

Параметрическое исследование взаимодействия частиц конденсированной фазы с высокоэнтальпийным потоком воздуха в прямоточной камере сгорания

© А.В. Воронцовский¹, В.И. Смоляга², К.Ю. Арефьев¹,
А.А. Гусев¹, М.А. Абрамов¹

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

²АО «НПО «Сплав», Тула, 300004, Россия

Рассмотрены вопросы математического моделирования рабочего процесса в перспективных энергосиловых установках для внутриатмосферных летательных аппаратов, использующих топлива на основе высокометаллизированных энергоемких композиций (ВЭК). Разработанная и реализованная в специализированном модуле математическая модель позволяет адаптировать программный пакет ANSYS Fluent для проведения имитационного моделирования двухфазного газодинамического течения с учетом горения конденсированных частиц ВЭК в высокоэнтальпийном воздушном потоке. Проведены параметрические расчеты, в результате которых получены закономерности изменения коэффициента полноты сгорания частиц от соотношения компонентов, условий двухфазного смесиобразования и эмпирических констант в законе горения. Рассмотрены случаи подачи частиц как со стенки камеры сгорания, так и по оси потока. Полученные данные могут быть использованы для уточнения эмпирических законов горения конденсированных частиц, прогнозирования завершенности физико-химических процессов в реальных камерах и для разработки рекомендаций по повышению эффективности рабочего процесса в перспективных энергосиловых установках.

Ключевые слова: математическое моделирование, конденсированные частицы горючего, воздушный поток, схема смесиобразования, эмпирический закон горения

Введение. Создание перспективных энергосиловых установок для внутриатмосферных летательных аппаратов связано с использованием топлив на основе высокометаллизированных энергоемких композиций (ВЭК). Следует отметить, что современные ВЭК на 50...70 % по массе [1, 2] состоят из мелкодисперсных порошков энергоемких компонентов (МПЭК) на основе соединений бора, магния, алюминия, углерода.

При использовании ВЭК в прямоточных камерах сгорания (КС) чаще всего проходит двухстадийный рабочий процесс [3, 4], в котором первая стадия заключается в первичном горении (газификации) ВЭК в газогенераторе, а на второй стадии происходит взаимодействие газифицированного ВЭК с высокоэнтальпийным воздушным потоком в КС. Несмотря на то что продукты первичного горения ВЭК содержат конденсированные частицы МПЭК, для их обозначения

ния будем использовать термин «продукты газификации». Отметим, что при надлежущей работе газогенератора эффективность рабочего процесса определяется в первую очередь коэффициентом полноты сгорания продуктов газификации с воздушным потоком [5].

Применение ВЭК требует решения широкого спектра технических проблем, основной из которых является организация эффективного процесса сгорания конденсированных частиц МПЭК в высокоэнтальпийном воздушном потоке.

В энергосиловых установках высокоэнтальпийный воздушный поток обычно ограничен непроницаемыми стенками, формирующими проточный тракт КС. С учетом массогабаритных и прочностных ограничений проточный тракт чаще всего выполняется осесимметричным. Для достижения высоких показателей эффективности рабочего процесса требуется оптимизировать конфигурацию проточного тракта и выбрать схему смесеобразования таким образом, чтобы добиться максимально возможного повышения коэффициента полноты сгорания конденсированных частиц МПЭК.

Экспериментальные исследования, проведенные к настоящему времени, дают возможность получить эмпирические закономерности влияния различных факторов на характеристики рабочего процесса. Однако имеющиеся данные не позволяют детально проанализировать особенности горения конденсированных частиц МПЭК, что необходимо для разработки рекомендаций, направленных на повышение качества рабочего процесса. В настоящее время для решения этой задачи все чаще используется имитационное моделирование процессов смесеобразования и горения.

В настоящей статье для моделирования неравновесных процессов в двухфазных высокоэнтальпийных потоках использован комбинированный подход Лагранжа — Эйлера [6] с учетом процесса горения частиц. Взаимодействие с воздухом продуктов газификации ВЭК — сложный физико-химический процесс [7], который на данном этапе не может быть удовлетворительно описан аналитическими моделями химической кинетики. Это обусловлено большим количеством химически активных веществ, наличием гетерогенных и гомогенных реакций. По этим причинам в рассматриваемой математической модели для определения скорости горения частиц МПЭК применены адаптированные законы, полученные на основе известных эмпирических данных.

