

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ПРОГРЕВА СТенок ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

В.Ю. Александров¹

А.П. Королёва^{1,2}

Н.В. Кукшинов^{1,2}

Д.Б. Сафонова¹

М.С. Французов^{1,2}

aleksandrov@rtc.ciam.ru

akoroleva@ciam.ru

kukshinov@ciam.ru

safonova@ciam.ru

mfrancuzov@yandex.ru

¹ Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова,
Москва, Российская Федерация

² МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Предложена математическая модель нестационарного теплообмена в проточном тракте теплообменного аппарата, предназначенного для снижения температуры выхлопных газов экспериментального стенда для огневых испытаний авиационных двигателей. Найдено аналитическое решение в квадратурах системы уравнений в частных производных, отражающих модель сопряженной нестационарной задачи нагрева элементов стендового теплообменного аппарата и охлаждения выхлопных газов

Ключевые слова

*Нестационарный теплообмен,
теплообменный аппарат,
математическая модель*

Поступила в редакцию 29.03.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. При огневых испытаниях реактивных двигателей на экспериментальных стендах необходимо существенно снижать температуру выхлопных газов, особенно при использовании эксгаустерных агрегатов для создания высотных условий. Для охлаждения выхлопных газов применяют теплообменные аппараты (ТА) — холодильники (рис. 1). Этап исследовательских испытаний при разработке перспективных двигателей содержит большой объем кратковременных (3...10 с) запусков. В этом случае ТА работает исключительно на нестационарном тепловом режиме. Кроме того, нестационарный режим работы ТА позволяет существенно форсировать режимы работы стенда при кратковременных испытаниях за счет использования аккумулятивного хладоресурса. Это приводит к необходимости разработки математической модели нестационарного режима работы ТА в условиях сопряженного теплообмена в целях оценки характерных значений и распределения температур элементов ТА и газового потока в зависимости от времени.

Учитывая сложность и большое перекрытие площади проходного сечения проточного тракта ТА охлаждающими элементами, построение расчетной сетки и применение численного моделирования с использованием математических моделей высокого уровня требуют больших затрат времени и вычислительных



Рис. 1. Теплообменный аппарат высотного гиперзвукового стенда ЦИАМ

ресурсов. Поэтому актуально создание упрощенных математических моделей, позволяющих решать задачи сопряженного нестационарного теплообмена в элементах ТА. Такие упрощенные математические модели могут применяться и при разработке ТА для экспресс-анализа эффективности тех или иных конструктивно-технических решений.

В [1] указано, что термин «сопряженные» для задач теплообмена впервые введен А.В. Лыковым [2] при исследовании взаимодействия инертного газового потока с инертным твердым телом. До него проблема тепло- и массообмена тела с потоком газа изучалась в так называемой раздельной постановке, в рамках которой отдельно исследовались процессы переноса в твердом теле [3, 4] и потоке газа [5, 6]. При постановке сопряженной задачи учитывается взаимное тепловое влияние твердого тела и жидкости (газа), которое при прежней постановке не учитывалось, что противоречит физическому смыслу задач [2]. Важно рассматривать задачи теплообмена как сопряженные в случае нестационарных явлений.

Решение сопряженных задач теплообмена связано с серьезными математическими трудностями [2]. Поэтому наиболее рациональным подходом к решению сопряженных задач является создание математических моделей с использованием линеаризации и постоянства ряда параметров [7]. В [8] в аналитической форме получено приближенное решение задачи в нелинейной постановке, когда теплофизические свойства материалов тепловыделяющего элемента зависят от температуры. Однако даже для простейших геометрических форм тела приходится использовать ряды по бесконечным системам функций.

В настоящей работе задача нестационарного сопряженного теплообмена решена в упрощенной постановке в виде конечных интегралов.

Постановка задачи. Рассмотрим нестационарный процесс теплообмена между элементами ТА (стенками проточного тракта и поперечно расположенными трубками) и горячими газообразными продуктами сгорания, протекающими по проточному тракту ТА. Расчетная схема ТА приведена на рис. 2.

