

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЧАСТИЦ КОНДЕНСИРОВАННОЙ ФАЗЫ С ЭЛЕМЕНТАМИ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА МАЛОРАЗМЕРНОГО ПРЯМОТОЧНОГО ВОЗДУШНО- РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

А.В. Воронцовский¹

В.И. Смоляга²

К.Ю. Арефьев¹

Л.А. Филимонов¹

М.А. Абрамов¹

voron@bmstu.ru

jagersw@yandex.ru

arefyev@rambler.ru

voron@bmstu.ru

abramovmaks94@gmail.com

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² АО «НПО «Сплав», г. Тула, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрены вопросы математического моделирования двухфазного течения в камерах дожигания малоразмерных прямоточных воздушно-реактивных двигателей. Приведена математическая модель для численного расчета траекторий движения частиц конденсированной фазы в проточном тракте малоразмерного прямоточного воздушно-реактивного двигателя и определения интенсивности воздействия частиц различной дисперсности на стенки камеры дожигания. Приведены результаты параметрического расчетного исследования интенсивности воздействия частиц (эрозии) на стенки проточного тракта камеры дожигания в зависимости от режимов инъекции продуктов газификации высокоэнергетичных конденсированных составов в воздушный поток и от конфигурации выходных отверстий системы инъекции. Разработаны рекомендации по минимизации воздействия частиц конденсированной фазы на элементы проточного тракта камеры дожигания малоразмерного прямоточного воздушно-реактивного двигателя

Ключевые слова

Математическое моделирование, двухфазное течение, конденсированные частицы, эрозия, прямоточный воздушно-реактивный двигатель

Поступила в редакцию 05.07.2017

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Введение. В настоящее время к числу актуальных задач в области разработки тактических малоразмерных летательных аппаратов (ЛА) нового поколения следует отнести создание прямоточных воздушно-реактивных двигателей (ПВРД) [1] на высокоэнергетичных конденсированных составах (ВКС) [2, 3]. Рабочий процесс в ПВРД разделен на две стадии [4]. Первая (начальная) стадия заключается в первичном горении (газификации) ВКС в газогенераторе (ГГ), а на второй стадии происходит физико-химическое взаимодействие образующихся продуктов газификации (ПГ) с воздушным потоком в камере дожигания (КД). Следует отметить, что ПГ — сложная смесь газов, которая содержит

большое количество частиц конденсированной фазы. Для исключения неоднозначного толкования результатов исследования введем разные обозначения для газовой составляющей ПГ (ПГГ) и составляющей, состоящей из конденсированных частиц (ПГК).

С учетом массогабаритных ограничений, характерных для малоразмерных ЛА [5], целесообразным становится использование осесимметричных ПВРД (рис. 1). Рассматриваемые ПВРД оснащены лобовым воздухозаборным устройством 1, которое обеспечивает сжатие набегающего воздушного потока и подачу его в КД 3; ВКС 8 расположен в ГГ 7. Из-за малых габаритных размеров изделия заряд ВКС достаточно сложно разместить в центральном теле воздухозаборного устройства, поэтому в данном случае использована так называемая тянущая схема двигателя [6, 7], когда ГГ 7 располагается за КД 3, а реактивное сопло 6 выполняется кольцевым. Образующиеся в результате первичного горения ПГ поступают по газоводу 4 в КД 3, где происходит их дожигание с воздухом. Для обеспечения необходимой прочности и жесткости конструкции в КД расположены передний 2 и задний 5 ряды пилонов, которые соединяют газовод 4 с внешней обечайкой КД. В результате дожигания ПГ с воздухом образуется высокотемпературное рабочее тело, которое ускоряется в реактивном сопле 6 и создает тягу.

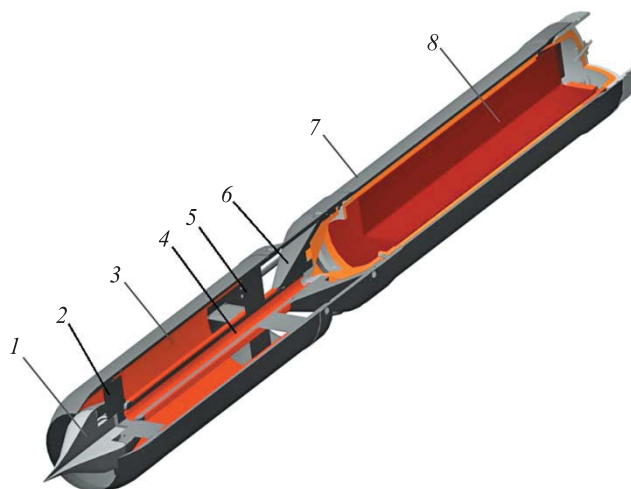


Рис. 1. Схема осесимметричного ПВРД

Одной из проблем при создании ПВРД рассмотренной схемы является обеспечение работоспособности конструкции в течение требуемого времени в условиях интенсивных теплового и эрозионного воздействий. Отметим, что наиболее нагруженными элементами конструкции проточного тракта являются газовод, обечайка КД, задний ряд пилонов и реактивное сопло.

Интенсивная химико-термическая и механическая эрозия конструктивных элементов проточного тракта определяется следующими факторами:

- высоким уровнем температур в КД ($T_{\text{кд}} = 1500 \dots 2800 \text{ К}$);
- значительным содержанием окислительных элементов в продуктах дожигания ПГ;
- большим количеством конденсированной фазы в ПГ (до 70 % по массе) и в продуктах их последующего дожигания с воздухом (до 10 % по массе).

Настоящая работа посвящена расчетному исследованию возможности снижения интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки КД малоразмерного ПВРД. Проведение исследований такого рода позволяет минимизировать механическую эрозию стенок КД посредством надлежащего проектирования и выбора конфигурации проточного тракта малоразмерных ПВРД газогенераторной схемы.

Исследование выполнено в два этапа. Первый этап направлен на определение режимов смешения струй ПГ с потоком воздуха, обеспечивающих минимизацию интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на газовод и обечайку КД путем выбора параметров течения в выходных отверстиях газовода. Для этого выполнены расчеты в двухмерной постановке при различных соотношениях скоростных напоров воздушного потока и ПГГ на входе в КД, а также при различных углах наклона вектора импульса потока продуктов газификации к оси КД. Второй этап исследования направлен на определение взаимного расположения выходных отверстий газовода и пилонов, которое обеспечивает минимальное воздействие частиц конденсированной фазы на стенки. Расчеты второго этапа выполнены в трехмерной постановке.

Математическая модель. Исследование основано на численном моделировании квазистационарного турбулентного газодинамического течения смеси теплопроводных вязких газов с частицами конденсированной фазы.

Для моделирования двухфазного течения применен комбинированный подход Лагранжа — Эйлера [8], для расчета газовой фазы — система уравнений сохранения массы, энергии и количества движения для смеси воздуха с ПГГ [8]. Система уравнений замыкалась уравнениями состояния идеального газа с переменными теплофизическими свойствами каждой компоненты смеси и параметрической моделью турбулентности ($k-\omega$)-SST [9]. Выбор модели турбулентности ($k-\omega$)-SST был сделан из-за ее более широких возможностей (в частности, возможности плавного перехода от ($k-\omega$)-модели в пристеночной области с низкими числами Re к ($k-\epsilon$)-модели при течении в свободном потоке). Отметим, что данная модель широко используется в области вычислительной газодинамики.

Массовый расход ПГ $m_{\text{ПГ}}$ и массовый расход воздуха $m_{\text{в}}$ связаны следующим соотношением:

$$\frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{ПГ}}} = \alpha L_0. \quad (1)$$

Здесь α — коэффициент избытка воздуха; L_0 — стехиометрическое соотношение для смеси ПГ и воздуха.