В последнее время широкое распространение для расчета рабочих процессов в энергосиловых установках получили САЕ-пакеты (Computer-Aided Engineering). Следует отметить, что в случае использования газообразных компонентов такие пакеты позволяют обеспечить приемлемую для инженерных расчетов точность. Однако

большинство известных коммерческих CAE-пакетов не позволяют проводить моделирование процессов с участием реагирующих конденсированных частиц МПЭК. Основная сложность состоит в том, что в программный пакет необходимо вводить дополнительные модули, описывающие горение конденсированных частиц горючего произвольного химического и дисперсного состава.

Учитывая вышесказанное, в статье сделана попытка создать и апробировать такой модуль для программного пакета ANSYS Fluent. С использованием разработанного модуля проведено параметрическое численное исследование рабочего процесса в осесимметричной проточной КС. Выполненное моделирование направлено на выявление закономерностей, описывающих влияние соотношения компонентов, условий двухфазного смесеобразования и констант в законе горения частиц МПЭК (в высокоэнтальпийном воздушном потоке) на эффективность рабочего процесса. В результате сравнения результатов проведенного параметрического исследования с данными экспериментов появляется возможность решить конкретную практическую проблему: подобрать значения эмпирических констант в законе горения частиц МПЭК.

Математическая модель и расчетная область. Используемая для решения задач горения частиц конденсированной фазы в высокоэнтальпийном воздушном потоке математическая модель основана на комбинированном методе Лагранжа — Эйлера. Рассмотрен вариант, когда газовая фаза представляет собой смесь воздуха и продуктов сгорания, а горючее содержится только в частицах МПЭК. Химическое взаимодействие принято необратимым и протекает по схеме «воздух + горючее → продукты сгорания».

Учитывая то, что выбранный для расчетного параметрического исследования проточный тракт КС имеет осесимметричную конфигурацию, при моделировании характеристик газовой фазы используется система уравнений неразрывности, сохранения импульса и энергии, записанная в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} + \frac{\partial(A-R)}{\partial x} + \frac{\partial(B-X)}{\partial r} + \frac{F}{r} = S;$$

$$\sigma = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho w \\ \rho v \\ e \\ \rho Y_{\text{пс}} \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \rho w \\ p + \rho w^2 \\ \rho w v \\ (e + p)w \\ \rho Y_{\text{пс}} w \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho w v \\ p + \rho v^2 \\ (e + p)v \\ \rho Y_{\text{пс}} v \end{bmatrix}; \quad R = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xr} \\ w\tau_{xx} + v\tau_{xr} + q_x \\ \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial x} \end{bmatrix};$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xr} \\ \tau_{rr} \\ w\tau_{xr} + v\tau_{xx} + q_r \\ \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial r} \end{bmatrix}; F = \begin{bmatrix} \rho v \\ \rho wv - \tau_{xr} \\ \rho v^2 - \tau_{rr} + \tau_{\theta\theta} \\ (e + p)v - w\tau_{xr} - v\tau_{xx} - q_r \\ \rho Y_{\text{пс}}v - \rho D \frac{\partial Y_{\text{пс}}}{\partial r} \end{bmatrix}; S = \begin{bmatrix} S_\rho \\ S_w \\ S_v \\ S_e \\ S_{\text{пс}} \end{bmatrix}.$$

Здесь t — время; x, r — осевая и радиальная координаты; ρ — плотность газа; w, v — осевая и радиальная составляющие скорости газа; $e = p / (k + 1) + \rho(w^2 + v^2) / 2$ — полная энергия единицы газового объема (где k — показатель адиабаты); $Y_{\text{пс}}$ — массовая доля продуктов сгорания; p — давление газа; $\tau_{xx}, \tau_{rr}, \tau_{\theta\theta}, \tau_{xr} = \tau_{rx}$ — вязкие напряжения для газового потока; q_x, q_r — тепловые потоки в осевом и радиальном направлениях; D — коэффициент диффузии; $S_\rho, S_w, S_v, S_e, S_{\text{пс}}$ — источниковые члены, описывающие влияние движения, нагрева и горения частиц дисперсной фазы на газовый поток. Принимается, что массовая концентрация воздуха равна $Y_{\text{в}} = 1 - Y_{\text{пс}}$.

