Николай Константинович Никулин — канд. техн. наук, доцент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 100 научных работ в области вакуумной техники.

N.K. Nikulin — Ph. D. (Eng.), assoc. professor of "Vacuum and Compressor Technology" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 100 publications in the field of vacuum technology.

Елена Владимировна Свичкарь — ассистент кафедры “Вакуумная и компрессорная техника” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор четырех научных работ в области вакуумной техники.

Ye.V. Svichkar — assistant of "Vacuum and Compressor Technology" department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 4 publications in the field of vacuum technology.

УДК 621.184.64; 536.24

М. И. Осипов, А. М. Пылаев

НЕСТАЦИОНАРНЫЕ ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР В МНОГОСЛОЙНОЙ ПЛАСТИНЕ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Представлено аналитическое решение задачи расчета нестационарных температурных полей в многослойной стенке теплообменного аппарата при условиях третьего рода на граничных поверхностях, первого или второго рода на торцах и при условиях склейки общего вида. Учтена зависимость режимных и теплофизических характеристик от времени и от координат. В решении применена модификация метода Бубнова–Галеркина. В роли базисных функций использованы комбинации полиномов по координатам и тригонометрических функций по времени, удовлетворяющие — с произвольными константами — всем краевым условиям. Приведены примеры расчета распределения температур для теплообменника с винтовой перегородкой и для лопаток высокотемпературных газовых турбин.

E-mail: osipov@power.bmstu.ru

Ключевые слова*: *нестационарная теплопроводность, многослойная пластина, модификация метода Бубнова–Галеркина, теплообменник, газовая турбина.

При создании высокоэффективных и надежных теплообменных аппаратов и систем охлаждения газотурбинных установок и теплообменных аппаратов различного назначения ставится задача численного и аналитического исследования внутреннего и нестационарного теплообмена в многослойных стенках корпусных деталей теплообменников и сопловых лопаток. В связи с этим рассмотрим задачу о нестационарных температурных полях $(T = T(t, x, y))$ в I-слойной пластине при условиях третьего рода

$$\alpha_g(T_g - T) = (-1)^g \lambda \partial t/\partial y;$$
$$y = y_{\max} = Y, \quad g = 2; \quad y = y_{\min} = 0, \quad g = 1, \tag{1}$$

на границах с нормальными координатами, а также при задании тепловых потоков q или температур T при следующих значениях продольных координат:

$$Q = Q_0, \quad x = x_{\min} = -X/2; \quad Q = Q_x,$$
$$x = x_{\max} = X/2; \quad Q \in \{q, T\}. \tag{2}$$

В условиях (1) α_g — коэффициенты теплоотдачи; T_g — температура среды. В процессе решения учитываем зависимости режимных и теплофизических характеристик от времени и координат.

При использовании программы для ЭВМ, реализующей численное решение задачи конечно-разностным методом, представляет интерес разработка модификации расчетного метода, не связанного с пошаговой (как по времени, так и по координатам) процедурой и, по-возможности, близкого к аналитическому. Такое решение, в частности, полезно для тестирования численных расчетов.

Основу математической постановки задачи составляет дифференциальное уравнение с кусочно-непрерывными функциями теплопроводности λ, объемных теплоемкостей c и тепловыделения W:

$$c\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\Big(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\Big) + \frac{\partial}{\partial y}\Big(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\Big) + W;$$
$$t > 0, \quad x \in (-X/2; X/2), \quad y \in (0; Y). \tag{3}$$

В связи с тем, что функция λ не дифференцируема на границах контакта (в точной постановке задачи), вместо уравнения (3) следует рассматривать систему из уравнений теплопроводности, записанных для каждого из слоев в отдельности, при общей односторонней параболической переменной времени [1] :

$$c_i\frac{\partial T_i}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x}\Big(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\Big)_i - \frac{\partial}{\partial y}\Big(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\Big)_i - W_i = 0;$$
$$t > 0, \quad x \in (-X/2; X/2), \quad y \in (y_{i1}; y_{i2}). \tag{4}$$

Однозначное решение задачи (1), (2) и (4) выполнено при дополнительном учете начального распределения температуры:

$$T_i = T_{i\text{н}}(x, y); \quad t = 0, \quad x \in [-X/2; X/2], \quad y \in [y_{i1}; y_{i2}], \tag{5}$$

а также при учете для I слоев пластины условий склейки типа

$$\lambda_i\frac{\partial T_{i2}}{\partial y} = \lambda_{i+1}\frac{\partial T_{i+1,1}}{\partial y} + P_i;$$
$$t > 0, \quad T_{i2} = T_{i+1,1} + Q_i; \quad i \in \{1 \ldots I-1\}. \tag{6}$$

Слагаемые в уравнении (6), формально соответствующие неидеальности теплового контакта (при $Q_i \neq 0$) и поверхностному, контактному тепловыделению (при $P_i \neq 0$), включены в целях использования соответствующей программы для ЭВМ при итерационном решении нелинейных задач.

