

УДК 533

Особенности теплообмена в предсопловом объеме РДТТ с зарядами сложной формы

Б.Я. Бендерский¹, А.А. Чернова^{1,2}

¹*Ижевский государственный технический университет
им. М.Т. Калашникова*

²*ЗАО «Ижевский нефтяной научный центр»*

E-mail: alicaaa@gmail.com

Рассматриваются локальные особенности теплофизических процессов в каналах и предсопловом объеме твердотопливных ракетных двигателей со скрепленными зарядами различных форм поперечного сечения. Исследуется влияние формы заряда на теплообмен в области соплового дна. Показано, что величина числа Нуссельта в критической точке на многосопловом днище определяется как формой каналов заряда, так и геометрией предсоплового объема. На основании обработки результатов численного эксперимента получены критериальные зависимости для определения числа Нуссельта в областях локального повышения интенсивности теплообмена. Полученные зависимости сопоставлены с известными эмпирическими формулами [1–4]. Выявлено, что использование эмпирических соотношений для оценки числа Нуссельта приводит к некорректному определению параметров теплообмена на бронированных поверхностях заряда, сопловых крышках и входной части утопленного поворотного сопла.

Ключевые слова: твердотопливный ракетный двигатель, предсопловой объем, сопловое днище, математическое моделирование, теплообмен, критериальные уравнения, число Нуссельта.

Введение

Проектирование новых конструкций твердотопливных ракетных двигателей требует оценки толщины теплозащитного покрытия сопловой крышки камеры сгорания [1, 2]. Такая оценка невозможна без информации об особенностях процессов теплообмена в проточных трактах ракетного двигателя. При этом в условиях проектирования ракетных двигателей возникает необходимость предварительной оценки тепловых потоков в зависимости от внутрикамерных параметров и геометрических особенностей разрабатываемого изделия [3, 4]. Для предварительной оценки тепловых потоков полезными представляются полуэмпирические и эмпирические критериальные уравнения.

Анализ существующих способов определения и расчета теплообмена в камере сгорания и в предсопловом объеме ракетного двигателя показывает, что для оценки тепловых потоков на криволинейных внутренних поверхностях применяются эмпирические соотношения [1, 3, 4]. Чаще всего используется критериальное уравнение Крауссольда [5], полученное для задачи о теплообмене пластины. Кроме того, востребованными являются соотношения, полученные в работах [1, 4], либо содержащие температурные градиенты

(формулы Гаухмана–Илюхина, Петухова–Кириллова и т.д.), либо построенные на основе анализа экспериментальных данных для задачи о теплообмене в цилиндрическом канале (формула Эккерта [6]).

Предсопловой объем (ПО) ракетного двигателя характеризуется соизмеримостью продольных, поперечных и окружных размеров. Числа Рейнольдса в нем составляют $\sim 10^5 - 10^6$, вследствие чего в ПО ракетного двигателя твердого топлива (РДТТ) реализуется пространственное турбулентное течение. То есть конструктивные особенности переднего и заднего предсопловых объемов требуют учета трехмерности течений и не могут быть описаны моделями пластины или цилиндрического канала.

В современных работах вопросы изучения процессов теплообмена, протекающие в проточных трактах и предсопловом объеме РДТТ, освещены слабо. Можно выделить отдельные работы по экспериментальному исследованию процессов теплообмена [7, 8], однако применение полученных в них результатов для проектирования РДТТ затруднительно. Из работ, в которых использовались методы математического моделирования процессов теплообмена, можно выделить [9–13]. Однако в них отсутствуют критериальные соотношения, полезные для практики. В работе [13] было показано, что течение в предсопловом объеме и камере сгорания трехмерно и имеет вихревые структуры, а также была продемонстрирована необходимость коррекции и уточнения известных методик расчета коэффициента конвективной теплоотдачи вблизи соплового дна. Таким образом, анализ литературы показывает актуальность и необходимость тщательной валидации существующих инженерных методик [1–4] применительно к расчету тепловых потоков на сопловых днищах.