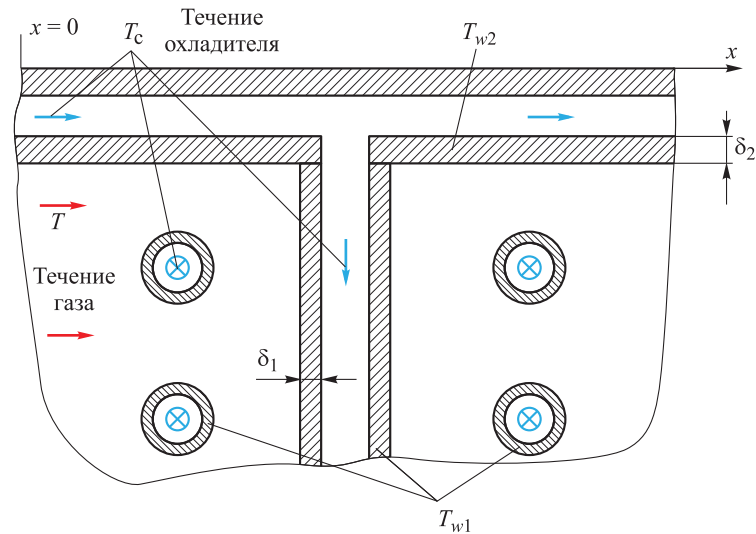


Рис. 2. Расчетная схема ТА

В проточный тракт ТА, элементы конструкции которого в некоторый начальный момент времени имеют температуру $T_w = T_c$ (т. е. температура стенок ТА в начальный момент времени равна температуре охладителя), начинает поступать горячий газ с массовым расходом G и температурой T_0 . Газ, проходя между элементами ТА, омывает их и отдает часть своей теплоты элементам, которые нагреваются. При этом газ, соответственно, охлаждается. Течение газа дозвуковое.

Рассмотрим приближение тонкой стенки, т. е. градиента температуры поперек стенок нет, при этом тепловым потоком в продольном направлении стенок пренебрегаем. Аналогичный подход, хотя явно и не оговаривается, но используется в [7].

Математическая модель процесса. Обозначим температуру газа в сечении x в момент времени t через $T(x, t)$, температуру стенок внутренних трубок ТА как $T_{w1}(x, t)$, температуру внутренней стенки проточного тракта ТА — $T_{w2}(x, t)$. Толщину стенок внутренних трубок ТА обозначим δ_1 , а толщину внутренней стенки проточного тракта ТА — δ_2 . Температуру хладагента (воды) будем считать постоянной $T_c = \text{const}$. Внешние стенки ТА принимаются теплоизолированными.

Граничное условие для температуры газа и начальное условие для температур стенок ТА запишем так:

$$\begin{aligned} T(0, t) &= T_0; \\ T_{w1}(x, 0) &= T_c; \\ T_{w2}(x, 0) &= T_c. \end{aligned} \quad (1)$$

Нестационарный процесс распределения температуры газа в проточном тракте ТА описывается следующим уравнением [7]:

$$G c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} dt + \frac{\partial T}{\partial x} dx \right) = -\alpha_1 S_1 (T - T_{w1}) dx - \alpha_2 S_2 (T - T_{w2}) dx, \quad (2)$$

где G — массовый расход газа; c_p — изобарная теплоемкость газа; α_1 — коэффициент теплоотдачи от газа к внутренним трубкам ТА; α_2 — коэффициент теплоотдачи от газа к внутренней стенке проточного тракта ТА; $S_1 = L_{cp} \pi D_1$ — омываемая поверхность внутренних трубок ТА на единицу длины проточного тракта; L_{cp} — средняя длина внутренних трубок ТА; D_1 — внешний диаметр внутренних трубок ТА; $S_2 = \pi D_2$ — омываемая поверхность стенки проточного тракта ТА на единицу длины; D_2 — диаметр омываемой газом стенки ТА.