Публикаций по решению рассматриваемой задачи в полной постановке не найдено. Известны лишь результаты анализа для задач в существенно упрощенной постановке, а также общие рекомендации, в частности, по применению обязательно точных методов математической физики для выявления зависимости решения от времени. Применение же, при необходимости, приближенных подходов допустимо лишь по эллиптическим координатам [1]. Судя по публикациям (например, [2]), весьма эффективным представляется метод Бубнова–Галеркина. Применительно к задаче класса (1), (2), (4)–(6) построение решения рекомендовано в виде линейной суперпозиции некоторых функций, называемых базисными и удовлетворяющих граничным условиям. При этом указывается, что коэффициенты разложения следует определять из условий минимизации ортогональной проекции невязки по всей области решения, и подчеркивается, что успех в применении метода определяется выбором структуры и числа базисных функций, входящих в разложение. Но для рассматриваемой задачи конкретных указаний нет.

В нестационарных задачах эти коэффициенты в общем случае представляются функциями времени; поэтому их определению соответствует система линейных дифференциальных уравнений изменения времени. Следует отметить, что в стационарных задачах эти коэффициенты принимаются постоянными и выявляются на основе решений линейных алгебраических систем уравнений, что намного проще. В связи с этим эффективен аналитико-численный подход [1], включающий в себя интегральное преобразование Лапласа, процедуру минимизации невязки для изображения и, наконец, переход к оригиналу. Для определения коэффициентов в разложениях для изображений в данном случае также логично использовать линейные алгебраические уравнения, что и является основным преимуществом названного подхода. К сожалению, в случаях с зависимостью от времени хотя бы немногих параметров (α_g, λ_i, c_i) применимость преобразования Лапласа практически исключена.

Сведение трудностей задачи к рассмотрению линейных алгебраических уравнений и без преобразования Лапласа допустимо при использовании в роли совокупности базисных функций систем из произведений тригонометрических функций от времени t и координат. Такой подход, ранее использованный при решении стационарных задач [3, 4], формально применим и при использовании времени в роли аргумента.

Но при этом всегда получаются принципиально бесконечные системы линейных алгебраических уравнений и необходимо обоснование возможности редукции конкретных систем [5], что для рассматриваемой задачи представляется проблематичным.

В настоящей работе опробована модификация метода Бубнова–Галеркина, позволившая ограничиться рассмотрением только систем линейных алгебраических уравнений, применительно к процессам с ограниченной протяженностью во времени $t \in [0; t_{\max} = \tau]$. В основном варианте анализа зависимости $W = \{W_i\}$, $T_{\text{н}} = \{T_{\text{н}i}\}$, $Q_0 = \{Q_{0i}\}$, $Q_x = \{Q_{xi}\}$ считаются кусочно-линейными по нормали к стенке (по y), т.е. линейными по толщине любого слоя. При необходимости учета более сложной зависимости функций от поперечной координаты для каких-либо из физически однородных слоев возможно разбиение каждого из них, например, на j подслоев с заданием соответствующих подсовокупностей из j линейных функций. Для характеристики зависимостей температуры $T_{\text{н}}$ от продольной координаты x, тепловых потоков Q_0 и Q_x от времени t, $\{\alpha_g$, T_g, λ_i, c_i, W_i, Q_i, $P_i\}$, а также искомого решения от x и t, предусмотрено использование полиномных по x и тригонометрических по времени t аппроксимаций. Отметим, что применение тригонометрических рядов по времени (при достаточно большом числе слагаемых с заранее неизвестными коэффициентами) в составе каждой из базисных функций обеспечивает принципиально точное решение. Число слагаемых в разложениях для искомых решений ограничено лишь возможностями вычислительных средств, которые позволяют использовать и большое число необходимых уравнений.

