

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ДВУХТРУБНОГО  
ТЕПЛООБМЕННИКА ПРИ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ,  
НАГРЕВАЕМОЙ ДЫМОВЫМИ ГАЗАМИ**

**А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, С. Б. Воротнева<sup>1</sup>, Н. А. Дулькина<sup>2</sup>**

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», (1);  
ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных  
материалов» (2), г. Волгоград, Россия; pahp@vstu.ru*

**Ключевые слова:** аналитическое решение; граничное условие; двухтрубный теплообменник; идеальное вытеснение; идеальное смешение; продольная теплопроводность; число Пекле.

**Аннотация:** Представлены физическая и математическая модели теплообменника типа «труба в трубе», в котором жидкая фаза кипит в межтрубном пространстве, а дымовые газы охлаждаются в центральной трубе в режиме продольной теплопроводности. Проведено сравнение технологических параметров и геометрических размеров с типовыми структурами потоков: идеального вытеснения и идеального смешения. Показана необходимость учета продольной теплопроводности при значениях числа Пекле меньше 7.

При расчете теплообменников, в том числе двухтрубных или по другому названию «труба в трубе» обычно полагают, что обратное перемешивание, сопровождаемое продольной теплопроводностью, отсутствует, то есть режим течения теплоносителей соответствует идеальному вытеснению. Другой крайний случай, идеальное смешение, обычно характерен для расчета гидродинамических, массообменных, реакторных и тепловых процессов в аппаратах с мешалками и при расчете трубчатых теплообменников представляет интерес как теоретический случай с максимально возможными скачком температуры на входе и поверхностью теплопередачи, то есть реальные теплообменники должны иметь расчетную поверхность между рассчитанными по типовым алгоритмам идеального вытеснения и смешения [1 – 6].

Составим физическую и математическую модели теплообмена для двухтрубного теплообменника, в котором жидкость расходом  $G_k$  подается и кипит при постоянной температуре  $t_k$  в межтрубном пространстве, а в качестве горячего теплоносителя используется дымовой газ, движущийся в центральной трубе в режиме продольной теплопроводности с расходом  $G$  и уменьшающий свою температуру с  $t_g$  до  $t_x$ . Схема рассматриваемого процесса между выделенными сечениями I-I и II-II на расстоянии  $d\ell$  представлена на рис. 1.

Дифференциальное уравнение теплового баланса может быть записано в виде:

$$G_k(c_k t_k + r_k D) + G c_g t + S v_t = G_k \left[ c_k t_k + r_k \left( D + \frac{dD}{d\ell} d\ell \right) \right] + G c_g \left( t + \frac{dt}{d\ell} d\ell \right) + S \left( v_t + \frac{dv_t}{d\ell} d\ell \right),$$

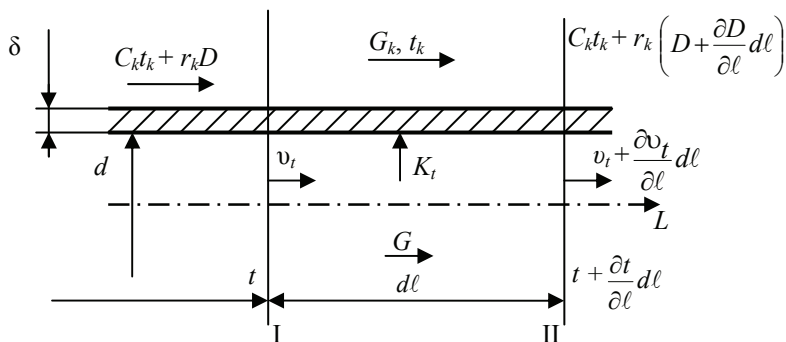


Рис. 1. Схема материальных и тепловых потоков между сечениями I-I и II-II толщиной  $dl$

где  $c_k$  – теплоемкость уксусной кислоты, Дж/(кг·К);  $D$ ,  $(D + \frac{dD}{dl} dl)$  – доли насыщенного пара в кипящей жидкости на входе и выходе из него в выделенное сечение соответственно;  $S$  – площадь сечения для газа, м<sup>2</sup>;  $v_t$  – скорость продольной теплопроводности, Вт/м<sup>2</sup>.