Влияние экзотермических реакций на течение в КД имитировалось путем введения источников члена S_e в уравнение энергии [10]. Для области, где происходит дожигание ПГ с воздухом, значения S_e соответствуют объемному тепловыделению Q_v , в остальной части проточного тракта $S_e = 0$. Для вычисления объемного тепловыделения использовалась зависимость

$$Q_v = \frac{\eta H_u m_{\text{ПГ}}}{V}, \quad (2)$$

где η — коэффициент полноты сгорания ПГ в КД; H_u — массовая теплота дожигания ПГ; V — характерный объем, в котором происходит дожигание ПГ.

В расчетах принято, что $\alpha = 2,7$; $L_0 = 7,16$; $\eta = 0,6-0,7$; $H_u = 3,5$ МДж/кг. Указанные значения характерны для режимов работы малоразмерных ПВРД с использованием современных ВКС.

В расчетах учтено, что теплофизические свойства воздуха и ППГ (удельная теплоемкость, вязкость и теплопроводность) зависят от температуры. Указанные теплофизические параметры определяются путем интерполяции значений, полученных с помощью программного комплекса TERRA [11].

Моделирование двухфазного течения выполнено для расчетной области, максимально приближенной к характерной конфигурации проточного тракта малоразмерного ПВРД. Схема расчетной области приведена на рис. 2. Внешний диаметр КД ~ 100 мм, длина КД 500 мм. Для возможности последующего анализа, стенки проточного тракта разделены на несколько участков: обечайка 3 КД, газовод 5, внешняя 6 и внутренняя 7 части сопла. Область 4 объемного тепловыделения отмечена штриховой линией. Кроме того, показаны характерные сечения: сечение 1 (площадью F_1), через которое реализуется подвод воздуха, и сечение 2 (площадью F_2) для подачи в КД продуктов газификации. Сечение 2 соответствует выходным отверстиям газовода. Отметим, что за соплом расположен присоединенный объем, необходимый для надлежащего моделирования течения, который ограничен выходными проницаемыми поверхностями 8.

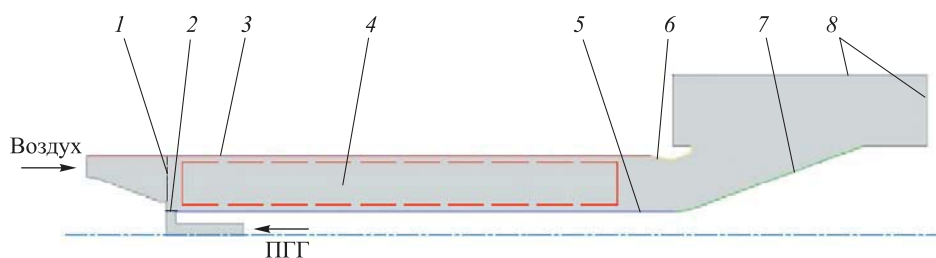


Рис. 2. Расчетная схема проточного тракта

Основным параметром, определяющим интенсивность смешения в КД, является значение отношения скоростного напора потока ППГ в выходном сечении 2 отверстий газовода к скоростному напору потока воздуха в характерном сечении 1 (см. рис. 2):

$$q_{\text{отн}} = \frac{F_1 \iint \rho |\mathbf{u}|^2 dF}{F_2 \iint \rho |\mathbf{u}|^2 dF}, \quad (3)$$

где \mathbf{u} — вектор скорости газа; ρ — плотность газа.

В соответствии с комбинированным подходом Лагранжа — Эйлера частицы в расчетах рассматриваются как дискретная фаза. Учитывая, что в реальном случае поток содержит большое количество индивидуальных частиц, для оптимизации процесса вычислений целесообразно вводить некоторые упрощения. В настоящей работе принято, что все частицы одного диаметра, находящиеся в начальный момент времени в одной расчетной ячейке, объединяются в кластер. Дальнейшие вычисления проводятся для кластера целиком и основаны на допущении, что траектории всех частиц в кластере совпадают. Траектории частиц i -го кластера определяются путем интегрирования вектора скорости частиц по времени при их движении в газовом потоке. Для этого решается следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\mathbf{u}_{pi}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{C_{xi} \rho}{d_{pi} \rho_p} \frac{(\mathbf{u} - \mathbf{u}_{pi}) |\mathbf{u} - \mathbf{u}_{pi}|}{2}, \quad (4)$$

где \mathbf{u}_{pi} — вектор скорости частиц в i -м кластере; t — время; C_{xi} — коэффициент газодинамического сопротивления частиц в i -м кластере; d_{pi} — диаметр частиц в i -м кластере; ρ_p — плотность материала частиц.

Коэффициент газодинамического сопротивления частиц определяется по формуле

$$C_x = a_1 + \frac{a_2}{\text{Re}} + \frac{a_3}{\text{Re}^2}, \quad (5)$$

где a_1 , a_2 и a_3 — константы, определяемые на отдельных диапазонах чисел Re [12].

Моделирование проведено для четырех фракций частиц, диаметры, массовые доли g_i и относительное количество n_i которых приведены в таблице. Плотность частиц $\rho_p = 2300 \text{ кг/м}^3$, что соответствует плотности ПГК.

Фракции частиц дисперсной фазы (ПГК)

Номер фракции	d_{pi} , мкм	g_i	n_i
1	1	0,10	0,852
2	3	0,40	0,126
3	5	0,30	0,020
4	10	0,20	0,002

Массовая концентрация частиц конденсированной фазы в ПГГ и в потоке (ПГГ + воздух) составляет 50 и 2,59 %.

Для выполнения количественного анализа интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта введем следующие критерии: I_{Σ} — интегральная относительная интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КД; U_1 — средняя плотность потока энергии при ударе одной частицы.

Оценка значений I_{Σ} и U_1 выполняется с учетом допущения, что в процессе взаимодействия частицы со стенкой часть энергии, которая соответствует работе, расходуемой на механическую эрозию, пропорциональна квадрату произведения модуля скорости частицы и синуса угла β наклона вектора скорости частицы к поверхности. В этом случае значение I_{Σ} показывает, какая часть начальной кинетической энергии частиц, инжектируемых в КД, может преобразоваться в работу по механической эрозии стенок. Для оценки I_{Σ} в работе использовано уравнение

$$I_{\Sigma} = \frac{1}{u_{кр}^2} \sum_{i=1}^4 \frac{g_i \sum_{j=1}^{N_i} [|\mathbf{u}_{pi}|_j \sin \beta]^2}{K_i}, \quad (6)$$

где $u_{кр}$ — скорость частиц ПГК в выходном отверстии газоведа; N_i — количество кластеров частиц i -й фракции, попадающих на стенки; K_i — суммарное количество кластеров частиц i -й фракции.

Для моделирования локальной деструкции поверхности КД наиболее важным показателем является средняя плотность потока энергии при ударе частиц. Для расчета U_1 используется следующая зависимость:

$$U_1 = \frac{E_1}{\tau F}, \quad (7)$$

где E_1 — средняя энергия одного удара частицы о стенку; τ — характерное время взаимодействия частицы со стенкой [13]; F — характерная площадь контакта частицы при ударе [14]. С учетом сделанных допущений средняя энергия одного удара частицы о стенку может быть вычислена из уравнения:

$$E_1 = \sum_{i=1}^4 \frac{\rho_p \pi d_{pi}^3}{6} \frac{n_i \sum_{j=1}^{N_i} [|\mathbf{u}_{pi}|_j \sin \beta]^2}{2K_i}. \quad (8)$$

В общем случае τ и F зависят от комплекса свойств материалов стенок КД и частиц конденсированной фазы ПГ, а также от режимов взаимодействия. Для оценок энергетических характеристик взаимодействия частиц со стенками примем следующие допущения:

$$\tau \approx \frac{2d_{pi}}{|\mathbf{u}_{pi}|_j \cos \beta}; \quad (9)$$

$$F \approx \frac{\pi d_{pi}^2}{4}. \quad (10)$$

Для численного моделирования двухфазного течения использовались неструктурированные расчетные сетки, примеры которых приведены на рис. 3. В частности, на рис. 3, а показана расчетная сетка для двухмерной задачи (общее количество расчетных ячеек более 0,3 млн), а на рис. 3, б — для трехмерной задачи (общее количество расчетных ячеек более 10 млн). Красным цветом выделена зона, где реализуется объемное тепловыделение. Расчетные сетки сгущены к стенкам и в областях с наиболее высоким уровнем градиентов газодинамических параметров течения.