Решение T_i, $i = 1 \ldots I$ строится в виде суммы трех групп функций:

$$T_i = F_i + \sum_{v=1,2} \sum_{n,m}^{N,M} G_{vnm} C_{vnm} + \sum_p H_{ip} E_p; \ \ i = 1 \ldots I, \ \ N+M \Leftarrow S, \quad (7)$$

где H_p; $p \in \{1t, 0, X\}$ — функции, последовательно (при $t = 0$, $x = -X/2$; $x = X/2$) удовлетворяющие заданным условиям на границах пространственно-временной области решения; E_p — функции, единичные на соответствующих границах и быстро убывающие до нуля в их окрестностях, например $E_p = \exp(-C_p p)$, $C_p \gg 1$; F_i — функции, удовлетворяющие условиям (1) и (6) и однородным условиям при $t = 0$, $x = -X/2$; $x = X/2$ G_{vnm} — функции, удовлетворяющие всем однородным условиям, сответствующим (1), (2), (5), (6). Авторами настоящей работы использована возможность построения функции F_i в форме разложений по продольной координате и времени с кусочно-линейными коэффициентами, а именно

$$F_i = A_i + B_i \cdot y_i, \ \ i = 1, \ldots, I; \ \ A_1 = T_1 + \lambda_1 B_1/\alpha_1, \quad (8)$$

$$B_1 = (T_2 - A_1 + \sum_{l=1}^{I} P_l/\alpha_2 +$$

$$+ \sum_{k=1}^{I-1} (\delta_{k+1} \sum_{l=1}^{k} P_l/\lambda_{k+1} + Q_k))/(\lambda_1 R); \quad R = \sum_{j=1}^{2} \alpha_j^{-1} + \sum_{k=1}^{I} \delta_k/\lambda_k, \quad (9)$$

$$\delta_{k=} y_{k2} - y_{k2}; \quad A_{i+1} = A_i + (B_i - B_{i+1}) y_{i2} - Q_i,$$

$$B_{i+1} = (\lambda_i B_i - P_i)/\lambda_{i+1}, \quad i = 1, \ldots, I-1.$$

Для базисных функций G_{vnm} целесообразно применение структуры следующего вида:

$$G_{vnm} = \Phi(y)(\sin m_t + D_{vnm} \cos m_t (1 - E_{vt}))\Psi_n(x);$$

$$m_t = 2mt\pi/\tau; \quad \Phi(y) = \{\Phi_i, \quad y \in [y_{i1}; y_{i2}], \quad i = 1, \ldots, I\}, \quad (10)$$

$$\Phi_i = A_i + B_i y - KJ(y); \quad J(y) = \int_0^y U(y) dy,$$

$$U(y) = y \prod_{k=1}^{I-1} (y - y_{k2}) dy, \quad (11)$$

$$K = R\lambda_1/(J(y_{I2}) + \lambda_1 U(y_{I2})/\alpha_2); \quad A_1 = \lambda_1/\alpha_1,$$

$$B_1 = 1, \quad B_{i+1} = \lambda_i/\lambda_{i+1}, \quad A_{i+1} = \sum_{j=1}^{i} B_j - B_{j+1}) y_{j2};$$

$$i = 1, \ldots, I-1; \quad n = 0, 1, \ldots, N, \quad m = 1, \ldots, M.$$

Обозначение R в (11) определено в разложении (9). Выражения (8)–(11) записаны для условий с $\alpha_j \neq 0$, $j \in \{1; 2\}$, в отличие от обычного подхода $\sum_{j=1}^{2} \alpha_j \neq 0$. Функция Ψ_n(x) в выражении (10) содержит x^n в комбинированном выражении, удовлетворяющем однородным условиям (2), и представляется в виде $\Psi_n = \int_0^x x^n (x^2 - X^2/4) dx$, $n = 1, 2, \ldots, N$; $\Psi_0 = 1$, в случае условий второго рода ($Q = q$ при $x \in \{-X/2; X/2\}$).

После подстановки в уравнение (4) формул (7) вместе с выражениями (8)–(11) и дифференцирования результата левые (равные нулю) части уравнений, полученных из системы (4), рассматривались как составляющие дифференциального оператора $D(t, x, y)$, кусочно-функционального по y, единого для всей области решения. Для конкретизации C_{vnm}, D_{vnm} в решении (7) использованы условия ортогональности $D(t,x,y)$ каждой из G_{vnm} по (10), а именно

$$\sum_{v=1,2}\int\limits_0^{\tau}\int\limits_{-X/2}^{X/2}\int\limits_0^{Y} D(t,x,y)G_{vnm}\,dt\,dx\,dy = 0,$$

$$n = 0,1,\ldots,N, \quad m = 1,\ldots,M, \quad k = 1,\ldots,K,$$

что позволило получить необходимую систему из $2(N+1)M$ линейных алгебраических уравнений.