После алгебраических преобразований получаем

$$0 = G_k r_k \frac{dD}{dl} dl + G c_g \frac{dt}{dl} dl + S \frac{dv_t}{dl} dl.$$

В последнем выражении с учетом модифицированного уравнения Фурье-Кирхгофа, в котором молекулярная теплопроводность  $\lambda$  заменена на продольную теплопроводность  $\lambda_\ell$  (по аналогии с массообменными процессами, в которых молекулярная диффузия  $D_m$  заменяется при обратном перемешивании на продольную диффузию  $D_\ell$ ) [1 – 3]

$$v_t = -\lambda_\ell \frac{dt}{dl}, \quad (1)$$

получаем

$$0 = G_k r_k \frac{dD}{dl} + G c_g \frac{dt}{dl} - \lambda_\ell S \frac{d^2 t}{dl^2},$$

проинтегрируем по соответствующим параметрам слагаемые в правой части

$$G_k r_k \int_0^D \frac{dD}{dl} dl + G c_g \int_{t_0}^t \frac{dt}{dl} dl - \lambda_\ell S \int_{g_0}^g \frac{dg}{dl} dl,$$

где  $g = \frac{dt}{L dx}$  – градиент температуры по безразмерной координате  $x$ , К;  $t_0 > t_g$  – температура горячего теплоносителя на входе с учетом скачка этой температуры для продольной теплопроводности  $\lambda_\ell$ , °С.

$$G_k r_k D + G c_g (t - t_0) - \frac{\lambda_\ell S}{L} (g - g_0) = 0,$$

или

$$t = t_0 - \frac{G_k r_k D}{G c_g} + \frac{\lambda_\ell S (g - g_0)}{G c_g L}.$$

Умножим и разделим последнее слагаемое на плотность газа  $\rho_g$ , обозначим коэффициент продольной температуропроводности  $a_\ell = \lambda_\ell / c_g \rho_g$  (по аналогии с коэффициентом молекулярной теплопроводности) и с учетом того, что число Пекле продольной теплопроводности  $Pe = v_g L / a_\ell$ , получаем

$$t = t_0 - \frac{G_k r_k D}{Gc_g} + \frac{1}{Pe}(g - g_0).$$

При  $t = t_x$  – то есть при температуре газа на выходе, доля пара  $D = 1$

$$t_x = \left( t_0 - \frac{1}{Pe} g_0 \right) + \frac{1}{Pe} g_k - \frac{G_k r_k}{Gc_g}. \quad (2)$$

Так как для моделей с обратным перемешиванием граничное условие на входе для массообменных процессов [1 – 3]

$$C_n = C_0 - \frac{1}{Pe} \left( \frac{dC}{dx} \right)_0,$$

где  $C_n, C_0$  – концентрации веществ начальная и на входе в аппарат соответственно, а для тепловых процессов с учетом принятых обозначений [4, 5]

$$t_g = t_0 - \frac{1}{Pe} g_0, \quad (3)$$

и интегрального уравнения теплового баланса

$$G_k r_k = Gc_g (t_g - t_x), \quad (4)$$

уравнение (2) с учетом граничного условия (3) и уравнения (4) приобретает вид

$$t_x = t_g + \frac{1}{Pe} g_k - \frac{G_k r_k}{Gc_g}. \quad (5)$$

Тогда  $g_k = 0$ , то есть градиент температуры на выходе отсутствует.