Численному исследованию процессов теплообмена, протекающих в проточных трактах (канале, предсопловом объеме) твердотопливного ракетного двигателя, а также оценке корректности известных инженерных методик посвящена настоящая работа.

Теплообмен в предсопловом объеме ракетного двигателя

Рассматривается сопряженная задача теплообмена. Стационарное пространственное турбулентное течение сжимаемого теплопроводного газа в предсопловом объеме РДТТ с зарядами различных форм (канально-щелевой (рис. 1a), звездообразной (рис. 1b) и торцевой (рис. 1c) [14, 15]) описывается следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \partial\rho/\partial t + \nabla\rho\mathbf{v} &= 0, \\ \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \rho\mathbf{F} - \nabla p + \text{Div}\mathbf{P}, \\ \rho \frac{d}{dt} \left(C_v T + \frac{\mathbf{v}^2}{2} \right) &= \rho\mathbf{F}\mathbf{v} + \nabla(P\mathbf{v}) + \nabla\mathbf{q}, \\ c\rho \frac{\partial T}{\partial t} &= \lambda\nabla^2 T, \\ p/T &= \rho R, \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ — плотность газа, p — давление, \mathbf{v} — вектор скорости, \mathbf{F} — объемная сила, $P = \frac{1}{2}\mu\left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\delta_{ij}\text{Div}\mathbf{v}$ — тензор напряжений, T — температура, \mathbf{q} — вектор

плотности теплового потока, R — газовая постоянная, μ — динамическая вязкость, λ — коэффициент теплопроводности, δ_{ij} — символ Кронекера, c — удельная теплоемкость. Для замыкания системы уравнений (1), с учетом рекомендаций [14], используется модель турбулентности Ментера SST $k-\varepsilon$.

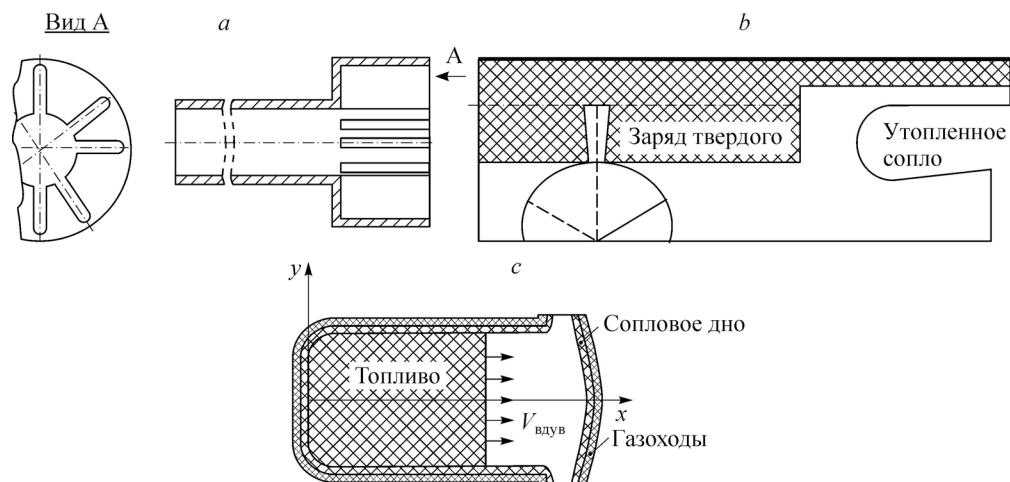


Рис. 1. Предсполовой объем РДТТ с зарядами различных форм поперечного сечения: канально-щелевой (а), звездообразной (б), торцевой (с).

Границные условия определялись следующим образом: на входе задавался расход газа и начальная интенсивность турбулентности, на поверхности массоподвода (горячий заряд) — распределенный вдув (скорость V), на стенках камеры и бронированных поверхностях — условия прилипания и непротекания.

Параметрам потока во входном сечении были присвоены значения $T_a = 500 \div 2500$ К, $G_a = 0,1 \div 20$ кг/с, $Tu_a = 5\%$, на поверхности вдува — $T_k = 500 \div 2500$ К, $G_k = 1 \div 20$ кг/с, показатель адиабаты газа $k = 1,2 \div 1,4$, отношение расхода газа, поступающего из щелевых пропилов (надсполового зазора) к расходу газа, поступающего из основного канала определялось коэффициентом $K_g = G_a / G_k$.