В разработанной для ПЭВМ программе предусмотрена и оценка невязки, получаемой после подстановки решений (7) в уравнения (4); это обеспечивает возможность выбора почти оптимальных значений E_p, N, M.

В соответствии с этим программа использована при расчете нестационарных температурных полей для трех вариантов изолированной по торцам полосы неограниченной протяженности: двухслойной в первом (рис. 1), во втором (рис. 2) вариантах и трехслойной в третьем варианте (рис. 3). Ширина полосы $L = 2$ м (для первого варианта) и $L = 0{,}06$ м (для второго). Материалы граничных слоев — ТЗП (теплопроводность $\lambda_1 = 2$ Вт/(м·K), объемная теплоемкость $c_1 = 390$ Дж/(м^3·K)) и сталь ($\lambda_{\text{м}} = 30$ Вт/(м·K), $c_{\text{м}} = 3900$ Дж/(м^3·K)) [6, 7]. Толщины слоев δ_1, $\delta_{\text{м}}$ (мм) равны 0,2; 8 — в первом, 0,1; 2 — во втором, 0,05; 2 — в третьем вариантах расчета.

В третьем варианте расчета учитывается промежуточный слой теплозащитного покрытия ($\lambda_2 = 4$ Вт/(м·K)) толщиной $\delta_2 = 0{,}05$ мм. Тепловой поток, направленный к многослойной стенке, определяется значениями коэффициентов теплоотдачи ($\alpha_{\text{г}}$, Вт/(м^2·K)) температуры греющей среды ($T_{\text{г}}$, °C) и внешним теплообменом с воздухом ($\alpha_{\text{в}}$, Вт/(м^2·K); $T_{\text{в}}$, °C). Начальные температуры и продолжительности процесса составляют $T_{\text{н}} = 15\,°$C, $t_{\max} = 60$ с — в первом варианте, $T_{\text{н}} = 500\,°$C, $t_{\max} = 0{,}5$ с — во втором и третьем вариантах. В первом варианте заданы следующие условия: $\alpha_{\text{г}} = 140$ Вт/(м^2·K), $\alpha_{\text{в}} = 15$ Вт/(м^2·K) при $p = 6$ атм; $T_{\text{г}} = (59+62X)\,°$C; $T_{\text{в}} = (27-6X)\,°$C.

В случаях нагрева стенки до более высоких температур газа и коэффициентах теплоотдачи $\alpha_{\text{в}} = 2000$ Вт/(м^2·K), $T_{\text{г}} = 1400\,°$C характер изменения $\alpha_{\text{г}}$ и $T_{\text{в}}$ по длине стенки представлен участками парабол при $\alpha_{\text{г},\max} = 5000$ Вт/(м^2·K), $\alpha_{\text{г},\min} = 2000$ Вт/(м^2·K) и при $T_{\text{в},\max} = 700\,°$C, $T_{\text{в},\min} = 500\,°$C) соответственно. На рис. 1 и 3 кривая A представляет собой значения $\alpha_{\text{г}}$, Вт/(м^2·K), уменьшенные в 10 раз.

Результаты, показанные на рис. 1–3, соответствуют двум случаям распределения температуры; зависимости (1)–(4) и (5) получены при значениях $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{г}}$, указанных ранее и уменьшенных в 10 раз. Обозначения *Г,В,1,2,3,4* на всех рисунках соответствуют распределению температур газа, воздуха, наружной поверхности ближнего к металлу слоя

