>2</sup>Башаров М.М., <sup>1</sup>Лаптева Е.А.

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет»,

Казань, e-mail: tvt\_kgeu@mail.ru;

<sup>2</sup>АО «ТАНЕКО», Нижнекамск, e-mail: tvt\_kgeu@mail.ru

В статье рассматриваются процессы турбулентного переноса тепла и массы в одно- и двухфазных средах в стационарных насадочных и зернистых слоях с хаотичной и регулярной структурами. Применяются одномерные модели тепло- и массоотдачи в турбулентном пограничном слое и получены расчетные выражения для средних коэффициентов переноса. Используются свойства консервативности законов трения в пограничном слое при наличии возмущений, что позволило применять одномерные модели для расчета тепло-массообмена в насадочных слоях. Произведены расчеты, коэффициентов тепло- и массоотдачи, которые сравниваются с экспериментальными данными различных авторов. Рассчитана эффективность массоотдачи в газовой фазе при пленочном режиме и показано согласование с экспериментом. Разработанная математическая модель и полученные расчетные выражения используются при проектировании или модернизации промышленных аппаратов в нефтегазохимическом комплексе.

**Ключевые слова:** теплоотдача, массоотдача, насадка, пограничный слой, турбулентность

## HEAT AND EFFICIENCY MASS TRANSFER IN PACKED LAYERS

<sup>1</sup>Laptev A.G., <sup>2</sup>Basharov M.M., <sup>1</sup>Lapteva E.A.

<sup>1</sup>VPO «Kazan State Power Engineering University», Kazan, e-mail: tvt\_kgeu@mail.ru;

<sup>2</sup>OAO «TANECO», Nizhnekamsk, e-mail: tvt\_kgeu@mail.ru

The article focuses on the processes of turbulent transfer of heat and mass in one – and two-phase media in a stationary Packed and granular layers with chaotic and regular structure. Considered a one-dimensional model of heat and mass transfer in a turbulent boundary layer and theoretical expressions for the average transfer coefficients. Use of the properties of conservativeness of the laws of friction in the boundary layer in the presence of perturbations that allowed to apply the one-dimensional model for calculation of heat and mass transfer in Packed layers. The calculations are made, the coefficients of heat and mass transfer are compared with experimental data of various authors. The calculated efficiency of mass transfer in the gas phase at film mode and shows the agreement with the experiment. A mathematical model was developed and theoretical expressions are used when designing and modernization of industrial units in a petrochemical complex.

**Keywords:** heat transfer, mass transfer, nozzle, boundary layer, turbulence

В статье рассматриваются процессы переноса в одно- и двухфазных средах в стационарных насадочных и зернистых слоях с хаотичной засыпкой при турбулентном режиме движения газов и жидкостей сквозь слой. Такие слои широко используются для проведения как гидромеханических процессов (например, проточные статические смесители, насыпные фильтры), так и тепло-массообменных и реакционных процессов. Сюда относятся некоторые процессы гетерогенного катализа, сушка в слое, нагревание материала в шахматных и доменных печах, адсорбция, абсорбция, ректификация и т.п. [1, 5, 14, 16].

Ниже показано применение моделей пограничного слоя для получения расчетных выражений средних коэффициентов тепло- и массоотдачи и их использование для расчета эффективности тепло- и массопереноса в каналах и аппаратах с насадками при турбулентном режиме ( $Re_s > 50$ ) [14].

## Касательное напряжение в насадочном слое

Важной характеристикой при движении потоков является касательное напряжение на стенках каналов и на других элементах аппаратов. От касательного напряжения зависят затраты на перекачку газов и жидкостей, а также его значение часто используется в различных моделях для расчета коэффициентов тепло- и массоотдачи.