На границе твердого тела и газа задавалось условие равенства тепловых потоков. На внешних границах твердого тела, не соприкасающихся с рабочим телом, задавались постоянные коэффициент теплообмена и температура окружающей среды [14].

Необходимо отметить, что в представляемой работе рассматриваются теплофизические процессы, протекающие в квазистационарном режиме работы двигателя, характеризующиеся максимальной интенсивностью процессов теплообмена.

Все вычислительные схемы, алгоритмы, а также используемая математическая модель тщательно верифицировались на задачах, имеющих подробное экспериментальное описание [7]. Получено качественное и количественное соответствие расчетных и экспериментальных данных [15, 16]. Подробно особенности течения в проточных трактах и предсполовом объеме камеры сгорания с четырехсполовой крышкой и щелевым зарядом рассматривались в [15], поэтому в настоящей работе будут приведены только необходимые для понимания теплофизической картины поля скоростей и предельных линий тока.

Поскольку процесс теплообмена в известной степени определяется газодинамической предысторией потока, а топологические особенности течения, в свою очередь, связаны с геометрическими особенностями каналов и трактов, целесообразно рассматривать и описывать теплофизические процессы в камере сгорания для каждого из трактов и объемов отдельно.

Течение вблизи многосполового дна определяется, в первую очередь, геометрией крышки и сопла (сопел). Поэтому целесообразно сопоставлять между собой геометрически подобные сопловые крышки, используемые в РДТТ разных конструктивных схем. Так, течение вблизи четырехсполовой крышки с симметричным расположением сопел

определяется именно геометрией крышки и характеризуется наличием центральной узловой точки (на пересечении осей симметрии днища) и четырех линий растекания, расположенных между соплами. Влияние формы заряда на течение в предсопловом объеме обуславливает возникновение на периферии соплового днища локальных особенностей течения, свойственных геометрии заряда.

Представляется возможным использование двух подходов к оценке тепловых потоков: первый, в рамках которого течение вблизи крышки рассматривается как струйное, предлагает приближенное определение по зависимостям, полученным в монографии [17], вязких напряжений вблизи днища по известным профилям скорости с дальнейшим переходом через аналогию Рейнольдса к числам Стентона и Нуссельта. Второй подход предполагает знание топологических особенностей аналогичных течений и применение к оценке тепловых потоков в особых точках и линиях критериальных (полуэмпирических и эмпирических) уравнений. Интересным и целесообразным представляется также сопоставление результатов и ограничений обоих подходов.

**Оценка теплообмена в рамках взаимодействия струи с преградой:
теплообмен на поверхности многосопловой крышки
и утопленного соплового блока**

Для оценки тепловых потоков вблизи четырехсопловой крышки в рамках струйного подхода необходимо построить профили скоростей вблизи соплового дна. Надо отметить, что течение газа в предсопловом объеме многосоплового двигателя, как было показано в работе [18], имеет явный трехмерный характер, в результате чего профиль скорости существенно усложняется. На рис. 2 a приведен профиль скорости вблизи заднего днища четырехсоплового двигателя с канально-щелевым зарядом. Как видно из рисунка, изменение скорости вблизи сопловой крышки в центральной части потока ($x \leq 0,44R$, $h_1 = 0,01$ м, $\bar{h} = h/d_k = 0,32$) практически не наблюдается, то есть натекание