Составив дифференциальное уравнение теплопередачи от газа к кипящей жидкости для выделенного объема газа (см. рис. 1)

$$Gc_g t + v_t S + K_t \pi (d + \delta) dl (t - t_k) = Gc_g \left( t + \frac{dt}{dl} dl \right) + \left( v_t + \frac{dv_t}{dl} dl \right) S,$$

которое после алгебраических преобразований принимает вид

$$0 = K_t \pi (d + \delta) dl (t - t_k) + Gc_g \frac{dt}{dl} dl + S \frac{dv_t}{dt} dl$$

или с учетом уравнения (1) и принятого обозначения  $dx = dl/L$  получим

$$Gc_g \frac{dt}{L dx} + K_t \pi (d + \delta) (t - t_k) - \lambda_\ell S \frac{d^2 t}{L^2 dx^2} = 0.$$

Дальнейшие математические выкладки при использовании вышеприведенных значений продольной температуропроводности и числа Пекле продольной теплопроводности приводят к дифференциальному уравнению II порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2 t}{dx^2} - Pe \frac{dt}{dx} - q(t - t_k) = 0, \quad (6)$$

где  $q = \frac{4K_t(d + \delta)\tau Pe}{d^2 c_g \rho_g}$  – параметр расчетного уравнения;  $\tau = L/v_g$  – среднее время

пребывания газа в центральной трубе.

Решение дифференциального уравнения имеет вид [7]

$$t = t_k + C_1 e^{r_1 x} + C_2 e^{r_2 x}, \quad (7)$$

где корни характеристического уравнения

$$r_{1,2} = \frac{Pe}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{Pe}{2}\right)^2 + q}, \quad (8)$$

а  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, которые определяются из граничных условий

$$x = 1, \quad t_x = t_k + C_1 e^{r_1} + C_2 e^{r_2},$$

и с учетом выражения (5)

$$0 = C_1 r_1 e^{r_1} + C_2 r_2 e^{r_2}.$$

$$C_1 = (t_x - t_k) \exp(-r_1) / (1 - (r_1/r_2)); \quad (9)$$

$$C_2 = -C_1 \exp(r_1 - r_2) (r_1/r_2).$$

Представим алгоритм расчета двухтрубного теплообменника с продольной теплопроводностью.

Первый блок формул повторяет типовой расчет двухтрубного теплообменника, то есть когда газ в центральной трубе движется в режиме идеального вытеснения  $\lambda_\ell \rightarrow 0$ ,  $Pe \rightarrow \infty$ : определяются основные технологические параметры, в том числе входящие в параметр  $q$  (кроме  $Pe$ ) и прежде всего среднее время пребывания  $\tau_0$ .

Второй блок расчетов. Для заданного числа  $Pe$  и  $\tau > \tau_0$ , например,  $\tau = 1,01 \tau_0$ , определяются характеристические корни  $r_1$  и  $r_2$  по формуле (8) и постоянные интегрирования  $C_1$  и  $C_2$  по формулам системы (9), а по формуле (7) находятся  $t_0$ ,  $g_0$  и расчетные значения

$$t_{gn} = t_0 - \frac{1}{Pe} g_0,$$

которые сравниваются с  $t_g$ . Если относительное отклонение по абсолютной величине

$$\delta = \left| \frac{t_{gn} - t_g}{t_g} \right| 100 \%, \quad (10)$$

больше, например 1 %, то увеличивают на следующих итерациях  $\tau$  до выполнения условия (10). Далее определяется длина теплообменника  $\ell_r = \tau v_g$ .

В таблице 1 приведены исходные и справочные данные для расчета двухтрубного теплообменника, в котором в межтрубном пространстве кипит уксусная кислота, а в центральной трубе движется дымовой газ в режиме продольной теплопроводности [8].

Для сравнения в таблице 2 приведены результаты расчетов технологических и геометрических параметров теплообменника при  $Pe = 7,2$  и этого же теплообменника при  $Pe \rightarrow \infty$  ( $\lambda_\ell \rightarrow 0$ ), то есть рассчитанного по типовому алгоритму идеального вытеснения и при  $Pe \rightarrow 0$  ( $\lambda_\ell \rightarrow \infty$ ), когда газ в центральной трубе идеально перемешивается и  $t_0 = t_x$ ,  $g_0 \rightarrow 0$ .