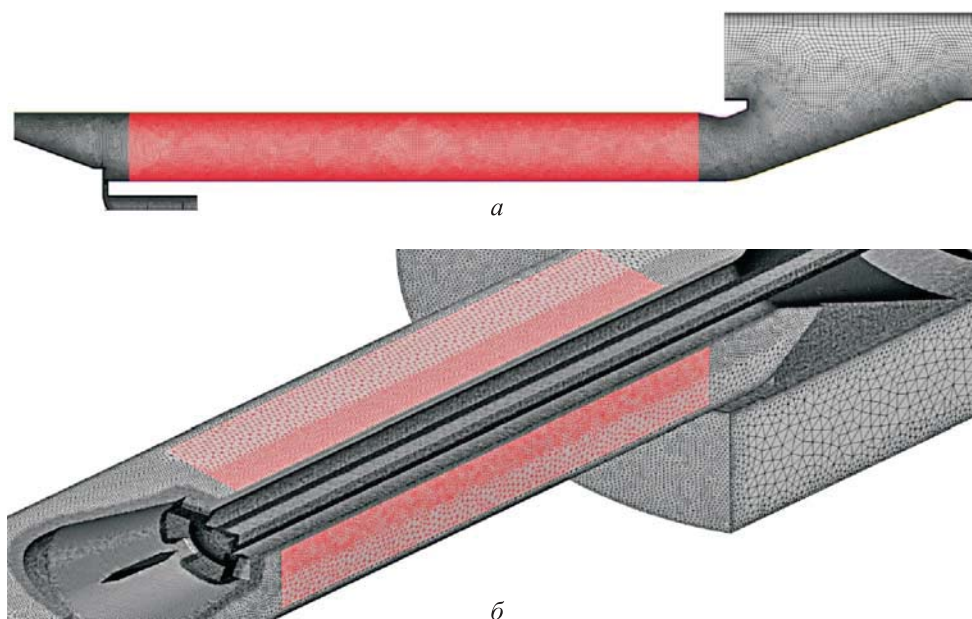


Рис. 3. Примеры расчетных сеток для моделирования двухфазного течения в двухмерной (а) и в трехмерной (б) постановке

При проведении расчетного исследования использованы следующие граничные условия. Во входных сечениях подвода воздуха и ПГГ (см. рис. 2) заданы температуры T^* торможения и массовые расходы этих компонентов. На выходных поверхностях расчетной области выполняется условие нераспространения малых возмущений против потока. Стенки считаются адиабатными, проскальзывание на них отсутствует. На стенках КД задано условие «прилипания» частиц (удар принимается абсолютно неупругим). Внутри проточного тракта газоведа для частиц задается условие абсолютно упругого отражения от стенок.

Разработанная математическая модель дает возможность исследовать характер двухфазного потока в проточном тракте малоразмерного ПВРД и оценивать интенсивность эрозионного воздействия конденсированной фазы на стенки КД.

Результаты математического моделирования. Двухмерное математическое моделирование проведено для диапазона изменения относительного скоростного напора $q_{\text{отн}} = 2,1 \dots 8,4$ при инъекции ПГГ под различными углами γ к оси малоразмерного ПВРД.

Сначала рассмотрим результаты моделирования течения в проточном тракте КД при радиальной инъекции ПГГ и различных $q_{\text{отн}}$. Следует отметить, что варьирование $q_{\text{отн}}$ реализовывалось посредством изменения площади выходного сечения отверстий газоведа при сохранении массовых расходов ПГГ и воздуха.

Пример моделирования газодинамического течения в проточном тракте малоразмерного ПВРД при радиальной подаче ПГГ в воздушный поток приведен на рис. 4. Здесь показаны характерные распределения числа Маха и массовой доли ПГГ. Отметим следующие особенности течения в КД. Для всех рассмотренных режимов скорость воздушного потока в области входного сечения КД соответствует числу Маха $M = 0,7$, что определяется геометрической конфигурацией проточного тракта и уровнем теплоподвода в КД. Достаточно высокая интенсивность струи ПГГ в области выходных отверстий газоведа приводит к возникновению отрыва воздушного потока от стенок центрального тела КД и образованию двух вихревых зон: непосредственно перед струей ПГГ и за ней. Далее по тракту скорость потока

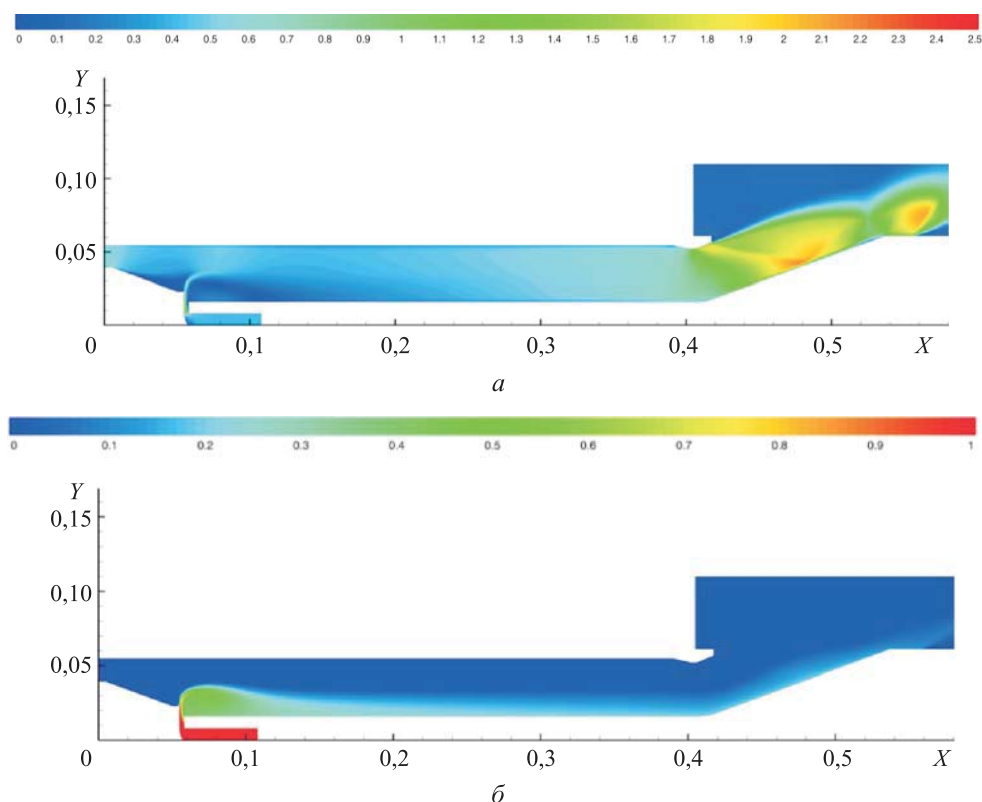


Рис. 4. Распределение числа Маха (*a*) и массовой доли ПГГ (*б*) в поперечном сечении КД

выравнивается. В реактивном сопле газ разгоняется до скоростей, соответствующих $M = 2-2,5$.