Систему замыкают уравнение состояния смеси идеальных газов и однопараметрическая модель турбулентности Спаларта — Аллмараса [8].

Комбинированный метод Лагранжа — Эйлера реализуется следующим образом. Необходимо разбить расчетную область на ячейки. Предположим, что в пределах одной ячейки с конечным объемом V находятся газ и N -частиц конденсированной фазы. При этом объем конденсированной фазы в ячейке существенно меньше V . Источниковый член в уравнении неразрывности позволяет учитывать, что при взаимодействии МПЭК с воздухом масса газовой фазы возрастает на величину, численно равную массе сгоревших частиц. Значения S_w и S_v используются для сохранения осевых составляющих суммарного импульса газовой и дисперсной фаз. В уравнении сохранения энергии источниковый член, определяемый величиной S_e , учитывает теплообмен между газом и частицами, а также тепловыделение при горении МПЭК. Изменение концентрации продуктов сгорания за счет химических реакций учитывается с помощью источникового члена $S_{\text{пс}}$. В этом случае в пределах рассматриваемой ячейки можно записать следующие уравнения для определения источниковых членов:

$$S_p = \frac{\pi \rho_p}{V} \sum_{i=1}^N u_{pi} d_{pi}^2;$$

$$S_w = \frac{\pi \rho}{2V} \sum_{i=1}^N d_{pi}^2 C_{xi} |w - w_{pi}| (w - w_{pi});$$

$$S_v = \frac{\pi \rho}{2V} \sum_{i=1}^N d_{pi}^2 C_{xi} |v - v_{pi}| (v - v_{pi});$$

$$S_e = \frac{\pi}{V} \sum_{i=1}^N d_{pi}^2 \alpha_i (T - T_{pi}) + H_u \frac{\pi \rho_p}{V} \sum_{i=1}^N u_{pi} d_{pi}^2;$$

$$S_{nc} = S_p (1 + L_0) (1 - Y_{nc}).$$

Здесь ρ_p — плотность материала частиц; u_{pi} — линейная скорость горения частиц; d_{pi} — диаметр частиц с начальным диаметром; C_{xi} — коэффициент газодинамического сопротивления частиц; w_{pi} , v_{pi} — осевая и радиальная составляющие скорости частиц; α_i — коэффициент теплоотдачи между газом и частицами; T — температура газа; T_{pi} — температура частиц; H_u — теплота сгорания МПЭК; L_0 — стехиометрическое соотношение для МПЭК и воздуха. Нижний индекс i указывает на то, что количественные значения рассчитываются для каждой i -й частицы в отдельности. В общем случае для различных частиц эти параметры могут отличаться.

Отметим, что уравнения для вычисления S_p и S_{nc} справедливы, если выполняется условие $u_{pi} \Delta t \ll d_{pi}$. В случае если это условие не выполняется, необходимо вводить соответствующие поправки. Кроме того, предполагается, что радиационный теплообмен отсутствует, а частицы МПЭК имеют форму, близкую к сферической.

Следует отметить, что в предложенной математической модели учет влияния горения конденсированной фазы происходит путем расчета тепловыделения, которое обеспечивают частицы при движении по своим траекториям.

Для определения траектории i -й частицы необходимо провести интегрирование осевой и радиальной составляющих вектора скорости частицы в газовом потоке, которые, в свою очередь, определяются из дифференциальных уравнений:

$$\frac{dw_{pi}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{C_{xi} \rho}{d_{pi} \rho_p} \frac{(w - w_{pi}) |w - w_{pi}|}{2},$$

$$\frac{dv_{pi}}{dt} = \frac{3}{2} \frac{C_{xi} \rho}{d_{pi} \rho_p} \frac{(v - v_{pi}) |v - v_{pi}|}{2}$$

В общем случае горение происходит как на поверхности частиц МПЭК, так и во фронте пламени в примыкающей к поверхности газовой области. В рассматриваемых условиях, характеризующихся высокими температурами воздуха, примем, что фронт пламени имеет бесконечно малую толщину, а его радиус практически совпадает с радиусом частицы. Это позволяет использовать математическую модель, описывающую горение как гетерогенную реакцию.