Разделив (2) на dt и выполнив незначительные преобразования, получим

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\alpha_1 S_1 u}{G c_p} (T - T_{w1}) - \frac{\alpha_2 S_2 u}{G c_p} (T - T_{w2}). \quad (3)$$

Уравнения для температуры элементов конструкции ТА следующие:

$$\begin{aligned} \rho_1 C_1 S_{D1} \frac{\partial T_{w1}}{\partial t} &= \alpha_1 S_1 (T - T_{w1}) - \alpha_{c1} S_{c1} (T_{w1} - T_c); \\ \rho_2 C_2 S_{D2} \frac{\partial T_{w2}}{\partial t} &= \alpha_2 S_2 (T - T_{w2}) - \alpha_{c2} S_{c2} (T_{w2} - T_c), \end{aligned} \quad (4)$$

где $S_{c1} \approx S_1$ — омываемая хладагентом (водой) внутренняя поверхность внутренних трубок ТА на единицу длины проточного тракта (здесь введено предположение о малости толщины стенки трубок по сравнению с диаметром); $S_{c2} \approx S_2$ — омываемая хладагентом (водой) поверхность стенки ТА на единицу длины проточного тракта; $S_{D1} \approx \pi D_1 \delta_1$ — площадь поперечного сечения стенки внутренней трубки ТА; $S_{D2} \approx \pi D_2 \delta_2$ — площадь поперечного сечения внутренней стенки проточного тракта ТА; ρ_1 и ρ_2 — плотности материалов внутренних трубок и стенки ТА; C_1 и C_2 — теплоемкости материалов внутренних трубок и стенки ТА; α_{c1} и α_{c2} — коэффициенты теплоотдачи от внутренних трубок и стенки ТА к хладагенту (воде).

В безразмерном виде уравнения (3) и (4) примут следующий вид:

$$\begin{aligned} \frac{1}{Sh} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{t}} + \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= -A_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w1}) - A_2 (\bar{T} - \bar{T}_{w2}); \\ \frac{\partial \bar{T}_{w1}}{\partial \bar{t}} &= B_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w1}) - B_2 \bar{T}_{w1}; \\ \frac{\partial \bar{T}_{w2}}{\partial \bar{t}} &= D_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w2}) - D_2 \bar{T}_{w2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Sh = \frac{u\tau}{L}$ — число Струхалия, и коэффициенты в уравнениях

$$A_1 = \frac{\alpha_1 S_1 L}{G c_p}; \quad A_2 = \frac{\alpha_2 S_2 L}{G c_p}; \quad (6)$$

$$B_1 = \frac{\alpha_1 S_1 \tau}{\rho_1 C_1 S_{D1} L_{cp}}; \quad B_2 = \frac{\alpha_{c1} S_{c1} \tau}{\rho_1 C_1 S_{D1} L_{cp}}; \quad (6)$$

$$D_1 = \frac{\alpha_1 S_1 \tau}{\rho_2 C_2 S_{D2}}; \quad D_2 = \frac{\alpha_{c2} S_{c2} \tau}{\rho_2 C_2 S_{D2}}.$$

Граничное и начальное (краевые) условия запишем так:

$$\begin{aligned} \bar{T}(0, \bar{t}) &= 1; \\ \bar{T}_{w1}(\bar{x}, 0) &= 0; \\ \bar{T}_{w2}(\bar{x}, 0) &= 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Для оценки членов системы уравнений (5) необходимы некоторые пояснения. Прогрев элементов ТА исчисляется секундами или десятками секунд. Скорости движения газа в проточном тракте ТА составляют порядка 100 м/с ($u \sim 100$ м/с). Длина ТА может составлять от нескольких до двадцати метров. В этом случае число Струхала будет иметь порядок $Sh = 10^2 - 10^3$. В этих условиях членом с частной производной по времени в (5) можно пренебречь. Тогда система (5) примет окончательный вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \bar{x}} &= -A_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w1}) - A_2 (\bar{T} - \bar{T}_{w2}); \\ \frac{\partial \bar{T}_{w1}}{\partial \bar{t}} &= B_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w1}) - B_2 \bar{T}_{w1}; \\ \frac{\partial \bar{T}_{w2}}{\partial \bar{t}} &= D_1 (\bar{T} - \bar{T}_{w2}) - D_2 \bar{T}_{w2} \end{aligned} \quad (8)$$

с краевыми условиями (7).