Наиболее значительные отличия структуры течения для рассматриваемого диапазона $q_{отн}$ проявляются в области выходных отверстий газовада (рис. 5), где реализуется инжекция ПГГ в воздушный поток. На режиме $q_{отн} = 2,1$ в выходных отверстиях газовада имеет место существенная скоростная неравномерность, приводящая к образованию отрыва потока от стенок. При таком характере течения возможно даже попадание воздуха в проточный тракт газовада. В этом случае не исключено возникновение очагов горения в газоваде и значительное повышение теплового воздействия на выходные отверстия газовада. При этом реализуются условия для распространения малых возмущений в газовад, которые негативно сказываются на постоянстве массового расхода ПГГ и, соответственно, устойчивости рабочего процесса в КД [15]. С повышением $q_{отн}$ в выходных отверстиях газовада отрыв потока от стенок уменьшается и при $q_{отн} = 8,4$ пропадает. По мере удаления от места инжекции ПГГ постепенно сме-

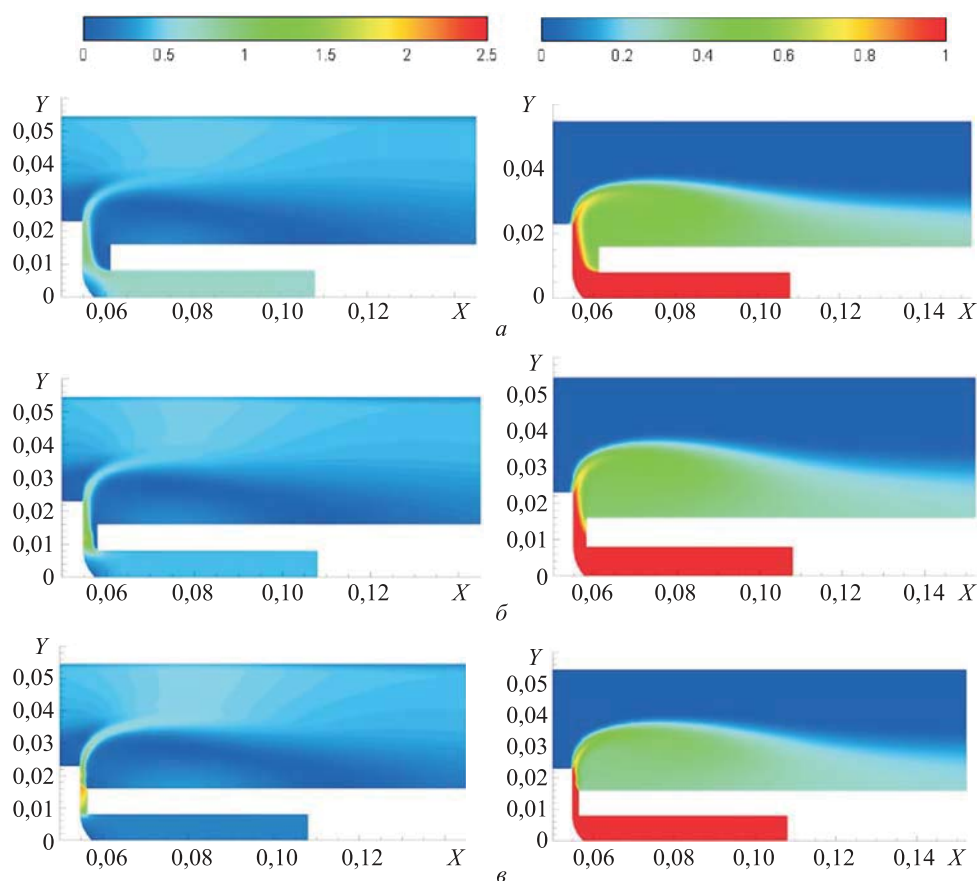


Рис. 5. Распределение числа Маха (слева) и массовой доли ПГГ (справа) в области выходных отверстий газовада при $q_{отн} = 2,1$ (а), 4,2 (б) и 8,4 (в)

шиваются с воздухом. Наиболее интенсивное смешение при радиальной инжекции ПГГ наблюдается для режимов с большими значениями $q_{отн}$, поскольку для этого случая характерны максимальные значения глубины проникновения ПГГ в воздушный поток. Следует отметить, что радиальная подача ПГГ при высоких значениях $q_{отн}$ способствует турбулизации воздушного потока и интенсификации смешения.

Траектории движения частиц различной дисперсности в проточном тракте КД для рассмотренных режимов инжекции ПГГ приведены на рис. 6. При $q_{отн} = 2,1$ ~50 % частиц диаметром 10 мкм попадают на стенки КД, из которых 23 % — на внешнюю обечайку, 27 % — на стенки сопла. Увеличение $q_{отн}$ существенно меняет эти соотношения. В частности, при $q_{отн} = 8,4$ все частицы диаметром 10 мкм попадают на внешнюю обечайку КД. При этом область взаимодействия частиц со стенкой обечайки КД локализуется в узкой полосе, расположенной практически напротив выходных отверстий газоведа. Это приводит к существенной интенсификации эрозии и повышению вероятности разрушения стенки внешней обечайки КД. Следует отметить, что для рассмотренных режимов частицы с диаметрами 1, 3 и 5 мкм на стенки КД не попадают и выносятся потоком через сопло.

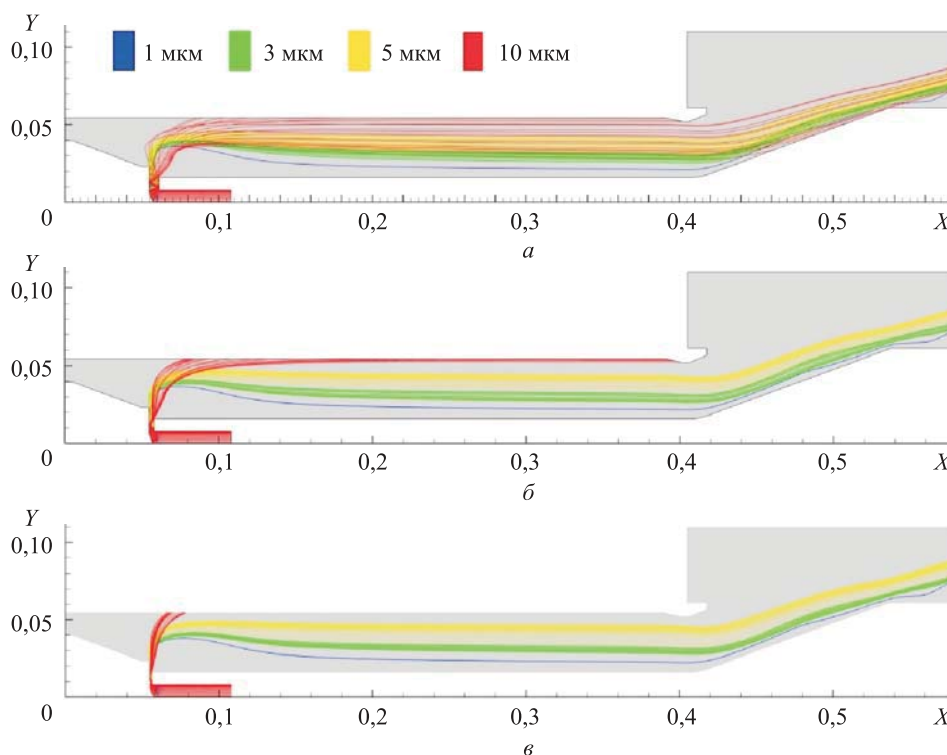


Рис. 6. Траектории движения частиц ПГК в проточном тракте КД при $q_{отн} = 2,1$ (а), 4,2 (б) и 8,4 (в)

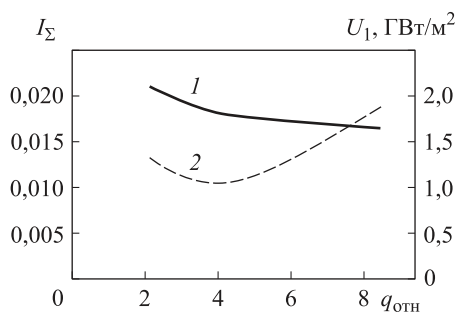


Рис. 7. Зависимости I_{Σ} (1) и U_1 (2) от $q_{отн}$

Рассмотрим результаты количественного анализа интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта (рис. 7). Интегральная относительная интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КД $I_{\Sigma} = 0,017-0,021$ для режимов $q_{отн} = 2,1-8,4$. С увеличением $q_{отн}$ значения I_{Σ} незначительно снижаются. Однако средняя плотность потока энергии при ударе частиц имеет локальный минимум

$U_1 \approx 1,05$ ГВт/м² при $q_{отн} \approx 4,2$. Из этого следует, что особенности взаимодействия потоков воздуха и ПГ на данном режиме могут позволить минимизировать эрозию стенок КД и сопла, в силу чего для дальнейшего исследования в качестве базового значения относительного скоростного напора выбрано $q_{отн} = 4,2$.