Среднее касательное напряжение на стенке  $\tau_{ст}$  находят, используя уравнение баланса сил, а если это затруднительно, то выражают через среднюю объемную или массовую скорость диссипации энергии в аппарате [4, 6, 7]. Например, для неупорядоченного насадочного или зернистого слоя такое выражение имеет вид [7, 8]

$$\tau_{ст} = \kappa^2 \rho \left( \frac{\bar{\epsilon} v}{\rho} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где  $\kappa$  – коэффициент пропорциональности;  $\rho$  – плотность фазы  $\text{кг/м}^3$ ;  $\bar{\epsilon}$  – средняя

скорость диссипации энергии, Вт/м<sup>3</sup>;  $\nu$  – коэффициент молекулярной вязкости, м<sup>2</sup>/с. Среднюю скорость диссипации энергии  $\bar{\epsilon}$  можно выразить через фиктивную скорость среды  $w_0$  в полном сечении аппарата без насадки

$$\bar{\epsilon} = \frac{\xi w_0^3 a_v \rho}{8 \epsilon_{cb}^4}, \quad (2)$$

где  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $a_v$  – удельная поверхность насадки, м<sup>2</sup>/м<sup>3</sup>;  $\epsilon_{cb}$  – удельный свободный объем насадки;  $w_0$  – средняя скорость, м/с.

Или через среднюю истинную скорость среды  $\left( w = \frac{w_0}{\epsilon_{cb}} \right)$

$$\bar{\epsilon} = \frac{\xi w^3 a_v \rho}{8 \epsilon_{cb}}. \quad (3)$$

Используя эквивалентный диаметр насадки  $d_3 = \frac{4 \epsilon_{cb}}{a_v}$  из (3), можно получить

$$\bar{\epsilon} = \frac{\xi w^3 \rho}{2 d_3}. \quad (4)$$

Выражение (2) следует из зависимости для средней диссипации энергии

$$\bar{\epsilon} = \frac{\Delta P S w_0}{S H \epsilon_{cb}}, \quad (5)$$

где  $\Delta P$  – перепад давления, Па;  $S$  – площадь сечения аппарата, м<sup>2</sup>.

В числителе стоит диссипируемая энергия, а в знаменателе свободный объем насадки, т.е. объем, занятый газом или жидкостью.

В теории пограничного слоя широко используется понятие динамической скорости

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_{ст}}{\rho}}.$$

Из выражений (1) и (4) запишем среднюю динамическую скорость для насадочного слоя, т.е. на поверхности элементов

$$u_* = \kappa \left( \frac{\xi w^3 \nu}{2 d_3} \right)^{0,25} = \frac{\kappa \nu}{d_3} \text{Re}_3^{0,75} \left( \frac{\xi}{2} \right)^{0,25}, \quad (6)$$

где  $\text{Re}$  – число Рейнольдса  $\text{Re}_3 = \frac{w d_3}{\nu}$ .

В работах [7, 8] при турбулентном режиме движения среды ( $\text{Re}_3 > 40$ ) для насадок установлен коэффициент пропорциональности в интервале 1,7–2,0. Возьмем среднее значение  $\kappa = 1,85$ .

#### Модели тепло- и массоотдачи

Для определения средних коэффициентов тепло- и массоотдачи используются модели пограничного слоя в одномерной по-

становке с применением различных функций турбулентного обмена [6–9]. Записывается сопротивление переносу тепла и массы компонента поперек пограничного слоя в виде

$$\frac{1}{\alpha} = \int_0^\delta \frac{q^* dy}{\rho c_p (a + a_t(y))};$$

$$\frac{1}{\beta} = \int_0^\delta \frac{j^* dy}{D + D_t(y)}, \quad (7)$$

где  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $\delta$  – толщина пограничного слоя, м;  $a$ ,  $D$  – коэффициенты молекулярного переноса тепла и массы (диффузии), м<sup>2</sup>/с;  $a_t$ ,  $D_t$  – коэффициенты турбулентного переноса тепла и массы, м<sup>2</sup>/с;  $y$  – поперечная координата в пограничном слое, м;  $\rho$  – плотность среды, кг/м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость среды, Дж/(кг·К).