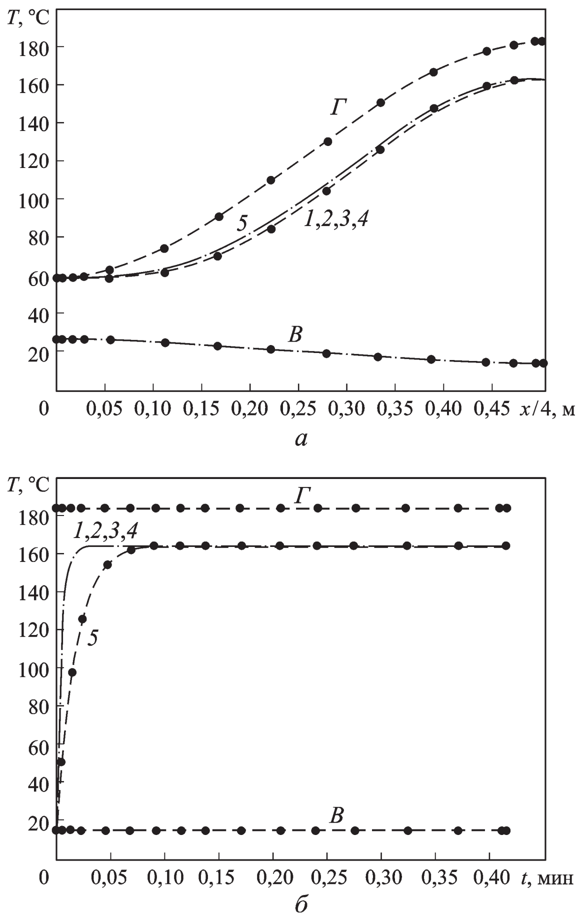

Рис. 1. Тепловое взаимодействие двухслойной полосы с газом ($T_г \in [59; 183]°C$) со стороны ТЗП и с воздухом $T_в \in ([27; 15])$ в течение $t_{max} = 60$ с:
а — для момента времени $t = t_{max}/2 = 30$ с представлены кривые зависимости от координаты x для температур газа (*Г*), воздуха (*В*), а также в сечениях полосы — при заданных $\alpha_в$, $\alpha_г$ (слияние кривых *1…4*) и $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$ (кривая *5*); *б* — зависимости от времени t температур газа, воздуха, а также температур в сечениях полосы при $x = L = 2$ м и заданных $\alpha_в$, $\alpha_г$ (слияние кривых *1…4*, а также при $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$ (кривая *5*)

ТЗП, температур металла в верхнем (к газу), среднем и нижнем сечениях соответственно; обозначение *5* дано для практически слившихся (при избранном масштабе изображения) температурных кривых полосы в вариантах с уменьшенными $\alpha_в$, $\alpha_г$. На рис. 1, *а*; 2, *а*; 3, *а* показаны изменения температуры для момента времени $t = t_{max}/2$ в зависимости от координаты x; на рис. 1, *б*; 2, *б*; 3, *б* — изменения температуры при $x = L$ в зависимости от времени t. Приведенные на рис. 1 значения $T_г$, $T_в$ скорректированы с целью исключить теплообмен при $x = 0$ и $x = X = L$. На рис. 1, *а, б* масштабы размеров и времени составляют 4 м и 120 с; результаты, представленные на этих же рисунках, соответствуют внутреннему охлаждению сопловой лопатки газовой