Для выбранного базового значения относительного скоростного напора проведено параметрическое исследование влияния угла γ наклона струи ПГ к оси КД на характер течения в проточном тракте. Дополнительно к $\gamma = 90^\circ$ рассмотрены углы $\gamma = 45^\circ$ и $\gamma = 0$ (инжекция параллельно оси).

Влияние угла γ на структуру течения газа можно оценить по следующим показателям. Инжекция ПГ под углом $\gamma = 45^\circ$ к оси КД позволяет минимизировать отрывные зоны в области выходных отверстий газовада (рис. 8). Однако интенсивность смешения с воздухом снижается относительно радиальной инъекции ПГ. Следует отметить, что при $\gamma = 0$ (инжекция параллельно оси) поток ПГ

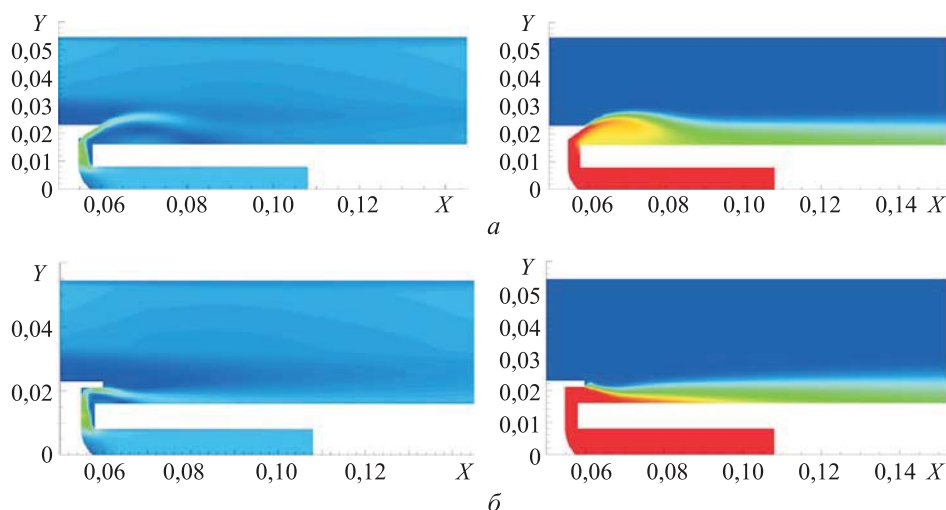


Рис. 8. Распределение числа Маха (слева) и массовой доли ПГГ (справа) в области выходных отверстий газовада при $\gamma = 45^\circ$ (а) и 0 (б)

«прилипает» к стенке газовада. Это может привести к неэффективному сгоранию ПГ в воздухе [16, 17], с одной стороны, и к повышению тепловых нагрузок на стенки газовада, с другой.

Траектории движения частиц различной дисперсности в проточном тракте КД приведены на рис. 9. Отметим, что на характер траекторий движения частиц существенное влияние может оказывать предыстория их взаимодействия со стенками отверстий газовада. Получено, что инжекция при $\gamma = 0$ (рис. 9, б) позволяет избежать попадания частиц конденсированной фазы на стенку обечайки КД. При этом в случае инжекции ПГ под углом $\gamma = 45^\circ$ ~20 % частиц диаметрами 3, 5 и 10 мкм могут попадать на стенки газовада и сопла. Однако интегральная относительная интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КД I_Σ меньше на 8 %, чем для радиальной подачи ПГ. Кроме того, подача под углом $\gamma = 45^\circ$ позволяет уменьшить на 5 % среднюю плотность потока энергии при ударе одной частицы. Инжекция ПГ параллельно оси приводит к значительному (в ~2 раза) увеличению количества частиц, попадающих на стенки газовада и сопла с соответствующим увеличением I_Σ и U_1 . Кроме того, в случае инжекции ПГ параллельно оси, траектории движения частиц сконцентрированы вблизи стенки газовада, что негативно сказывается на эффективности их горения с воздухом [18, 19]. Учитывая это, инжекция ПГ параллельно оси в рассматриваемой конфигурации КД малоразмерного ПВРД представляется нецелесообразной.

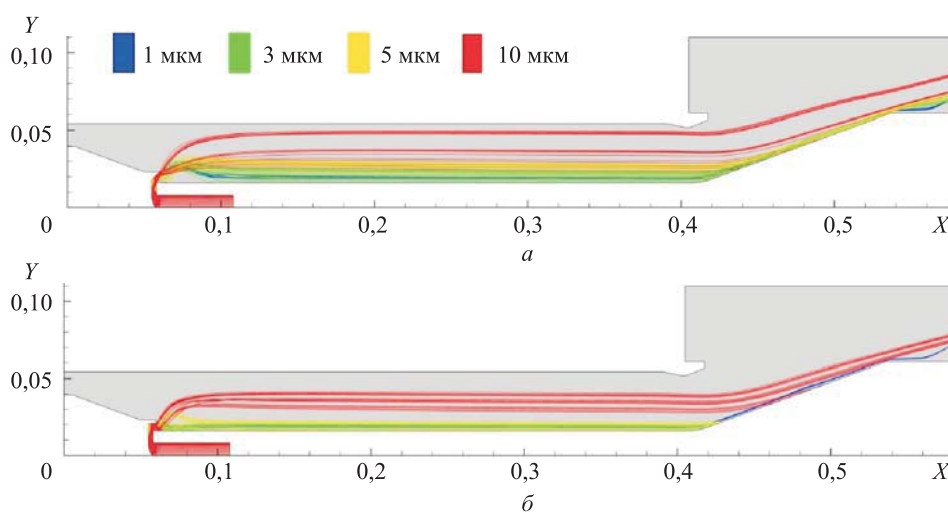


Рис. 9. Траектории движения частиц конденсированной фазы в проточном тракте КД при $\gamma = 45^\circ$ (а) и 0 (б)

Анализ приведенных данных показал, что для дальнейшего исследования и проведения трехмерного моделирования целесообразно рассмотреть вариант, когда $q_{отн} = 4,2$ и $\gamma = 45^\circ$. В этом случае удастся обеспечить удовлетворительное смещение в КД и минимизировать интенсивность воздействия частиц конденсированной фазы на стенки.

Трехмерное моделирование двухфазного течения в КД выполнено для конфигураций проточного тракта с расположением в переднем и заднем рядах трех пилонов (в каждом). Отметим, что расчеты, проведенные в двухмерной постановке, позволяют определить параметры течения в проточном тракте КД, соответствующем подаче ПГ через кольцевое выходное отверстие (кольцевую щель) газовада. Для проточного тракта, приближенного к конструктивному исполнению КД малоразмерных ПВРД, подача ПГ обычно осуществляется через несколько секторных отверстий, между которыми располагаются силовые перегородки. Учитывая необходимость симметричного расположения отверстий относительно пилонов, рассмотрены варианты с тремя (схема «3-3») и шестью (схема «3-6») выходными отверстиями газовада (рис. 10).