Система уравнений (8) может быть решена методом интегральных преобразований Лапласа. Функции $\bar{T}(\bar{x}, \bar{t})$, $\bar{T}_{w1}(\bar{x}, \bar{t})$ и $\bar{T}_{w2}(\bar{x}, \bar{t})$ являются обычными гладкими ограниченными интегрируемыми функциями и полностью удовлетворяют условиям применения интегрального преобразования Лапласа [9].

Применим интегральное преобразование Лапласа по переменной \bar{t} к системе (8). Учитывая граничные условия (7), получаем функции для решения исходной системы:

$$F(p, \bar{x}) = \frac{1}{p} e^{-(A_1 + A_2)\bar{x}} e^{\frac{A_1 B_1 \bar{x}}{p + B_1 + B_2}} e^{\frac{A_2 D_1 \bar{x}}{p + D_1 + D_2}};$$

$$W1(p, \bar{x}) = \frac{1}{p} \frac{B_1}{p + B_1 + B_2} e^{-(A_1 + A_2)\bar{x}} e^{\frac{A_1 B_1 \bar{x}}{p + B_1 + B_2}} e^{\frac{A_2 D_1 \bar{x}}{p + D_1 + D_2}};$$

$$W2(p, \bar{x}) = \frac{1}{p} \frac{D_1}{p + D_1 + D_2} e^{-(A_1 + A_2)\bar{x}} e^{\frac{A_1 B_1 \bar{x}}{p + B_1 + B_2}} e^{\frac{A_2 D_1 \bar{x}}{p + D_1 + D_2}}. \quad (9)$$

Решение (9) удовлетворяет условиям существования оригинала для изображения [9].

Используя правила нахождения оригиналов [9] и таблицы из [10], получаем окончательное решение

$$\begin{aligned} \bar{T}(\bar{x}, \bar{t}) = e^{-(A_1+A_2)\bar{x}} & \left[\frac{\partial}{\partial \bar{t}} \int_0^{\bar{t}} e^{-(B_1+B_2)(\bar{t}-\tau)} I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\bar{t}-\tau} \right) e^{-(D_1+D_2)\tau} I_0 \times \right. \\ & \times \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\tau} \right) d\tau + (B_1 + B_2 + D_1 + D_2) \int_0^{\bar{t}} e^{-(B_1+B_2)(\bar{t}-\tau)} \times \\ & \times I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\bar{t}-\tau} \right) e^{-(D_1+D_2)\tau} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\tau} \right) d\tau + \\ & \left. + (B_1 + B_2)(D_1 + D_2) \int_0^{\bar{t}} \int_0^{\tau} e^{-(B_1+B_2)(\tau-\vartheta)} \times \right. \\ & \left. \times I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\tau-\vartheta} \right) e^{-(D_1+D_2)\vartheta} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\vartheta} \right) d\vartheta d\tau \right] \end{aligned} \quad (10)$$

— для безразмерной температуры газа;