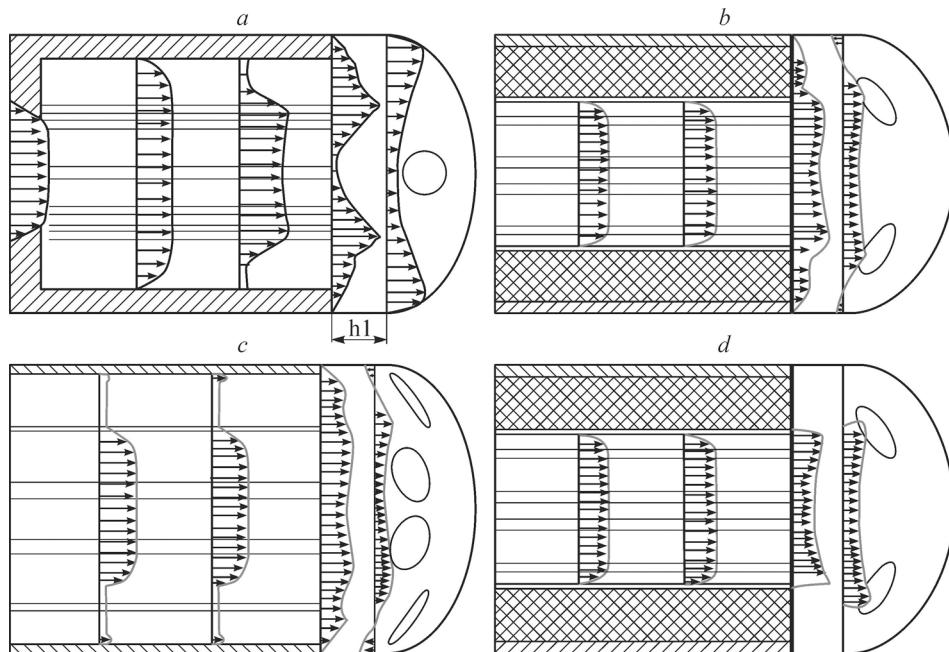


Рис. 2. Трансформация профилей скорости потока вблизи соплового дна.

a — в сечении по соплам, b — в сечении между щелями (по большому углу),
 c — по щелям, не совпадающим с соплами, d — в сечении между щелями (по малому углу).

Таблица 1
Касательное напряжение трения

U^*/U_{\max}^*	$\tau_w/(\tau_w)$ [17]	$\tau_w/(\tau_w)_{\max}$
0,33	0,02138	0,000892
0,66	0,2419	0,00178
1	1	0,00282

газа на центральную область сопловой крышки может рассматриваться как натекание струи с постоянным профилем скорости на преграду. Согласно [17], местное касательное напряжение трения на стенке вблизи центральной узловой точки может быть описано формулой

$$\tau_w = 1,23259((\pi/2)U^*/y)^{3/2}y^{*2}x/(\text{Re} \cdot xU^*\sqrt{v^*}).$$

Однако результаты вычислительного эксперимента показывают, что его применение приводит к существенному завышению (табл. 1) значений местного касательного напряжения трения на поверхности соплового дна. Таким образом, предположение о струйном характере натекания потока на сопловое дно и использование эмпирических, определяемых профилем скорости, соотношений приводит к значительному завышению значений напряжения трения на днище. Необходимо отметить, что именно по значениям местных напряжений определяется безразмерный коэффициент сопротивления $C_f = \tau_w/(1/2\rho V^2)$, то есть значения данного коэффициента тоже будут завышены.

На основании анализа полученных данных для рассматриваемого течения в предсопловом объеме многосоплового двигателя с канально-щелевым зарядом зависимость между коэффициентом Стентона и коэффициентом сопротивления имеет близкий к аналогии Рейнольдса вид $St = 0,475 \cdot C_f + 0,0065$, но приводит к некоторым отличиям между полученными значениями числа Стентона при малых величинах коэффициента сопротивления (рис. 3).

Необходимо отметить, что ввиду малости величины \bar{h} (расстояния от торца заряда до центра соплового днища) использовать экспериментальные соотношения из работы [19], полученные для натекания симметричной струи на преграду, не представляется возможным.

Рассмотрим особенности организации газодинамических процессов в предсопловом объеме РДТТ с утопленным соплом. Трансформация профилей скорости потока, поступающего из центрального канала типа «звезда», вблизи поверхности утопленного сопла представлена на рис. 4. Из рисунка видно, что профиль скорости вблизи поверхности утопленного сопла существенно неравномерен, а следовательно, взаимодействие данного потока с поверхностью утопленного сопла является трехмерным, не имеет свободных границ и не носит струйного характера.