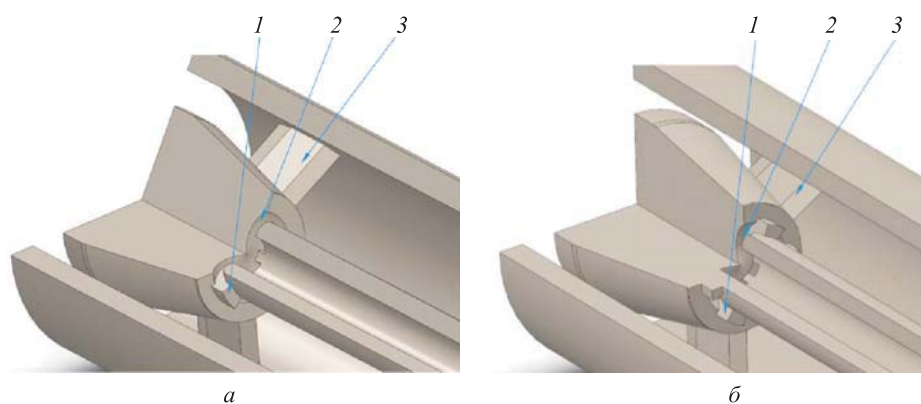


Рис. 10. Конфигурация выходных отверстий газовада по схемам «3-3» (а) и «3-6» (б):
1 — перегородки; 2 — выходные отверстия; 3 — пилоны переднего ряда

Полученные результаты показывают, что структуры течения в случае инжекции ПГ через секторные и кольцевые отверстия несколько различаются. В частности, для секторных отверстий (рис. 11) наблюдается более интенсивное проникновение ПГГ в проточный тракт КД. При этом изменение числа отверстий слабо влияет на равномерность смешения ПГГ с воздушным потоком.

Для схемы «3-3» (рис. 12, а) поток ПГГ практически не попадает на пилоны второго ряда. Реализуемое распределение ПГГ в поперечных сечениях КД позволяет избежать воздействия высокотемпературных продуктов сгорания на пилоны, что может обеспечить повышение ресурсных характеристик ПВРД. Во втором случае (схема «3-6») потоки ПГГ из трех отверстий попадают на пилоны второго ряда (рис. 12, б), что приводит к увеличению теплового воздействия на них.

Рассмотрим особенности движения частиц конденсированной фазы в проточном тракте КД, выполненного по схеме «3-3». На рис. 13 приведено распределение траекторий частиц в области инжекции ПГ в воздушный поток и в области реактивного сопла. Траектории движения частиц образуют три жгута, причем зоны, заполненные частицами, занимают достаточно большую часть площади поперечного сечения КД. Общие закономерности движения частиц

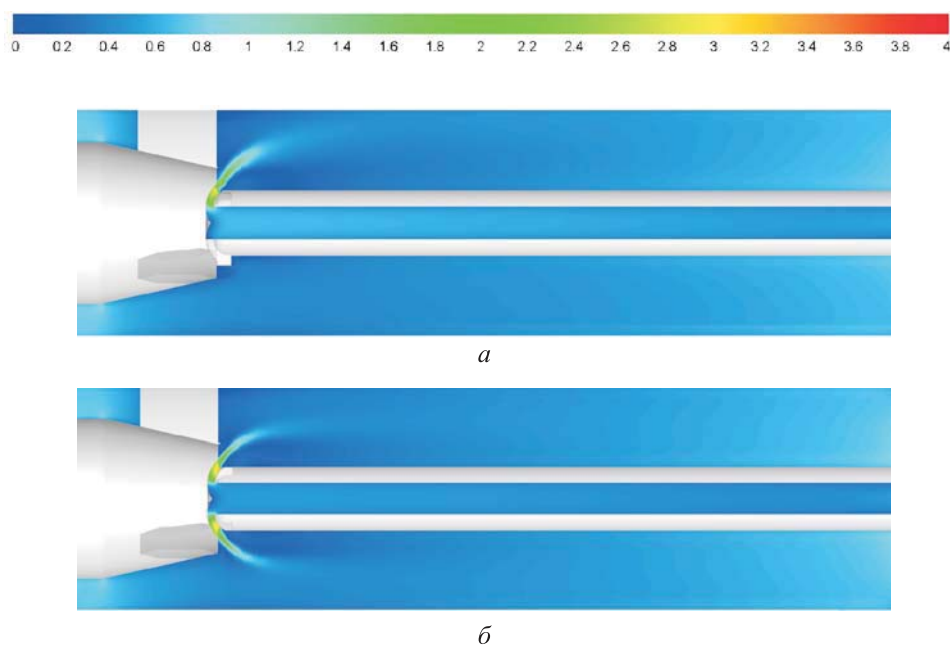


Рис. 11. Распределение чисел Маха в проточном тракте КД при секторной подаче ПГ для схем «3-3» (а) и «3-6» (б)

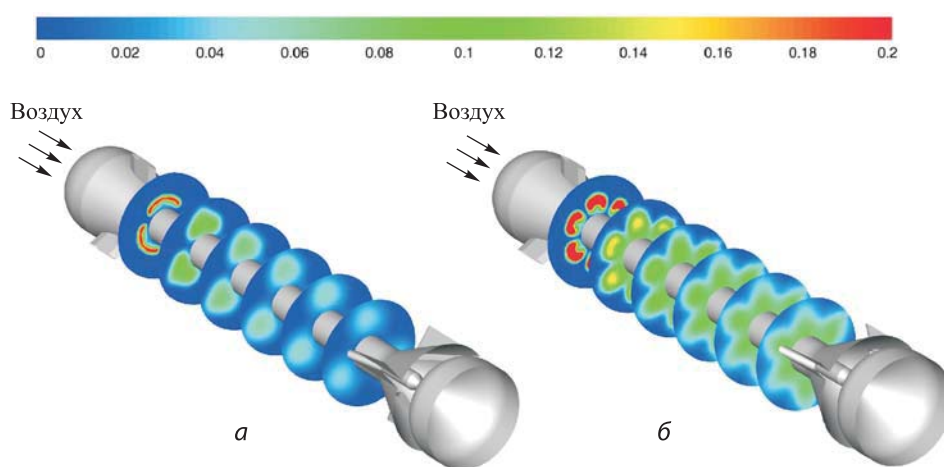


Рис. 12. Распределение массовой доли продуктов ПГГ в поперечных сечениях проточного тракта КД при секторной подаче ПГ для схем «3-3» (а) и «3-6» (б)

заканчиваются в следующем. Траектории самых мелких частиц ($d_{pi} = 1$ мкм) практически совпадают с линиями тока газа. Поэтому для частиц диаметром 1 мкм характерно участие в вихревом движении газа, обусловленном закруткой при взаимодействии струи ПГ с воздушным потоком. Частицы большего диаметра имеют существенно более высокую инертность, что приводит к их разлету на начальном участке КД.

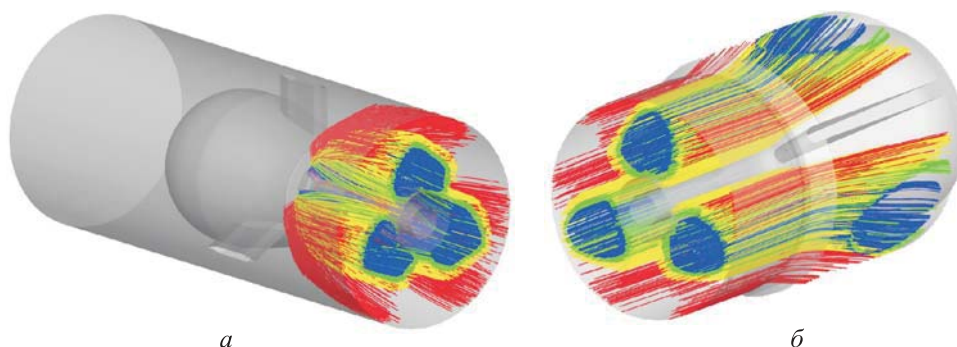


Рис. 13. Распределение траекторий частиц в области инъекции ПГ (а) и в области реактивного сопла (б) для схемы «3-3»

В соответствии с полученными результатами отмечено, что частицы диаметром 1, 3 и 5 мкм не взаимодействуют со стенками КД и сопла. Однако примерно 25 % частиц диаметром 10 мкм попадает на стенки КД и сопла, что удовлетворительно коррелирует с результатами моделирования в двухмерной постановке. Что касается пилонов второго ряда, то в схеме с тремя выходными отверстиями газоваода частицы всех рассмотренных фракций на них не попадают.