## Исходные и справочные данные

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Производительность по уксусной кислоте	кг/ч	$G_k$	20
Температура кипения уксусной кислоты при рабочем давлении	°С	$t_k$	118,1
Рабочее давление	атм.	$p_a$	1,033
Поверхностное натяжение на границе жидкость–пар для уксусной кислоты	Н/м	$\sigma_k$	0,0168
Коэффициент кипения уксусной кислоты	–	$\varphi_k$	0,78
Плотность уксусной кислоты при температуре кипения	кг/м <sup>3</sup>	$\rho_k$	940
Удельная теплота парообразования для уксусной кислоты	Дж/кг	$r_k$	406000
Вязкость кипящей уксусной кислоты	Па·с	$\mu_k$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
Молекулярная масса уксусной кислоты	кг/кмоль	$M_k$	60
Теплопроводность кипящей уксусной кислоты	Вт/(м·К)	$\lambda_k$	0,32
Теплоемкость уксусной кислоты	Дж/(кг·К)	$c_k$	2524
Температура дымовых газов начальная	°С	$t_g$	260
Температура дымовых газов на выходе	°С	$t_x$	180
Теплоемкость дымовых газов	Дж/(кг·К)	$c_g$	1030
Молекулярная масса дымовых газов	кг/кмоль	$M_g$	30,6
Теплопроводность дымовых газов	Вт/(м·К)	$\lambda_g$	0,017
Вязкость дымовых газов при 0 °С	Па·с	$\mu_0$	$2,4 \cdot 10^{-5}$
Температурный коэффициент вязкости дымовых газов	К <sup>-1</sup>	$a$	0,052
Коэффициент объемного расширения дымовых газов	К <sup>-1</sup>	$b$	0,036
Внутренний диаметр внутренней трубы	м	$d$	0,1
Толщина стенки внутренней трубы	м	$\delta$	0,004
Термическое сопротивление стенки трубы	(Вт/(м <sup>2</sup> ·К)) <sup>-1</sup>	$r_s$	0,0004
Теплопроводность стенки трубы	Вт/(м·К)	$\lambda_w$	46,2
Длина стандартной трубы	м	$L$	9
Площадь сечения трубного пространства для газа	м <sup>2</sup>	$S$	0,00785

Таблица 2

## Основные расчетные параметры двухтрубного теплообменника

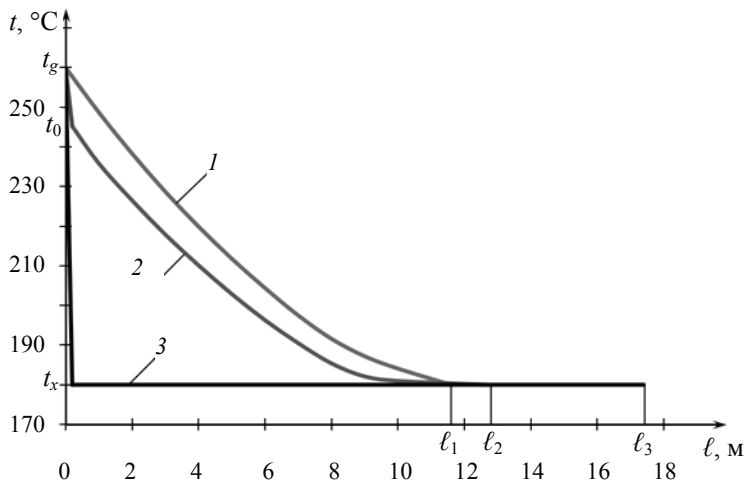
Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина		
			и. в. *	Re = 7,2	и. с. *
1	2	3	4	5	6
Наружный диаметр внутренней трубы	м	$d_{out}$	0,108	0,108	0,108
Расход дымовых газов	кг/ч	$G$	98,54	98,54	98,54
Средняя движущая сила	°С	$\Delta t_c$	96,4	96,4	61,9
Средняя температура дымовых газов	°С	$t_c$	214,5	214,5	180
Вязкость дымовых газов при средней температуре	Па·с	$\mu_g$	$7,32 \cdot 10^{-5}$	$7,32 \cdot 10^{-5}$	$6,12 \cdot 10^{-5}$
Плотность дымовых газов при средней температуре	кг/м <sup>3</sup>	$\rho_g$	0,765	0,765	0,823
Плотность конденсата уксусной кислоты при средней температуре	кг/м <sup>3</sup>	$\rho_k$	0,476	0,476	0,476
Поправочный коэффициент в уравнении теплоотдачи для кипящей уксусной кислоты	–	$b_k$	0,0796	0,0796	0,0796
Скорость газа в центральной трубе	м/с	$v_g$	4,56	4,24	4,24
Число Рейнольдса для газа	–	$Re_g$	4762	4762	5698
Число Прандтля для газа	–	$Pr_g$	4,44	4,44	3,71
Температура газа на внутренней поверхности центральной трубы	°С	$t_{ww}$	121,12	121,12	120,74
Температура газа на наружной поверхности со стороны кипящей уксусной кислоты	°С	$t_{wn}$	121,07	121,7	120,70
Коэффициент теплоотдачи для газа	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_g$	6,36	6,36	6,66
Коэффициент теплоотдачи для кипящей уксусной кислоты	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$\alpha_k$	199,2	199,2	152,44
Средняя удельная тепловая мощность	Вт/м <sup>2</sup>	$q_c$	593,9	593,9	396,2
Коэффициент теплопередачи	Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	$K_t$	6,16	6,16	6,4
Поверхность теплопередачи	м <sup>2</sup>	$f_b$	3,8	4,2	5,69