Топологический подход: теплообмен в особых точках и линиях на поверхности многосопловой крышки и утопленного соплового блока

Рассмотрим особенности теплообмена в области четырехсопловой крышки РДТТ с канально-щелевым зарядом. В работе [16] было показано образование парной вихревой структуры в межсопловом пространстве вблизи сопловой крышки, которая приводит к интенсификации процессов теплообмена (рис. 5). Из рисунка видно, что максимальных значений тепловой поток достигает на периферии крышки, между соплами, в области седловых точек, между тем как узловая точка характеризуется незначительным повышением

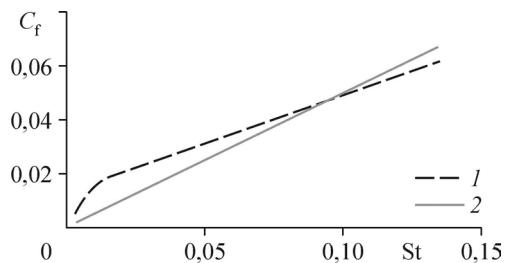


Рис. 3. Зависимости числа Стентона от коэффициента сопротивления.

1 — вычислительный эксперимент,
2 — аналогия Рейнольдса.

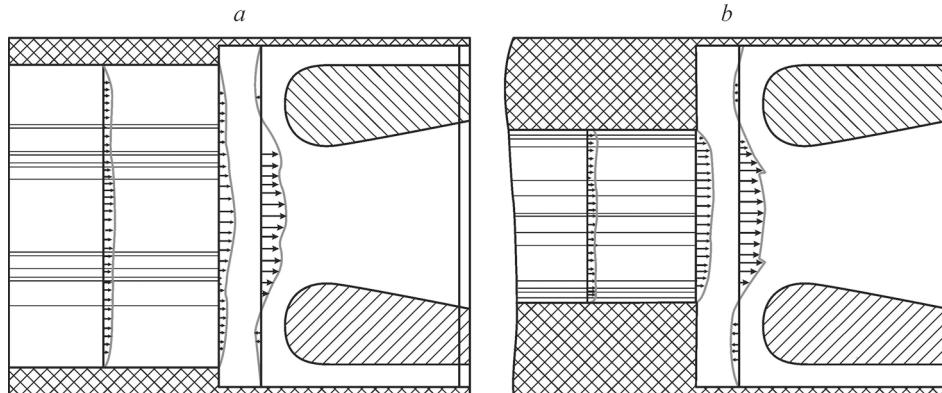


Рис. 4. Трансформация профиля скорости потока вблизи утопленного сопла.

a — в сечении по лучам «звезды», *b* — в сечении между лучами.

теплового потока. Для оценки тепловых потоков в центральной узловой точке в общем случае, без учета влияния коэффициента K_g , получено следующее критериальное соотношение:

$$Nu = 0,18 \cdot Re^{0,57} \cdot Pr^{0,4}.$$

Образование парной вихревой структуры в межсопловом пространстве и вблизи сопловой крышки при изменении коэффициента соотношения расходов приводит к интенсификации процессов теплообмена. Критериальное уравнение с учетом коэффициента K_g для центральной узловой точки запишется следующим образом:

$$Nu = 0,17 \cdot Re^{0,56} \cdot Pr^{0,4} \cdot K_g^{0,45}.$$

Процессы теплообмена вблизи соплового дна многосоплового РДТТ с торцевым зарядом идентичны вышеописанным процессам, характерным для многосоплового РДТТ с канально-щелевым зарядом (рис. 6). Как видно из рисунка, максимальное значение плотности теплового потока, вне зависимости от длины ПО, приходится на центральную узловую точку — точку торможения. На основании обработки результатов вычислительных экспериментов получено следующее критериальное уравнение для определения числа Нуссельта в центральной узловой точке четырехсоплового дна РДТТ с зарядом торцевого горения:

$$Nu = 4,5 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33}.$$

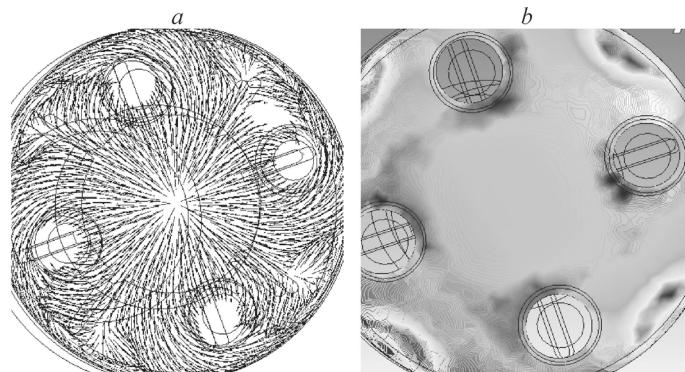


Рис. 5. Течение вблизи четырехсопловой крышки.

a — предельные линии тока, *b* — распределение теплового потока.

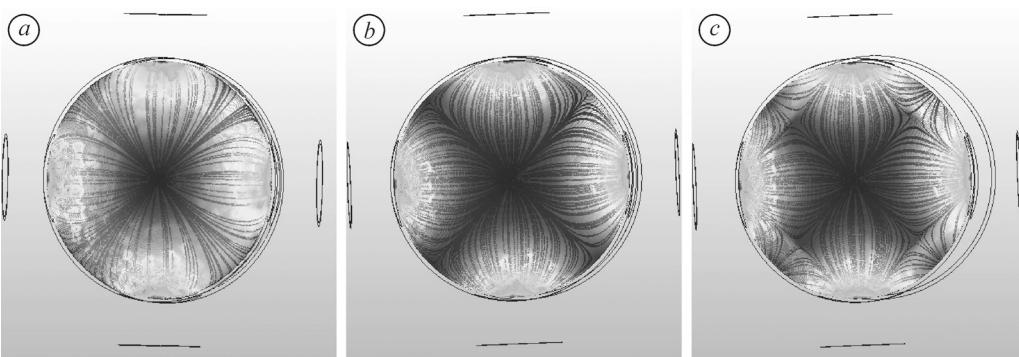


Рис. 6. Распределение плотности теплового потока и предельные линии тока на поверхности соплового дна.
 $L = 0,25d$ (a), $0,3d$ (b), $0,5d$ (c).

Рис. 7. Распределение теплового потока по поверхности утопленного сопла.

Рассмотрим особенности теплообмена вблизи утопленного поворотного сопла. Течение продуктов сгорания вблизи входной поверхности утопленного сопла определяется взаимодействием потоков газа, поступающих из надсоплового (расположенного над поверхностью сопла) зазора и от основного заряда. В работах [7, 16] было показано, что при преобладании канального потока ($K_g < 1$) структура предельных линий тока на входной поверхности сопла характеризуется наличием шести точек торможения, соответствующих положению лучей «звезды», и шести седловых точек, что указывает на наличие вихревых структур у входной поверхности сопла. Каждая из перечисленных топологических особенностей течения вблизи утопленного сопла приводит к интенсификации процессов теплообмена (рис. 7). На основании обработки результатов численного эксперимента получены следующие критериальные зависимости для определения числа Нуссельта в особых точках на входной поверхности сопла:

$$Nu = 1,31 Re^{0,864} \cdot Pr^{0,12} \text{ при } 3 \cdot 10^5 \leq Re \leq 4,8 \cdot 10^5 \text{ и } 0,1 \leq K_g \leq 1.$$

Для верификации полученных соотношений численно воспроизведен эксперимент [7] по исследованию теплообмена на входной поверхности утопленного сопла РДТТ с центральным зарядом типа «звезда», результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2
Верификация полученных зависимостей

Параметр	$Nu [7]/Nu_{exp}$	$Nu [6]/Nu_{exp}$	$Nu [5]/Nu_{exp}$	$Nu (\text{расчет})/Nu_{exp}$
Критериальная зависимость	$Nu = 1,63 \cdot Re_{\beta}^{0,5} \cdot Pr^{0,4}$	$Nu = 0,36 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$	$Nu = 0,023 \cdot Re_x^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$	$Nu = 1,31 \cdot Re^{0,864} \cdot Pr^{0,12}$
Nu	1	0,1367	0,008525	1,01