$$\begin{aligned} \bar{T}_{w1}(\bar{x}, \bar{t}) = B_1 e^{-(A_1+A_2)\bar{x}} & \times \\ & \times \left[\int_0^{\bar{t}} e^{-(B_1+B_2)(\bar{t}-\tau)} I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\bar{t}-\tau} \right) e^{-(D_1+D_2)\tau} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\tau} \right) d\tau + \right. \\ & \left. + (D_1 + D_2) \int_0^{\bar{t}} \int_0^{\tau} e^{-(B_1+B_2)(\tau-\vartheta)} I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\tau-\vartheta} \right) e^{-(D_1+D_2)\vartheta} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\vartheta} \right) d\vartheta d\tau \right]; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{T}_{w2}(\bar{x}, \bar{t}) = D_1 e^{-(A_1+A_2)\bar{x}} & \times \\ & \times \left[\int_0^{\bar{t}} e^{-(B_1+B_2)(\bar{t}-\tau)} I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\bar{t}-\tau} \right) e^{-(D_1+D_2)\tau} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\tau} \right) d\tau + \right. \\ & \left. + (B_1 + B_2) \int_0^{\bar{t}} \int_0^{\tau} e^{-(B_1+B_2)(\tau-\vartheta)} I_0 \left(2\sqrt{A_1 B_1 \bar{x}} \sqrt{\tau-\vartheta} \right) e^{-(D_1+D_2)\vartheta} I_0 \left(2\sqrt{A_2 D_1 \bar{x}} \sqrt{\vartheta} \right) d\vartheta d\tau \right] \end{aligned} \quad (12)$$

— для безразмерной температуры внутренней стенки проточного тракта ТА, где $I_0(x)$ — модифицированная функция Бесселя первого рода.

Несмотря на громоздкость формул, они дают решение в виде конечных интегралов от известных функций. Использование математических редакторов, например MathCAD, сводит к минимуму затраты времени на расчет нестационарного сопряженного теплообмена в ТА с использованием этих формул.

Сравнение результатов расчетов по зависимости (11) с точным решением уравнения, описывающим распределение безразмерной температуры в стенке с бесконечной теплопроводностью для характерных режимов работы ТА, показало их полное совпадение (рис. 3).

Для проведения поверочных расчетов ТА высокоэнтальпийного гиперзвукового стенда ЦИАМ на стационарных режимах работы была разработана специальная программа, учитывающая реальные свойства газообразных продуктов сгорания. Данная программа валидирована большим объемом экспериментальных данных и прошла государственную регистрацию. Сравнение результатов расчета температуры газа, полученных по формуле (11), с результатами расчета по этой программе приведено на рис. 4. Графические зависимости показывают хорошее качественное и количественное совпадение.

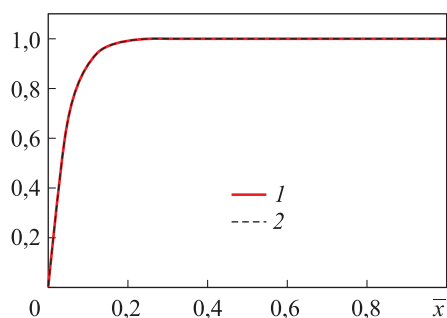


Рис. 3. Сравнение результатов расчета по (11), (12) (1) и точного аналитического решения (2) для безразмерной температуры стенки внутренней трубки

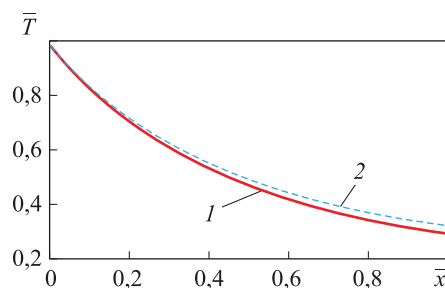


Рис. 4. Распределение температуры газа вдоль ТА:

1 — по формуле (10); 2 — по программе и с учетом реальных свойств газообразных продуктов сгорания

Пример расчета по приведенной зависимости. На основе полученных зависимостей (10)–(12) проведены расчеты распределения температуры газа и стенок в ТА при параметрически задаваемых значениях координаты и времени. Расчеты выполнены при следующих параметрах: $G = 23,6 \text{ кг} \cdot \text{с}^{-1}$, $T_0 = 1600 \text{ К}$, $c_p = 1260 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\alpha_1 = 91 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $\alpha_2 = 60 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $L_{cp} = 3 \text{ м}$, $D_1 = 35 \text{ мм}$, $D_2 = 3500 \text{ мм}$, $\rho_1 = \rho_2 = 7900 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$, $C_1 = C_2 = 460 \text{ Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, $\alpha_{c1} = 8000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $\alpha_{c2} = 6000 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$, $T_c = 290 \text{ К}$, $\tau = 20 \text{ с}$.