1	2	3	4	5	6
Общая длина двухтрубного теплообменника	м	$\ell_r$	11,63	12,85	17,43
Число Нуссельта	–	Nu	37,41	37,41	39,21
Среднее время пребывания газа во внутренней трубе	с	$\tau$	2,55	2,81	4,11
Температура газа на входе	°C	$t_0$	260	245,2	180
Коэффициенты расчетного уравнения (7):	–	$q$	–	6,6	–
	–	$r_1$	–	8,02	–
	–	$r_2$	–	–8,23	–
	°C	$C_1$	–	$1,89 \cdot 10^{-3}$	–
	°C	$C_2$	–	127,81	–

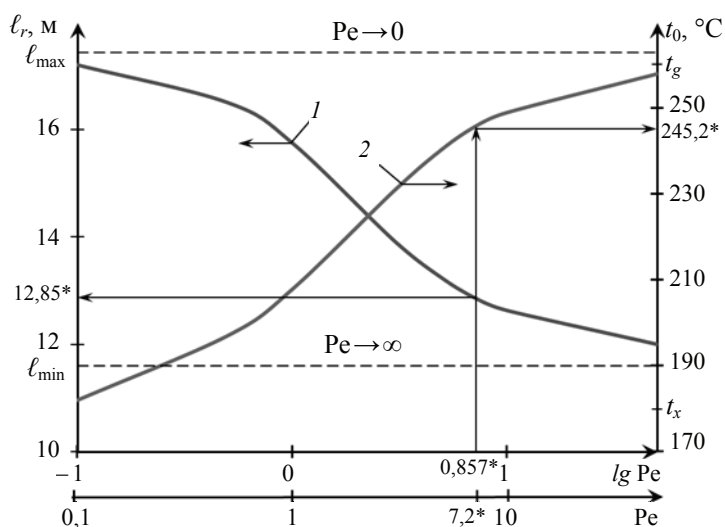
\* и. в. – идеальный вытеснитель; и. с. – идеальный смеситель

Из результатов расчетов очевидно, что теплообменник с продольным перемешиванием газа занимает по поверхности теплоотдачи и длине промежуточное положение между этими параметрами типового теплообменника идеального смешения, причем его длина и поверхность теплопередачи на 10,5 % больше, чем при расчете по типовому алгоритму для идеального вытеснения.