Например, из выражения (7) с использованием функций турбулентной вязкости Г.А. Дрейцера, Deissler и др. получены формулы [10]:

$$\alpha = \frac{\rho c_p u_*}{[R' + 2,5 \ln \text{Pr}_\delta] R^{2/3}}; \quad (8)$$

$$\beta = \frac{u_*}{[R' + 2,5 \ln R_\delta] \text{Sc}^{2/3}}, \quad (9)$$

где значение  $R'$  для плоского пограничного слоя без возмущения  $R' = 5,303$ ;  $R_\delta$  – безразмерная толщина пограничного слоя;  $\text{Sc}$  – число Шмидта  $\text{Sc} = \nu/D$ ;  $\text{Pr}$  – число Прандтля,  $\text{Pr} = \mu c_p / \lambda$ .

Значение  $R'$  фактически является одним из пределов интегрирования в формулах (7) и близко к значению безразмерной толщины вязкого подслоя в трехслойной модели (~5). При наличии возмущений это значение будет отличаться от пяти. Такими возмущениями являются кривизна и шероховатость поверхности, сужение и расширения потока в насадочном слое. Для коррекции параметров пограничного слоя, который отличается от плоского, в работах [6–11] используется консервативность его законов к возмущениям (подход С.С. Кутателадзе, А.И. Леонтьева и др.).

С использованием данного подхода, выполняя аналогичный вывод [8] для насадки, получим

$$R' = 0,67 \text{Re}_3^{0,125} \xi^{-0,25}. \quad (10)$$

Формула для расчета среднего значения  $R_\delta$  для насадки имеет вид [8]

$$R_\delta = 6,49 (\text{Re}_3 \xi)^{0,25}. \quad (11)$$

Записывая динамическую скорость в виде (6) из формул (8) и (9) с параметрами (10), (11) получим

$$Nu_3 = \frac{1,85 Re_3^{0,75} (\xi/2)^{0,25} Pr^{0,33}}{0,67 Re_3^{0,125} \xi^{-0,25} + \ln \left[ 6,49 (Re_3 \xi)^{0,25} \right]}; \quad (12)$$

$$Sh_3 = \frac{1,85 Re_3^{0,75} (\xi/2)^{0,25} Sc^{0,33}}{0,67 Re_3^{0,125} \xi^{-0,25} + \ln \left[ 6,49 (Re_3 \xi)^{0,25} \right]}; \quad (13)$$

где  $Nu_3 = \alpha d_3 / \lambda$ ;  $Sh_3 = \beta d_3 / D$  – числа Нуссельта и Шервуда.

Расчеты по выражениям (12), (13) дают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными и с уравнениями, полученными с применением моделей Прандтля и Кармана [8].

### Результаты расчетов

Для проверки полученных выражений (12)–(13) используем как известные критериальные выражения, так и экспериментальные данные различных авторов в виде графиков.

Массоотдачу в газовой фазе от насадочного слоя изучали путем возгонки твердых тел (нафталина) и испарения воды с поверхности пористых тел [1, 14]. Экспериментальные данные обобщены критериальным выражением

$$Sh_3 = A Re_3^m Sc^{1/3}, \quad (14)$$

где по данным Гильденблата  $A = 0,407$ ,  $m = 0,655$  ( $Re_3 = 40-10^4$ ); по данным Аэрова и Умника  $A = 0,395$ ,  $m = 0,64$  ( $Re_3 = 30-2000$ ) и по данным Шулмена  $A = 0,45$ ,  $m = 0,64$  (при  $Re_3 = 40-3000$ ).

В работе [11] получена приближенная обобщающая зависимость

$$Sh_3 = 0,175 Re_3^{0,75} Sc^{1/3} (\xi/2)^{0,25}, \quad (15)$$

а в работе [12] в результате обобщения гидродинамической аналогии Чилтона – Кольборна на градиентные потоки получено

$$Sh_3 = 0,342 Re_3^{0,643} Sc^{1/3} (\xi/2)^{0,214}. \quad (16)$$

Результаты расчетов по формуле (13) удовлетворительно ( $\pm 15\%$ ) согласуются с результатами, полученными по уравнениям (14)–(16) для различных насадок при  $50 < Re_3 < 10^4$ .