■ 1 мкм ■ 3 мкм ■ 5 мкм ■ 10 мкм

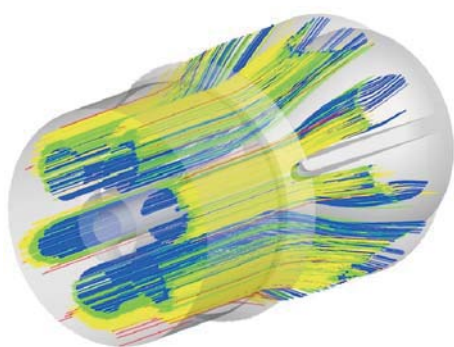


Рис. 14. Распределение траекторий частиц в области реактивного сопла для схемы «3-6»

При увеличении числа выходных отверстий газоваода от трех до шести траектории движения частиц меняются. Ввиду сужения выходных отверстий газоваода ширина жгутов уменьшается. Причем частицы конденсированной фазы более равномерно распределяются по тракту, однако некоторое количество частиц диаметрами 1...5 мкм (~12 %) попадает на стенки второго ряда пилонов (рис. 14). Последнее обусловлено схемой взаимного положения выходных отверстий и пилонов второго ряда: пилоны расположены в следе трех из шести отверстий. Кроме того, вследствие более «узкого» разлета частиц из выходных отверстий газоваода практически все частицы диаметром 10 мкм попадают на внешнюю обечайку КД.

Оптимизация геометрических параметров выходных отверстий газоваода с помощью математического моделирования двухфазного течения в камере дожигания малоразмерного ПВРД тянущей схемы позволяет существенно изменить общую картину пространственного распределения частиц конденсированного горючего в камере дожигания двигателя. При этом становится возможным уменьшить эрозионное и тепловое воздействие этих частиц на элементы конструкции двигателя.

Заключение. В результате выполненного математического моделирования получены следующие закономерности взаимодействия с элементами конструкции КД частиц, поступающих из ГГ (через выходные отверстия газоведа).

1. Интенсивность взаимодействия частиц со стенками КД в значительной степени зависит от относительного скоростного напора $q_{отн}$. В частности, в схеме с радиальным направлением потока ПГ при $q_{отн} = 2,1$ ~50 % частиц диаметром 10 мкм попадают на стенки КД, из которых 22 % — на внешнюю обечайку, 27 % — на стенки сопла. Повышение $q_{отн}$ приводит к увеличению количества частиц, попадающих на обечайку КД и стенки сопла. Для рассмотренных режимов частицы с диаметрами 1, 3 и 5 мкм на стенки КД не попадают и выносятся потоком через сопло.

2. Интегральная относительная интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КД для режимов $q_{отн} = 2,1-8,4$ составляет $I_{\Sigma} = 0,017-0,021$. С повышением $q_{отн}$ значения I_{Σ} уменьшаются. Средняя плотность потока энергии при ударе одной частицы имеет локальный минимум $U_1 \approx 1,05$ ГВт/м² при $q_{отн} \approx 4,2$, что обеспечивает минимальную эрозию стенок на этом режиме инъекции ПГ.

3. Инжекция ПГ под углом γ к оси КД позволяет заметно снизить вероятность попадания частиц на стенку внешней обечайки КД. Для рассмотренной конфигурации проточного тракта малоразмерного ПВРД минимальное воздействие частиц конденсированной фазы на стенки КД получено для $\gamma = 45^\circ$. Такой вариант подачи ПГ в КД позволяет уменьшить на 8 % интегральную относительную интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КД и на 5 % среднюю плотность потока энергии при ударе одной частицы относительно радиальной инъекции ПГ.

4. Инжекция ПГ параллельно оси КД ($\gamma = 0$) приводит к значительному повышению количества частиц, попадающих на стенки газоведа и сопла с соответствующим увеличением I_{Σ} и U_1 .

5. Для схем ПВРД с подачей ПГ через секторные отверстия газоведа выявлены следующие особенности. Минимальное воздействие конденсированной фазы на элементы конструкции КД может быть получено в случае трех отверстий. Конфигурация проточного тракта с тремя отверстиями относительно конфигурации с шестью отверстиями позволяет уменьшить в 4 раза количество частиц (диаметром 10 мкм), попадающих на стенки КД и сопла, а также избежать интенсивного эрозионного воздействия ПГК на пилоны второго ряда.

Полученные данные могут быть использованы на этапе предварительного проектирования и выбора конфигурации проточного тракта малоразмерных ПВРД газогенераторной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Haddad A., Natan B., Arieli R. The performance of a boron-loaded gel-fuel ramjet // Progress in Propulsion Physics. 2011. No. 2. P. 499–518.

2. Основные направления разработки твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей с повышенными энергобаллистическими характеристиками / Н.М. Вареных, А.И. Шабунин, В.И. Сарабьев, М.В. Хрисантов, С.В. Шибанов, С.В. Калинин // *Боеприпасы и спецхимия*. 2013. № 1. С. 44–50.
3. Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей / В.Н. Бакулин, Н.Ф. Дубовкин, В.Н. Котова, В.А. Сорокин, В.П. Францкевич, Л.С. Яновский. М.: Физматлит, 2009. 320 с.
4. Яновский Л.С., ред. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. М.: Академкнига, 2006. 343 с.
5. Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance assessment for a throttleable ducted rocket powered lower tier interceptor // 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf. AIAA 2015-4234. DOI: 10.2514/6.2015-4234
6. Макаровец Н.А., Белобрагин Б.А., Устинкин А.И. и др. Активно-реактивный снаряд. Патент РФ RU 2 546 355 С1. Заявл. 13.05.2014, опубл. 10.04.2015.
7. Макаровец Н.А., Иванов И.В., Долганов М.Е. и др. Ракета с воздушно-реактивным двигателем. Патент РФ RU 2 585 211 С1. Заявл. 2015.05.13, опубл. 27.05.2016.
8. Воронцовский А.В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2016. № 1. URL: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/71>
9. Menter F.R., Kuntz M., Bender R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions // AIAA Paper 2003-0767. DOI: 10.2514/6.2003-767
10. Адаптация САЕ-системы ANSYS для моделирования горения частиц конденсированного горючего в камерах дожигания РПД / А.В. Воронцовский, П.Д. Токталиев, С.А. Сучков, К.Ю. Арефьев, А.А. Гусев // *Материалы Всероссийской научно-технической конференции «Ракетно-космические двигательные установки»*. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2015. С. 95–96.
11. Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах // III Международный симпозиум «Горение и плазмохимия». Алма-Ата, Казахстан, 2005. С. 52–57.
12. Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems // *J. Fluid Mech.* 1972. Vol. 55. No. 2. P. 193–208.
13. Арефьев К.Ю. Моделирование упругопластических деформаций конденсированных частиц при взаимодействии сверхзвукового двухфазного потока с преградой // *Машиностроение и компьютерные технологии*. 2011. № 8. URL: <http://engineering-science.ru/doc/216784.html>
14. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. М.: Физматлит, 2010. 536 с.
15. Ильченко М.А. Устойчивость рабочего процесса в двигателях летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 320 с.
16. Aver'kov I.S., Aleksandrov V.Yu., Arefev K.Yu., Voronetskii A.V., et al. The influence of combustion efficiency on the characteristics of ramjets // *High Temperature*. 2016. Vol. 54. No. 6. P. 882–891. DOI: 10.1134/S0018151X16050047 URL: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0018151X16050047>

17. Van Wie D., D'Alessio S., White M. Hypersonic airbreathing propulsion // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2005. Vol. 26. No. 4. P. 430–437.

18. Гремячкин В.М., Михальчук М.В. К теории горения частицы бора в воздухе // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2014. Т. 15. № 5.
URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/250>

19. Ягодников Д.А. Воспламенение и горение порошкообразных металлов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 432 с.

Воронецкий Андрей Владимирович — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Смоляга Владимир Иванович — заместитель начальника отдела АО «НПО «Сплав» (Российская Федерация, 300004, г. Тула, ул. Щегловская засека, д. 33).