На рис. 5 и 6 приведено распределение температуры газа и стенок элементов ТА при параметрически задаваемом значении времени и координаты.

Полученные в результате решения зависимости (10)–(12) позволяют определить время выхода ($\sim 5 \text{ с}$) ТА на стационарный режим при указанных параметрах газа, а также температуру газа на выходе ТА, которая должна удовлетворять техническим требованиям на трубопровод отвода газов от ТА в систему эксгаузного отсоса ($\leq 620 \text{ К}$).

Выводы. Найдено решение (10)–(12) в квадратурах для системы уравнений в частных производных (9), отражающее математическую модель сопряженной задачи нестационарного теплообмена в тракте ТА. Математическая модель верифицирована по аналитическому решению нестационарной задачи прогрева стенки и по зарегистрированной программе расчета стационарного теплового состояния трубчатого теплообменника.

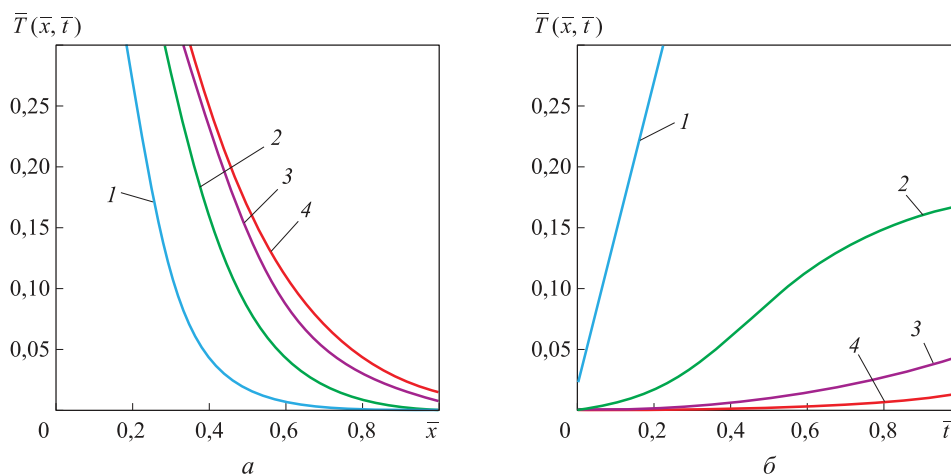


Рис. 5. Графические зависимости температуры газа от координаты (а) и времени (б):
 а — $\bar{t} = 0,2$ (1); 0,5 (2); 0,8 (3); 1 (4); б — $\bar{x} = 0,2$ (1); 0,5 (2); 0,8 (3); 1 (4)

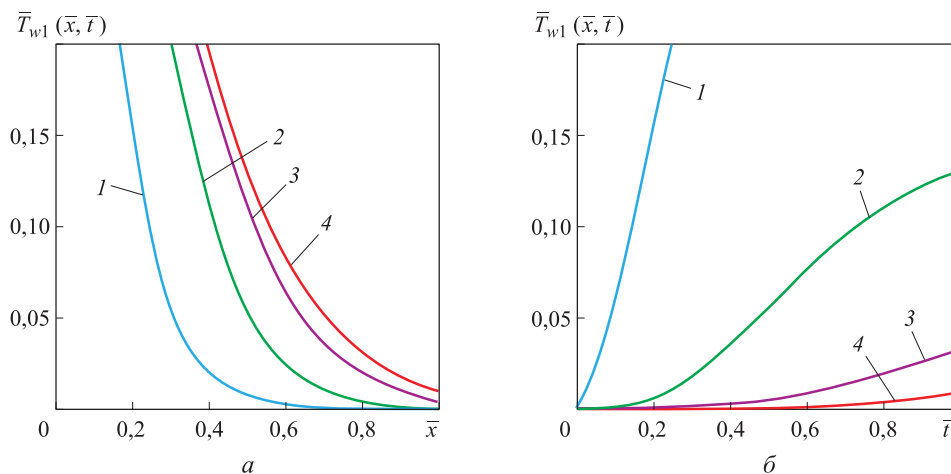


Рис. 6. Графические зависимости температуры стенок от координаты (а) и времени (б):
 а — $\bar{t} = 0,2$ (1); 0,5 (2); 0,8 (3); 1 (4); б — $\bar{x} = 0,2$ (1); 0,5 (2); 0,8 (3); 1 (4)