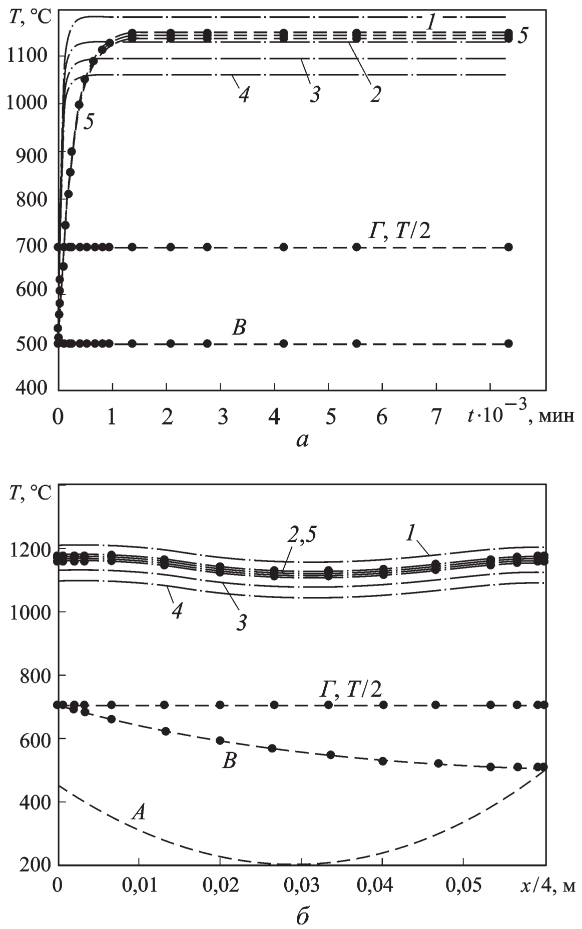

Рис. 2. Взаимодействие двухслойной полосы с газом ($\alpha_г = 4500\ldots$ $\ldots 2000$ и $2000\ldots 5000$ Вт/(м$^2\cdot$ К), $T_г = 1400\,^\circ$C) со стороны ТЗП и с воздухом ($\alpha_в \in 2000$, $T_в = 700\ldots 500\,^\circ$C в течение $t_{\max} = 0{,}5$ с; свойства ТЗП и стали — см. рис. 1:

а — зависимости от координаты x для $\alpha_г/10$ (кривая A), а также (в момент времени $t = t_{\max}/2 = 0{,}25$ с) для температур воздуха (B), наружной поверхности слоя ТЗП (*1*), температур металла в верхнем (к газу, *2*), среднем (*3*) и нижнем (*4*) сечениях и для практически совпавших (при избранном масштабе изображения) температур при $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$ — кривые *5*; *б* — зависимости от времени t температур газа, воздуха, наружной поверхности слоя ТЗП (*1*), металла в верхнем (к газу, *2*), среднем (*3*) и нижнем (*4*) сечениях при $x = L = 0{,}06$ м и заданных $\alpha_в$, $\alpha_г$, а также для практически совпавших (при избранном масштабе T, 5 при $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$

турбины при вдуве через выходную кромку [8]. Остальные результаты получены применительно к воздухоохладителю, т.е. теплообменнику с винтовой разделительной перегородкой [7]. В рассмотренных случаях распределение температуры пластины очень слабо изменяется по толщине и резко возрастает со временем, пропорционально функции $(1 - \exp((\alpha_г + \alpha_в)tF/C))$, где C и F — теплоемкость стенки и односторонняя поверхность теплообмена. Быстро устанавливается квазистационарный режим практически с выполнением зависимости

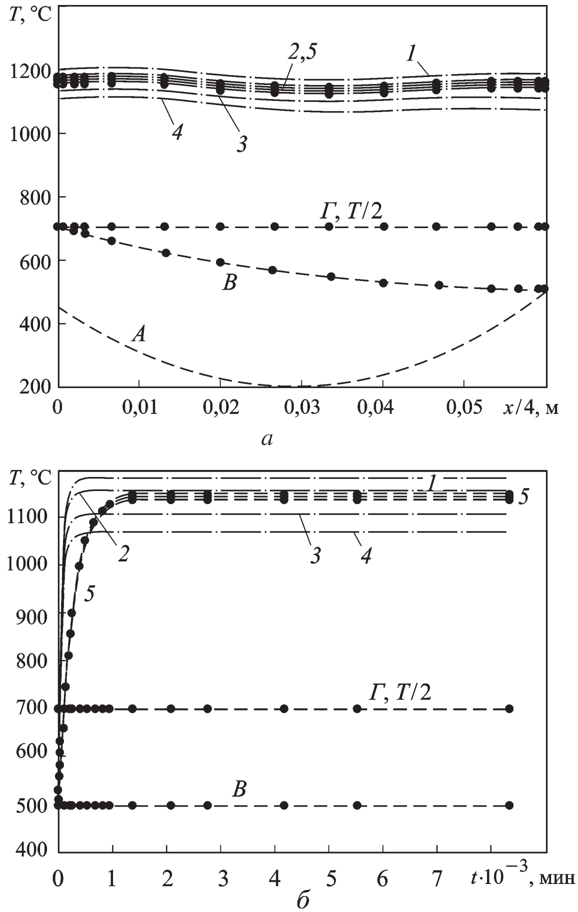

Рис. 3. Тепловое взаимодействие трехслойной полосы с газом со стороны ТЗП и воздухом в течение $t_{\mathbf{max}} = 0{,}5$ с (свойства ТЗП (с δ_1) и стали — см. рис. 1):
а — зависимости от координаты x для $\alpha_г/10$ (кривая *А*), а также (в момент времени $t = t_{\max}/2 = 0{,}25$ с) для температур воздуха (*В*), наружной поверхности слоя ТЗП (*1*), температур металла в верхнем (к газу, *2*), среднем (*3*) и нижнем (*4*) сечениях и для практически совпавших (при избранном масштабе изображения) температур при $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$ (кривые *5*); *б* — зависимости от времени t температур газа, воздуха, наружной поверхности слоя ТЗП (*1*), температур металла в верхнем (к газу, *2*), среднем (*3*) и нижнем (*4*) сечениях — при $x = L = 0{,}06$ м и заданных $\alpha_в$, $\alpha_г$, а также для практически совпавших (при избранном масштабе изображения) температур при $\alpha_в/10$, $\alpha_г/10$ (кривые *5*)