На рис. 1 представлены результаты расчета по формуле (13) и экспериментальные данные, обобщенные в работе [14]. Кольца 25 и 50 мм. Возгонка нафталина.

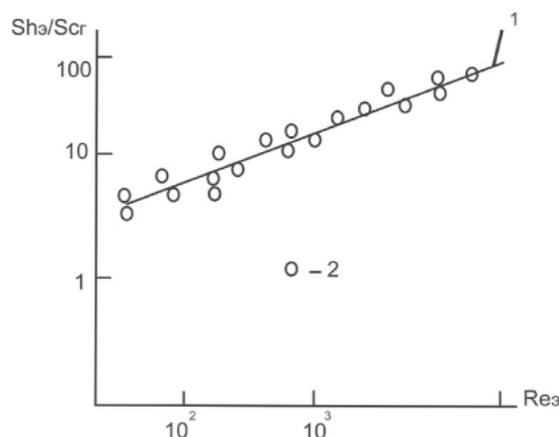


Рис. 1. Корреляция данных по массоотдаче в газовой фазе насадочных колонн:  
1 – расчет по уравнению (13);  
2 – эксперимент [14]

На рис. 2 дано сравнение по числу Нуссельта при теплоотдаче в нерегулярном насадочном слое из цилиндров и параллелепипедов ( $\xi = 11,6/Re^{0,25}$ ) с опытными данными для воздуха [2].

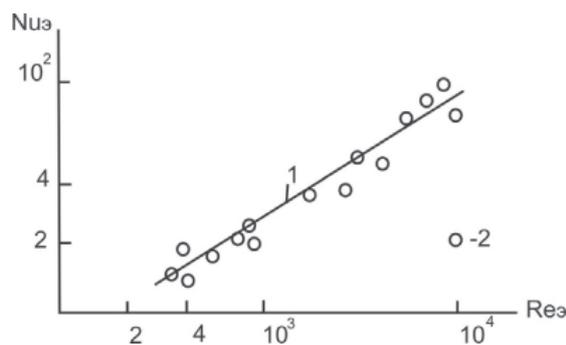


Рис. 2. Теплоотдача в слоях насадочных элементов:  
1 – расчет по уравнению (12);  
2 – опытные данные [2]

Итак, в результате проведенных исследований моделей пограничного слоя показана принципиальная возможность в их использовании и для расчета теплоотдачи в хаотичных насадках при турбулентном движении однофазных потоков.

**Двухфазные потоки в насадках**

Рассмотрим применение приведенных выражений для расчета коэффициентов массоотдачи в орошаемых насадках при противоточном пленочном режиме с газовым потоком. До начала подвисяния жидкости есть рекомендации производить расчет  $Sh_T$  по уравнениям для сухих насадок. Действительно, поправка Шульмана на орошение при пленочном режиме близка к единице [15].

В работе [3] получены опытные данные по гидравлическому сопротивлению и массоотдаче в газовой фазе для регулярной металлической рулонной насадки. Насадка образована сдвоением металлическими лентами, одна из которых имеет гофры треугольной формы. На боковых поверхностях гофр выполнены лепестки в виде круговых сегментов, при этом хорды сегментов гофр расположены под углом друг к другу. Свободный объем насадки  $\epsilon_{св} = 0,95$ , удельная поверхность  $a_v = 480 \text{ м}^2/\text{м}^3$ , эквивалентный диаметр  $d_3 = 0,0079 \text{ м}$ . Опыты проводились при скорости воздуха 0,5 до 3,0 м/с и плотности орошения от 5 до 30  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ .

В результате обобщения опытных данных получены коэффициенты сопротивления сухой  $\xi_0$  и орошаемой насадки  $\xi_{оп}$  в виде

$$\xi_0 = 0,105 Re_3^{0,108}; \quad (17)$$

$$\xi_{оп} = \xi_0 + 0,0226 Re_ж^{0,34} \cdot 10^{-3 Re_3}, \quad (18)$$

где  $Re_ж = U d_3 / \nu_ж$  – число Рейнольдса жидкой фазы;  $U$  – плотность орошения,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

Коэффициент массоотдачи в газовой фазе находился экспериментально при увлажнении воздуха водой ( $Sc_r = 0,7$ ). На рис. 3 представлены результаты расчетов коэффициента массоотдачи  $\beta = Sh_T D_r / d_3$  по формуле (13) и опытные данные [3].

Согласование с расхождением в пределах погрешности эксперимента

Если при расчете насадочных колонн используется объемный коэффициент массоотдачи, то запишем

$$\beta_{vT} = \beta a_v \psi_w, \quad (19)$$

где  $\psi_w$  – коэффициент смачиваемости поверхности насадки.

Структуру потока газовой фазы можно оценить по числу Пекле по перемешиванию [13]

$$Pe_r = \frac{w_r H}{D_n} = 0,52 \left( \frac{Re_3}{\xi} \right)^{0,25} \frac{H}{d_3}. \quad (20)$$

Для рассмотренной насадки при  $w_r = 0,5 \text{ м/с}$ ;  $Re_3 = 263,3$ ;  $\xi = 0,19$  и  $H = 1,0 \text{ м}$  по формуле (20) получаем  $Pe_r = 401,6$ , что

указывает на практически идеальное вытеснение потока.

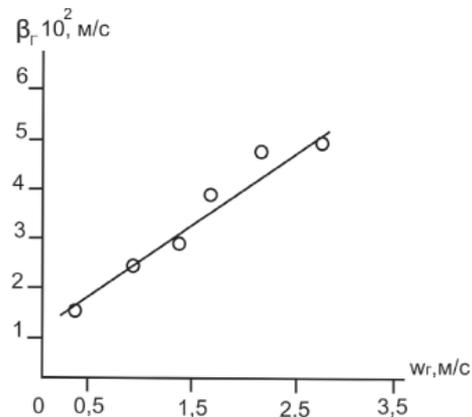


Рис. 3. Зависимость коэффициентов массоотдачи в газовой фазе от скорости газа при плотности орошения 10 ( $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ),  $d_3 = 0,0079 \text{ м}$ .  $\circ$  – эксперимент [3], линия – расчет по (13)

Тогда эффективность массоотдачи в газовой фазе запишем по известному выражению

$$\eta = 1 - \exp(-N_r) = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_r F}{V_r}\right), \quad (21)$$

где  $N$  – число единиц переноса;  $F = a_v \psi_w S_k H$  – поверхность контакта фаз,  $\text{м}^2$ ;  $V_r = w_r S_k$  – объемный расход,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;  $S_k$  – площадь поперечного сечения колонны,  $\text{м}^2$ .

В результате имеем

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\beta_r a_v \psi_w H}{w_r}\right). \quad (22)$$

Для рассмотренного выше примера при  $w_r = 0,5 \text{ м/с}$  получаем  $\eta = 0,999$ , т.е. данная насадка обеспечивает высокую эффективность разделения исследованной смеси.

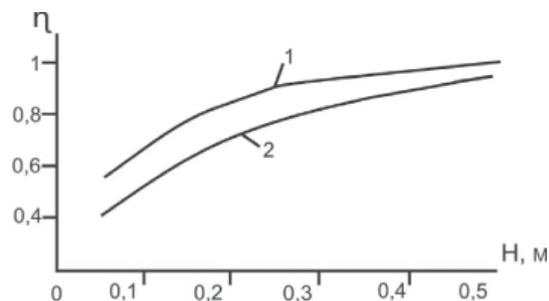


Рис. 4. Зависимость эффективности массоотдачи насадки из колец Рашига от высоты слоя:  
1 –  $Re_3 = 100$ ; 2 –  $Re_3 = 500$  ( $Sc_2 = 1$ )

На рис. 4. даны результаты расчетов эффективности массоотдачи в насадочном слое из колец Рашига размером  $50 \times 50 \text{ мм}$  ( $a_v = 110 \text{ м}^2/\text{м}^3$ ;  $\epsilon_{св} = 0,95$ ).