Заключение

Показано, что применение известных критериальных соотношений не позволяет корректно оценить величину тепловых потоков вблизи теплонапряженных поверхностей. Использование уравнения Крауссольда приводит к занижению значений чисел Нуссельта не менее чем на 12%; использование уравнения Эккерта приводит к значительному завышению значений тепловых потоков, а для заряда типа «звезда» — к занижению. Такие отличия связаны со сложной трехмерной структурой течения вблизи рассматриваемых областей.

Список литературы

- 1. Абугов Д.И., Бобылев В.М.** Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива: уч. для машиностроительных вузов. М.: Машиностроение, 1987. 272 с.
- 2. Фахрутдинов И.Х., Котельников А.В.** Конструкция и проектирование ракетных двигателей твердого топлива. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- 3. Авдуевский В.С., Галицкий Б.М. и др.** Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике / под ред. В.К. Кошкина. М.: Машиностроение, 1975. 623 с.
- 4. Орлов Б.В., Мазин Г.Ю.** Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе. М.: Машиностроение, 1968. 536 с.
- 5. Зиблэнд Х.** Проблемы теплопередачи в ракетных двигателях // Вопросы ракетной техники. 1956. № 4.
- 6. Реактивные двигатели:** сб. статей / Под ред. О.Е. Ланкастера. Воениздат, 1962. 667 с.
- 7. Савельев С.К., Емельянов В.Н., Бендерский Б.Я.** Экспериментальные методы исследования газодинамики РДТТ. СПб.: Недра, 2007. 267 с.
- 8. Зайковский В.Н., Меламед Б.М.** Экспериментальное исследование теплообмена в дозвуковом проточном тракте поворотных сопел РДТТ // III Международ. школа-семинар «Нестационарное горение и внутренняя баллистика». СПб. 2000. С. 112–114.
- 9. Анисимов В.А., Волков К.Н., Денисихин С.В., Емельянов В.Н.** Моделирование задач внутренней баллистики энергоустановок средствами современных вычислительных пакетов // Химическая физика и мезоскопия. 2006. Т. 8, № 3. С. 327–335.
- 10. Волков К.Н., Емельянов В.Н.** Численное исследование турбулентного двухфазного течения вблизи критической точки // Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. СПб: Изд-во БГТУ, 1995. С. 94–96.
- 11. Емельянов В.Н.** Физическое и вычислительное моделирование трехмерных течений в двигательных установках. Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных систем. СПб: Изд-во БГТУ, 1996. С. 124–137, 599–605.
- 12. Бендерский Б.Я., Тененев В.А.** Пространственные дозвуковые течения в областях со сложной геометрией // Математическое моделирование. 2001. Т. 13, № 8. С. 121–127.
- 13. Винник А.Л., Дуреев В.А.** Оценка коэффициента конвективной теплоотдачи // Системи обробки інформації. 2001. Вип. 2(12). С. 161–162.
- 14. Ачухов В.В., Паюсте Б.Я.** Задачник по процессам тепломассообмена: учеб. пособие для вузов. М.: Энергоатомиздат, 1986. 144 с.
- 15. Волков К.Н., Емельянов В.Н.** Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
- 16. Бендерский Б.Я., Чернова А.А.** Формирование вихревых структур в каналах массоподводом и их взаимодействие с поверхностями в РДТТ // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 2. С. 195–200.
- 17. Белов И.А.** Взаимодействие неравномерных потоков с преградами. Л.: Машиностроение, 1983. 144 с.
- 18. Бендерский Б.Я., Саушин П.Н., Тененев В.А., Чернова А.А.** Особенности моделирования внутрикамерных процессов энергоустановок, оснащенных утопленным соплом // Космонавтика и ракетостроение. 2012. Т. 66, № 1. С. 156–161.
- 19. Юдаев Б.Н.** Теплопередача: уч. для втузов. М.: Высш. школа, 1973. 360 с.

Статья поступила в редакцию 7 июня 2017 г.