На рисунке 2 приведены профили температур газа по длине всех вышеназванных трех теплообменников. На рисунке 3 показаны графики зависимости длины и температуры газа на входе в зависимости от числа Пекле  $Pe$ . Из графиков при  $Pe > 7$  видно, что отличие не превышает 10 % и расчеты можно вести по типовому алгоритму теплообменника идеального вытеснения. При  $Pe < 7$ , структура потока приближается к идеальному смешению и неучет продольной теплопро-



**Рис. 2. Профили температур нагреваемого воздуха по длине двухтрубного теплообменника:**  
 1 – идеальный вытеснитель,  $Pe \rightarrow \infty$ ; 2 – с учетом продольной теплопроводности,  $Pe = 7,2$ ; 3 – идеальный смеситель,  $Pe \rightarrow 0$



**Рис. 3. Зависимость длины (1) двухтрубного теплообменника и входной температуры газа (2) от числа Пекле:**

\* – параметры при  $Pe = 7,2$

водности может привести к значительным ошибкам в определении поверхности теплопередачи и длины двухтрубного теплообменника. Поэтому расчет необходимо вести по рассмотренному выше алгоритму.

#### Список литературы

1. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль ; под ред. М. Г. Слинько. – М. : Химия, 1969. – 624 с.
2. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М. : Химия, 1985. – 379 с.
3. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. – Волгоград : ВолгГТУ, 1994. – Ч. 1. – 114 с.
4. Бобылев, В. Н. Тепловой расчет подогревателя с учетом структуры потока теплоносителя / В. Н. Бобылев // Хим. пром-ть сегодня. – 2009. – № 7. – С. 45 – 50.
5. Туголуков, Е. Н. Моделирование теплопередачи в биметаллических аппаратах с каналами охлаждения в стенках / Е. Н. Туголуков, В. А. Богуш, А. Г. Ткачев // Вестн. Тамб. гос. ун-та. – 2003. – Т. 9, № 1. – С. 42 – 49.
6. Efficient Surfaces for Heat Exchangers Fundamentals and design / E. K. Kalinin, [et al.]. – New York; Wallingford : Begell House, 2002. – XIX. – 392 p.
7. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – 8-е изд. – М. : Наука, 1966. – 870 с.
8. Платэ, Н. А. Основы химии и технологии мономеров : учеб. пособие / Н. А. Платэ, Е. В. Сливинский. – М. : Наука ; МАИК Наука/Интерпериодика, 2002. – 696 с.
9. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. чл.-кор. АН России П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
10. Мищенко, К. П. Краткий справочник физико-химических величин / К. П. Мищенко, А. А. Равдель. – 7-е изд., испр. – Л. : Химия, 1974. – 200 с.



## Modeling of Double-Pipe Enclosed Heat Exchanger During Boiling of Liquid by Heating of Flue Gases

A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, S. B. Vorotneva<sup>1</sup>, N. A. Dulkina<sup>2</sup>

*Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia (1); All-Russian Research Institute of Aviation Materials, Volgograd, Russia (2); pahp@vstu.ru*

**Keywords:** analytical solution; double-pipe enclosed heat exchanger; limiting condition; longitudinal thermal conduction; Peclet number; perfect mixing; plug flow.

**Abstract:** The paper describes physical and mathematical models of double-pipe enclosed heat exchanger in which the liquid phase boils in tube space, and the flue gases are cooled in the central tube, moving in a mode of longitudinal thermal conductivity. A comparison of the process parameters and geometric dimensions with typical flow structures: plug flow and perfect mixing was carried out. The necessity of taking into account the longitudinal thermal conduction at Peclet number  $Pe < 7$  is shown.