Предложенные зависимости используются для экспресс-расчета параметров газа и теплового состояния ТА высотного стенда ЦИАМ. Эти зависимости также могут быть использованы при разработке и проектировании ТА для экспресс-оценок количественного значения температуры стенок и газа в ТА в любой момент времени, а также для оценки времени выхода ТА на стационарный режим.

Методический подход к построению математической модели можно использовать для расчета ТА различных конструкций, в частности для кауперных подогревателей высокоэнтальпийных стендов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гришин А.М., Фомин В.М. Сопряженные и нестационарные задачи механики реагирующих сред. Новосибирск: Наука, 1984. 320 с.

2. *Лыков А.В.* Тепломассообмен. Справочник. М.: Энергия, 1978. 480 с.
3. *Гришин А.М.* Математическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред / Численные методы задач переноса (материалы международной школы-семинара). Ч. 2. Минск: Изд-во ИТМО АН БССР, 1979. С. 65–85.
4. *Зинченко В.И., Пырх С.И.* Неравновесный вязкий ударный слой в окрестности критической точки с учетом сопряженного теплообмена // ПМТФ. 1979. № 3. С. 108–114.
5. *Полежаев Ю.В., Юревич Б.Ф.* Тепловая защита. М.: Энергия, 1976. 392 с.
6. *Гришин А.М., Гофман А.Г., Зинченко В.И., Пырх С.И.* Решение некоторых сопряженных задач тепломассообмена ТОД с гиперзвуковыми потоками // Численные методы механики сплошных сред. Новосибирск: Изд-во ИТПМ СО АН СССР. 1982. № 2.
7. *Прохоренков А.М.* Моделирование процессов теплообмена, протекающих в пластинчатых теплообменных аппаратах // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2014. № 1. С. 92–101.
8. *Малов Ю.И., Нужненко Т.А.* Математическое моделирование процесса нестационарной теплопроводности в цилиндрическом тепловыделяющем элементе // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2003. № 2. С. 20–27.
9. *Ершова В.В.* Импульсные функции. Функции комплексной переменной. Операционное исчисление. Минск: Высшая школа, 1976. 255 с.
10. *Бейтмен Г., Эрдейи А.* Таблицы интегральных преобразований. Т. 1. М.: Наука, 1969. 343 с.

Александров Вадим Юрьевич — канд. техн. наук, заместитель начальника отдела «Аэрокосмические двигатели» по научному направлению Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

Королёва Анастасия Павловна — инженер отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

Кукшинов Николай Владимирович — канд. техн. наук, младший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2); ассистент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Сафонова Дарья Борисовна — инженер-конструктор 2-й категории отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2).

Французов Максим Сергеевич — младший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, ул. Авиамоторная, д. 2); ассистент кафедры «Теплофизика» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Александров В.Ю., Королёва А.П., Кукшинов Н.В., Сафонова Д.Б., Французов М.С. Математическая модель расчета процесса нестационарного прогрева стенок теплообменного аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 5. С. 4–14. DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-4-14

MATHEMATICAL SIMULATION FOR COMPUTING PROCESS PARAMETERS DURING NON-STEADY-STATE HEATING OF HEAT EXCHANGER WALLS

V.Yu. Aleksandrov¹
A.P. Koroleva^{1,2}
N.V. Kukshinov^{1,2}
D.B. Safonova¹
M.S. Frantsuzov^{1,2}

aleksandrov@rtc.ciam.ru
akoroleva@ciam.ru
kukshinov@ciam.ru
safonova@ciam.ru
mfrancuzov@yandex.ru