### Заключение

На основе выполненных исследований показана возможность использования моделей плоского турбулентного пограничного слоя, с соответствующей корректировкой параметров, для расчета коэффициентов переноса в хаотичных и регулярных насадочных слоях. Основными параметрами полученных уравнений являются число Рейнольдса и коэффициент гидравлического сопротивления слоя. Показаны расчетные и экспериментальные данные для различных типовых насадок. При условии идеального вытеснения потока приведена формула и дан расчет эффективности массопереноса в хаотичной насадке. Полученные уравнения применяются при проектировании или модернизации различного оборудования с насадочными слоями [16].

*Статья выполнена в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности. Задание № 13.405.2014/К.*

### Список литературы

1. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринаский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем: Гидравлические и тепловые основы расчета. Химия. – Л., 1979. – 176 с.
2. Блиничев В.Н., Комлев В.Г., Захаров В.М. и др. Исследование коэффициентов сопротивления и теплоотдачи слоя насадки // Изв. вузов. Химия и хим. технол. – 1987. – Т. 30, № 2. – С. 124–126.
3. Дьяконов С.Г., Елизаров В.В., Елизаров В.И. Теоретические основы проектирования промышленных аппаратов химической технологии на базе сопряженного физического и математического моделирования: Федер. агентство по образованию, Казан. гос. технол. ун-т. – Казань: КГТУ, 2009. – 456 с.
4. Дьяконов С.Г. Моделирование массотеплопереноса в промышленных аппаратах на основе исследования лабораторного макета / С.Г. Дьяконов, В.И. Елизаров, А.Г. Лаптев // ТОХТ. – 1993. – Т. 27, № 1. – С. 4–18.
5. Лаптев А.Г., Минеев Н.Г., Мальковский П.А. Проектирование и модернизация аппаратов разделения в нефте- и газопереработке. – Казань: 2002. – 220 с.
6. Лаптев А.Г. Математическое моделирование процессов массо- и теплоотдачи в газовой фазе насадочных колонн / А.Г. Лаптев, С.Г. Дьяконов // Химическая промышленность. – 1993. – № 6. – С. 48–51.
7. Лаптев А.Г. Модели пограничного слоя и расчет теплообменных процессов. – Казань: Изд-во Казанск. ун-та, 2007. – 500 с.
8. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М., Лаптева Е.А. Модели явлений переноса в неупорядоченных насадочных и зернистых слоях // Теор. основы хим. техн. – 2015. – Т.49. – № 4. – С. 407–414.
9. Лаптев А.Г. Модели переноса и эффективность жидкостной экстракции. – Казань: Казанск. гос. энерг. ун-т, 2005. – 229 с.
10. Лаптев А.Г., Николаев Н.А., Башаров М.М. Методы интенсификации и моделирования теплообменных процессов. – М.: Теплотехник, 2011. – 336 с.
11. Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Модель массоотдачи в зернистых и насадочных слоях // Изв. Вузов. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56. – С. 92–96.
12. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Обобщение гидродинамической аналогии для различных условий обтекания поверхности // Вестник Казан. технол. ун-та (КХТИ). – 2013. – Т. 16. – № 23. – С. 64–69.
13. Лаптев А.Г., Лаптева Е.А. Определение коэффициентов турбулентного перемешивания в одно- и двухфазных средах по модели Тейлора // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (часть 13). – С. 2810–2814.
14. Рамм В.М. Абсорбция газов. Химия. – М., 1976. – 656 с.
15. Фарахов М.И., Лаптев А.Г., Фарахов Т.М. Определение коэффициентов массоотдачи в газовой фазе орошаемых насадочных колонн в противотоке // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2014. – № 9. – С. 50–53.
16. Фарахов М.И., Лаптев А.Г. Энергоэффективное оборудование разделения и очистки веществ в химической технологии // Вестник Казанск. технол. ун-та (КХТИ). – 2011. – № 9. – С. 152–158.