$(T_г - T)/(T - T_в) \approx \alpha_в(1/\alpha_г + \delta_1/\lambda_1)$. На рис. 2, *а* и 3, *а* локальный минимум температур в средних по x сечениях по длине стенки объясняется повышением $\alpha_г$ и $T_г$ к сечениям с $x = X$ и $x = 0$ соответственно.

Проведенное сопоставление результатов эксперимента [8, 9] и численного расчета выявило их хорошее согласование, что подтвердило надежность и эффективность обеих использованных программ.

Работа проведена при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-08-00718 а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ц о й П. В. Системные методы расчета краевых задач тепломассопереноса. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
2. Б е л я е в Н. М., Р я д н о А. А. Методы нестационарной теплопроводности. – М.: Высш. шк., 1978. – 328 с.
3. П ы л а е в А. М., П е т р а ж и ц к и й Г. Б. Осесимметричная стационарная задача теплопроводности для системы из двух соприкасающихся по торцам цилиндров // МТТ АН СССР. – 1972. – № 6.
4. П ы л а е в А. М. Задача о критических конвективных движениях в горизонтально-цилиндрических полостях // Изв. РАН, МЖГ. – 2005. – № 3.
5. К а н т о р о в и ч Л. В., К р ы л о в В. И. Приближенные методы высшего анализа. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1950. – 696 с.
6. О с и п о в М. И., П ы л а е в А. М., Л и м а ч е в Д. Г. Теоретическое исследование течения и теплообмена в оребренных каналах и нестационарных полей температур в многослойной стенке с переменными характеристиками // Тепломассообмен. – ММФ-УІ; Т. 2. – С. 277–279; Минск, 2008.
7. О с и п о в М. И., О л е с е в и ч К. А., О л е с е в и ч А. К. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик кожухотрубного теплообменного аппарата с винтовой перегородкой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. “Машиностроение”. – 2007. – № 2. – С. 89–96.
8. О с и п о в М. И., П ы л а е в А. М. Моделирование нестационарных полей температур в многослойной стенке с переменными характеристиками // Тез. докл. XIII Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели. – М.: СПРИНТ, 2008.
9. О л е с е в и ч К. А., О с и п о в М. И., О л е с е в и ч А. К. Теплообменные аппараты с винтовой перегородкой для применения в составе ГТУ и системах теплоснабжения // Тез. докл. XIII Всеросс. межвуз. науч.-техн. конф. Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели. – М.: СПРИНТ, 2008.

Статья поступила в редакцию 8.09.2009

Михаил Иванович Осипов родился в 1938 г., окончил в 1963 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Д-р техн. наук, заведующий кафедрой “Газотурбинные и нетрадиционные источники энергии”, заслуженный работник высшей школы РФ, профессор, президент Восточно-Европейского регионального отделения Международной энергетической ассоциации. Автор более 265 научных работ в области газотурбинных и комбинированных энергоустановок и двигателей, систем охлаждения и тепловой защиты, газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках.

M.I. Osipov (b. 1938) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1963. Professor, head of "Gas-turbine and Non-traditional Energy Sources" department of the Bauman Moscow State Technical University. Honored Worker of Higher School of the Russian Federation, President of the East-European Regional Department of the International Energetic Association. Specializes in the field of gas-turbine and combined power units and engines, systems of cooling and thermal protection, gas-dynamics and heat and mass transfer in power units. Author of more than 265 publications.

Анатолий Михайлович Пылаев родился в 1936 г., окончил в 1960 г. Московский энергетический институт и в 1965 г. МГУ им. М.В. Ломоносова. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Теплофизика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 96 научных работ в области теории тепло-массообмена, термодинамики, механики жидкости и газа.

A.M. Pylaev (b. 1936), graduated from the Moscow Energy Institute in 1960 and the Lomonosov Moscow State University in 1965. Author and co-author of more than 96 publications in the field of heat and mass transfer, thermodynamics, mechanics of liquid and gas.