### References

1. Levenshpil' O. *Inzhenernoje oformlenie khimicheskikh protsessov* [Engineering design of chemical processes], Moscow: Khimiya, 1969, 624 p. (In Russ.)
2. Kafarov V.V. *Metody kibernetiki v khimii i khimicheskoi tekhnologii* [Cybernetics methods in chemistry and chemical engineering], Moscow: Khimiya, 1985, 379 p. (In Russ.)
3. Golovanchikov A.B., Simonov B.V. *Primenenie EVM v khimicheskoi tekhnologii i ekologii : ucheb. posobie* [The use of computers in chemical engineering and ecology: studies. benefit], Volgograd : VolGTU, 1994, part 1, 114 p. (In Russ.)
4. Bobylev V.N. [Thermal design of the heater, taking into account the structure of the coolant flow], *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya* [Chemical Industry Today], 2009, no. 7, pp. 45-50. (In Russ.)
5. Tugolukov E.N., Bogush V.A., Tkachev A.G. [ Modeling of Heat Transfer in Bimetal Apparatuses with Canals of Cooling in Walls], *Transactions of Tambov State Technical University*, 2003, vol. 9, no. 1, pp. 42-49. (In Russ., abstract in Eng.)
6. Kalinin E.K., Dreitser G.A., Kopp I.Z., Myakotchin A. S. *Efficient Surfaces for Heat Exchangers Fundamentals and design*, New York; Wallingford: Begell house, 2002, XIX, 392 p.
7. Vygodskii M.Ya. *Spravochnik po vysshei matematike* [Directory of higher mathematics], Moscow: Nauka, 1966, 870 p. (In Russ.)
8. Plate N.A., Slivinskii E.V. *Osnovy khimii i tekhnologii monomerov : ucheb. posobie* [Fundamentals of chemistry and monomers technologies: Textbook. benefit], Moscow: Nauka, MAIK Nauka/Interperiodika, 2002, 696 p. (In Russ.)
9. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimiche-skoi tekhnologii: ucheb. posobie dlya vuzov* [Examples and problems at the rate of processes and devices of chemical engineering: a textbook for high schools], Moscow: Al'yans, 2013, 576 p. (In Russ.)
10. Mishchenko K.P., Ravdel' A.A. *Kratkii spravochnik fiziko-khimicheskikh velichin* [Quick Reference physico-chemical variables], Leningrad: Khimiya, 1974, 200 p. (In Russ.)

## **Modellierung der Arbeit des Zweirohrwärmeübertragers beim Kochen der von den Rauchgasen erwärmenden Flüssigkeit**

**Zusammenfassung:** Es sind die physikalischen und mathematischen Modelle des Wärmeübertragers als „das Rohr im Rohr“ dargelegt, in dem die flüssige Phase im Interrohrraum siedet, und die Rauchgase werden im zentralen Rohr gekühlt, sich im Regime der Längswärmeleitfähigkeit bewegend. Es ist der Vergleich der technologischen Parameter und der geometrischen Umfänge mit den typisierten Strukturen der Ströme durchgeführt: der idealen Verdrängung und der idealen Vermischung. Es ist die Notwendigkeit der Berücksichtigung der Längswärmeleitfähigkeit bei den Werten der Zahl Peclet  $Pe < 7$  gezeigt.

---

## **Modélage du fonctionnement de l'échangeur de chaleur à deux tubes lors de l'ébullition du liquide chauffé par les gaz de cheminée**

**Résumé:** Sont présentés les modèles physique et mathématique de l'échangeur de chaleur de type «pipe-in-pipe», dans lequel la phase liquide bouillonne dans le couvercle de l'espace, et les gaz sont refroidis dans le centre de la trompette, se déplaçant en mode longitudinal de la conductivité thermique. Est donnée la comparaison des paramètres technologiques et géométriques des taille avec les structures typiques de flux: exclusion idéale et confusion idéale. Est montrée la nécessité de tenir compte de la conductivité thermique longitudinale pour des valeurs du nombre de Peclet  $Pe < 7$ .

---

**Авторы:** *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Воротнева Светлана Борисовна* – аспирант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия; *Дулькина Наталия Александровна* – ученый секретарь научно-технического совета, ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов», г. Волгоград, Россия.

**Рецензент:** *Ваниев Марат Абдурахманович* – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Химия и технология переработки эластомеров», ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», г. Волгоград, Россия.