### References

1. Ajerov M.Je., Todes O.M., Narinaskij D.A. Apparaty so stacionarnym zernistym sloem: Gidravlicheskie i teplovyje osnovy rascheta. Himija. L., 1979. 176 p.
2. Blinichev V.N., Komlev V.G., Zaharov V.M. i dr. Issledovanie koeficientov soprotivlenija i teplootdachi sloja nasadki // Izv. vuzov. Himija i him. tehnol. 1987. T. 30, no. 2. pp. 124–126.
3. Djakonov S.G., Elizarov V.V., Elizarov V.I. Teoreticheskie osnovy proektirovanija promyshlennyh apparatov himicheskoj tehnologii na baze sopryazhennogo fizicheskogo i matematicheskogo modelirovanija: Feder. agentstvo po obrazovaniju, Kazan. gos. tehnol. un-t. Kazan: KGTU, 2009. 456 p.
4. Djakonov S.G. Modelirovanie massoteploperenosa v promyshlennyh apparatah na osnove issledovanija laboratornogo maketa / S.G. Djakonov, V.I. Elizarov, A.G. Laptev // TOHT. 1993. T. 27, no. 1. pp. 4–18.
5. Laptev A.G., Mineev N.G., Malkovskij P.A. Proektirovanie i modernizacija apparatov razdelenija v nefte- i gazoprerabotke. Kazan: 2002. 220 p.
6. Laptev A.G. Matematicheskoe modelirovanie processov masso- i teplootdachi v gazovoj faze nasadochnyh kolonn / A.G. Laptev, S.G. Djakonov // Himicheskaja promyshlennost. 1993. no. 6. pp. 48–51.
7. Laptev A.G. Modeli pogranichnogo sloja i raschet teploobmennyh processov. Kazan: Izd-vo Kazansk. un-ta, 2007. 500 p.
8. Laptev A.G., Farahov T.M., Lapteva E.A. Modeli javlenij perenosa v neuporjadochennyh nasadochnyh i zernistyh slojah // Teor. osnovy him. tehn. 2015. T.49. no. 4. pp. 407–414.
9. Laptev A.G. Modeli perenosa i jeffektivnost zhdkostnoj jekstrakcii. Kazan: Kazansk. gos. jenerg. un-t, 2005. 229 p.
10. Laptev A.G., Nikolaev N.A., Basharov M.M. Metody intensifikacii i modelirovanija teplomassoobmennyh processov. M.: Teplotehnik, 2011. 336 p.
11. Laptev A.G., Farahov T.M. Model massootdachi v zernistyh i nasadochnyh slojah // Izv. Vuzov. Himija i himicheskaja tehnologija. 2013. T. 56. pp. 92–96.
12. Laptev A.G., Lapteva E.A. Obobshhenie gidrodinamicheskoj analogii dlja razlichnyh uslovij obtakanija poverhnosti // Vestnik Kazan. tehnol. un-ta (KHTI). 2013. T. 16. no. 23. pp. 64–69.
13. Laptev A.G., Lapteva E.A. Opredelenie koeficientov turbulentnogo peremeshivanija v odno- i dvuhfaznyh sredah po modeli Tejlora // Fundamentalnye issledovanija. 2015. no. 2 (chast 13). pp. 2810–2814.
14. Ramm V.M. Absorbicija gazov. Himija. M., 1976. 656 p.
15. Farahov M.I., Laptev A.G., Farahov T.M. Opredelenie koeficientov massootdachi v gazovoj faze oroshaemyh nasadochnyh kolonn v protivotoke // Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamentalnye issledovanija. 2014. no. 9. pp. 50–53.
16. Farahov M.I., Laptev A.G. Jenergojeffektivnoe oborudovanie razdelenija i ochistki veshhestv v himicheskoj tehnologii // Vestnik Kazans. tehnol. un-ta (KHTI). 2011. no. 9. pp. 152–158.

### Рецензенты:

Зиятдинов Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Системотехника», ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», г. Казань;

Ваньков Ю.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и системы теплоснабжения», ФГБОУ ВПО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.