Арефьев Константин Юрьевич — канд. техн. наук, научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Филимонов Лев Александрович — научный сотрудник НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Абрамов Максим Александрович — инженер НИИ энергетического машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронецкий А.В., Смоляга В.И., Арефьев К.Ю., Филимонов Л.А., Абрамов М.А. Исследование интенсивности взаимодействия частиц конденсированной фазы с элементами проточного тракта малоразмерного прямого воздушного реактивного двигателя // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 4. С. 16–36.

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-16-36

INVESTIGATING INTERACTION INTENSITY BETWEEN CONDENSED PHASE PARTICLES AND FLOW DUCT COMPONENTS OF A SMALL-SCALE RAMJET

A.V. Voronetskiy¹

V.I. Smolyaga²

K.Yu. Aref'ev¹

L.A. Filimonov¹

M.A. Abramov¹

voron@bmstu.ru

jagersw@yandex.ru

arefyev@rambler.ru

lfilimonov@mail.ru

abramovmaks94@gmail.com

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² Scientific and Production Association SPLAV, Tula, Russian Federation

Abstract

The study deals with mathematical simulation of a two-phase flow in secondary combustion chambers of small-scale ramjets. We present a mathematical model for numerically computing motion trajectories of condensed phase particles in the flow duct of a small-scale ramjet and determining the intensity with which particles characterised by different dispersities affect the secondary combustion chamber walls. We provide the results of our parametric computational investigation of how the particles impact the flow duct walls in the secondary combustion chamber (that is, erosion of said walls) depending on the mode of injecting gaseous products of high-energy condensed compositions into the airflow and on the injection system outlet layout. We formulated recommendations for minimising the effect that condensed phase particles have on the flow duct components of a small-scale ramjet

Keywords

Mathematical simulation, two-phase flow, condensed particles, erosion, ramjet

Received 05.07.2017

© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Haddad A., Natan B., Arieli R. The performance of a boron-loaded gel-fuel ramjet. *Progress in Propulsion Physics*, 2011, no. 2, pp. 499–518.
- [2] Varenikh N.M., Shabunin A.I., Sarab'ev V.I., et al. The main directions of solid pyrotechnic propellants for high power-ballistic ramjet. *Boepripasy i spetskimiya*, 2013, no. 1, pp. 44–50 (in Russ.).
- [3] Yanovskiy L.S., ed. *Energoemkie goryuchie dlya aviatsionnykh i raketnykh dvigateley* [Power-consuming fuel for ramjet and rocket engines]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009. 320 p.
- [4] Yanovskiy L.S., ed. *Integral'nye pryamotokhnnye vozdušno-reaktivnye dvigateli na tverdyykh toplivakh* [Integrated solid propellant ramjets]. Moscow, Akademkniga Publ., 2006. 343 p.
- [5] Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance assessment for a throttleable ducted rocket powered lower tier interceptor. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf.* AIAA 2015-4234. DOI: 10.2514/6.2015-4234
- [6] Makarovets N.A., Belobragin B.A., Ustinkin A.I., et al. Aktivno-reaktivnyy snaryad [Rocket assisted projectile]. Patent RF RU 2 546 355 C1. App. 13.05.2014, publ. 10.04.2015.
- [7] Makarovets N.A., Ivanov I.V., Dolganov M.E., et al. Raketa s vozdušno-reaktivnym dvigatelem [Missile with ramjet]. Patent RF RU 2 585 211 C1. App. 2015.05.13, publ. 27.05.2016.
- [8] Voronetskiy A.V. Method of comparative analysis of highly dispersed condensed fuel combustion efficiency in arbitrary geometry solid propellant ramjet burners. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2016, no. 1 (in Russ.). Available at: <http://technomagelpub.elpub.ru/jour/article/view/71>
- [9] Menter F.R., Kuntz M., Bender R. A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*. DOI: 10.2514/6.2003-767

- [10] Voronetskiy A.V., Toktaliev P.D., Suchkov S.A., Aref'ev K.Yu., Gusev A.A. Adaptation of ANSYS CAE-system for modelling combustion of condensed fuel particles in ramjet afterburners. *Materialy Vserossiyskoy nauch.-tekh. konf. «Raketno-kosmicheskie dvigatel'nye ustanovki»* [Proc. Russ. Sci.-Tech. Conf. "Aerospace propulsion systems"]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2015. Pp. 95–96.
- [11] Trusov B.G. TERRA software system for simulation phase and chemical equilibrium at high temperatures. *III Mezhd. simp. «Gorenie i plazmokhimiya»* [III Int. Symp. "Combustion and plazmochemistry"]. Alma-Ata, Kazakhstan, 2005. Pp. 52–57 (in Russ.).
- [12] Morsi S.A., Alexander A.J. An investigation of particle trajectories in two-phase flow systems. *J. Fluid Mech.*, 1972, vol. 55, no. 2, pp. 193–208.
- [13] Aref'ev K.Yu. Modelling of elasto-plastic strains of the condensed particles in the course of two-phase supersonic stream interaction with a wall. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii* [Mechanical Engineering and Computer Science], 2011, no. 8 (in Russ.). Available at: <http://engineering-science.ru/doc/216784.html>
- [14] Alkhimov A.P., Klinkov S.V., Kosarev V.F., Fomin V.M. Kholodnoe gazodinamicheskoe napylenie [Cold gas spraying]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2010. 536 p.
- [15] Il'chenko M.A. Ustoychivost' rabocheho protsessa v dvigatelyakh letatel'nykh apparatov [Working process stability in aircraft engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1995. 320 p.
- [16] Aver'kov I.S., Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Voronetskii A.V., Gus'kov O.V., Prokhorov A.N., Yanovskii L.S. The influence of combustion efficiency on the characteristics of ramjets. *High Temperature*, 2016, vol. 54, no. 6, pp. 882–891. DOI: 10.1134/S0018151X16050047 Available at: <https://link.springer.com/article/10.1134%2FS0018151X16050047>
- [17] Van Wie D., D'Alessio S., White M. Hypersonic airbreathing propulsion. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2005, vol. 26, no. 4, pp. 430–437.
- [18] Gremyachkin V. M., Mikhal'chuk M.V. Some aspects in the theory of boron combustion. *Fiziko-khimicheskaya kinetika v gazovoy dinamike* [Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics], 2014, vol. 15, no. 5 (in Russ.). Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/250>
- [19] Yagodnikov D.A. Vosplamnenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov [Ignition and combustion of metal powder]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 432 p.

Voronetskiy A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Department, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Smolyaga V.I. — Deputy Head of Department, Scientific and Production Association SPLAV (Scheglovskaya zaseka ul. 33, Tula, 300004 Russian Federation).

Aref'ev K.Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Research Fellow, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University; Assoc. Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Filimonov L.A. — Research Fellow, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Abramov M.A. — Engineer, Scientific Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Voronetskiy A.V., Smolyaga V.I., Arefev K.Yu., Filimonov L.A., Abramov M.A. Investigating Interaction Intensity between Condensed Phase Particles and Flow Duct Components of a Small-Scale Ramjet. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2018, no. 4, pp. 16–36 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3941-2018-4-16-36



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана вышел в свет учебник (4-е издание) под общей редакцией **А.Ю. Вараксина**

«Теория и проектирование газотурбинных и комбинированных установок»

Рассмотрена термодинамическая эффективность газотурбинных и комбинированных установок. Изложены основы проектирования стационарных, транспортных газотурбинных и комбинированных установок, газотурбинных установок на нетрадиционных источниках энергии (солнечных, ветровых). Даны примеры проектирования основных элементов авиационных газотурбинных двигателей. Рассмотрены современные тенденции развития стационарных и транспортных газотурбинных установок и газотурбинных двигателей, сформулированы технико-экономические требования, необходимые при проектировании установок различных типов. Содержание учебника соответствует курсам лекций, которые авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана студентам, обучающимся по специальности «Проектирование авиационных и ракетных двигателей». Для студентов энергетических и авиационных вузов, а также инженерно-технических работников, занимающихся проектированием стационарных, транспортных и авиационных двигателей и установок.

По вопросам приобретения обращайтесь:
105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45
press@bmstu.ru
www.baumanpress.ru