¹P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development,
Moscow, Russian Federation

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper presents a mathematical simulation of non-steady-state heat transfer in the flow duct of a heat exchanger designed for decreasing exhaust gas temperature of an aircraft engine test firing facility. We obtained an analytical solution by quadrature for a system of partial differential equations that describe a model of a combined non-steady-state problem of heating the heat exchanger components and cooling the exhaust gases

Keywords

Non-steady-state heat transfer, heat exchanger, mathematical simulation

Received 29.03.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Grishin A.M., Fomin V.M. *Sopryazhennye i nestatsionarnye zadachi mekhaniki reaktivnykh sred* [Adjoint and non-stationary problems of reactive mediums mechanics]. Novosibirsk, Nauka Publ., 1984. 320 p.
- [2] Lykov A.V. *Teplomassoobmen* [Heat and mass exchange]. Moscow, Energiya Publ., 1978. 480 p.
- [3] Grishin A.M. Mathematical modeling of adjoint problems of reactive mediums mechanics. *Chislennye metody zadach perenosy (materialy mezhdunarodnoy shkoly-seminara)*. Ch. 2. [Numerical methods of transfer problem (Proc. Int. School-Workshop). P. 2]. Minsk, Izd-vo ITMO AN BSSR Publ., 1979, pp. 65–85.
- [4] Zinchenko V.I., Pyrkh S.I. A nonequilibrium viscous shock-wave layer in the vicinity of the critical point with the associated heat exchange taken into account. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics (PMTF)*, 1979, vol. 20, no. 3, pp. 344–349. DOI: 10.1007/BF00911692 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00911692>
- [5] Polezhaev Yu.V., Yurevich B.F. *Teplovaya zashchita* [Thermal protection]. Moscow, Energiya Publ., 1976. 392 p.
- [6] Grishin A.M., Gofman A.G., Zinchenko V.I., Pyrkh S.I. Solving some adjoint problems of heat and mass exchange of TOD with hypersonic flows. *Chislennye metody mekhaniki sploshnykh sred*, 1982, no. 2 (in Russ.).
- [7] Prokhorenkov A.M. Modeling of heat exchange processes in lamellar heat exchange devices. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2014, no. 1, pp. 92–101 (in Russ.).

- [8] Malov Yu.I., Nuzhnenko T.A. Mathematical modeling of non-stationary heat conduction in cylindrical heat-releasing element. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Estestv. Nauki* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Nat. Sci.], 2003, no. 2, pp. 20–27 (in Russ.).
- [9] Ershova V.V. Impul'snye funktsii. Funktsii kompleksnoy peremennoy. Operatsionnoe ischislenie [Pulse functions. Functions of complex variable. Operational calculus]. Minsk, Vysheyshaya shkola Publ., 1976. 255 p. (in Russ.).
- [10] Bateman H., Erdelyi A. *Tablitsy integral'nykh preobrazovaniy*. T. 1. Moscow, Nauka Publ., 1969. 343 p.

Aleksandrov V.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Head of Department of Aerospace Engines in charge of scientific work, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

Koroleva A.P. — Engineer, Department of Aerospace Engines, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

Kukshinov N.V. — Cand. Sc. (Eng.), Junior Research Fellow, Department of Aerospace Engines, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation); Assistant Lecturer, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Safonova D.B. — Designer Engineer of the 2nd rank, Department of Aerospace Engines, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation).

Frantsuzov M.S. — Junior Research Fellow, Department of Aerospace Engines, P.I. Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation); Assistant Lecturer, Department of Thermal Physics, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Aleksandrov V.Yu., Koroleva A.P., Kukshinov N.V., Safonova D.B., Frantsuzov M.S. Mathematical Simulation for Computing Process Parameters During Non-Steady-State Heating of Heat Exchanger Walls. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 5, pp. 4–14 (in Russ.).
DOI: 10.18698/0236-3941-2018-5-4-14