Линейная скорость горения частиц u_{pi} — функция достаточно большого числа параметров. Основными параметрами являются: химический состав и размер частицы, наличие оксидной пленки (ее свойства и толщина), температура газа и частицы, парциальное давление и концентрация газообразных реагирующих компонентов (в том числе образующихся в ходе промежуточных химических реакций) в зоне, окружающей частицу, а также относительная скорость частицы. В зависимости от специфических условий, реализующихся в конкретной КС, рядом из перечисленных факторов можно пренебречь.

С учетом допущений, принятых в работе [6], адаптированное выражение для линейной скорости горения частицы МПЭК в высокоэнthalпийном воздушном потоке может быть записано в виде

$$u_p = u_{p0} [\rho(1 - Y_{nc})]^n,$$

где u_{p0} — константа в законе горения; n — показатель степени, определяющий характер зависимости скорости горения от относительной массовой концентрации окислителя (воздуха) в контрольном объеме, окружающей частицу.

Необходимо отметить, что продукты сгорания сами по себе — смесь газов, причем состав этой смеси является переменным и зависит от условий, реализуемых в потоке. Переменность теплофизических свойств смеси учитывается посредством использования зависимостей удельной теплоемкости, вязкости и теплопроводности продуктов сгорания от давления и температуры. Указанные теплофизические параметры можно определить путем интерполяции значений, полученных с помощью программного комплекса TERRA [9], предназначенного для моделирования термодинамического равновесия.

В общем случае комбинированный метод Лагранжа — Эйлера позволяет моделировать характеристики как газовой, так и конденсированной фазы с учетом их взаимодействия между собой. Однако описание реального случая в силу большого количества участвующих

в моделируемом процессе частиц трудно реализовать, и требуются значительные вычислительные ресурсы. Применительно к рассматриваемой задаче использован метод оптимизации, заключающийся в том, что все частицы одного диаметра, находящиеся в начальный момент времени в одной ячейке (или сопряженных ячейках), объединяются в кластер. Дальнейшие вычисления проводятся для кластера целиком и основаны на допущении, что траектория и скорость горения всех частиц в кластере совпадают.

Моделирование выполнено для прямооточной КС, близкой по своей конфигурации к экспериментальной установке, описанной в работе [10]. Схема расчетной области показана на рис. 1. Относительное удлинение проточного тракта КС составляет $x_{\max} / d = 15$, где x_{\max} — максимальная длина проточного тракта, d — его диаметр.

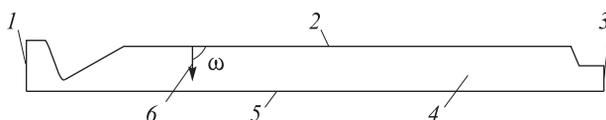


Рис. 1. Схема расчетной области:

- 1 — входное сечение; 2 — стенка; 3 — выходное сечение;
4 — расчетная область; 5 — ось; 6 — подача частиц

В работе использованы следующие граничные условия: на входе в расчетную область заданы температура торможения T^* и полное давление p^* ; на выходе из расчетной области выполняется условие нераспространения малых возмущений против потока. Стенки считаются адиабатными, проскальзывание на них отсутствует. На стенках и выходе из расчетной области задано условие поглощения частиц (удар считается абсолютно неупругим). На оси симметрии для частиц задано условие отражения.

Решение системы уравнений выполнено с помощью структурированной блочной расчетной сетки с общим количеством элементарных ячеек около 200 тыс.

Анализ результатов моделирования. В ходе проведенного параметрического исследования рабочего процесса в прямооточной КС при различных вариантах ввода частиц МПЭК проанализировано влияние на эффективность процесса горения коэффициента избытка воздуха и констант в законе горения частиц МПЭК. Расчеты проведены при $T^* = 1500$ К на входе в расчетную область и $P^* = 1,1$ МПа. Геометрическая конфигурация проточного тракта обеспечивает среднее значение числа Маха в области горения частиц $M \sim 0,3$. Подача частиц осуществляется либо со стенки (под углом ω , см. рис. 1), либо по оси

проточного тракта. Начальный угол разлета частиц составляет 6° , их скорость — 100 м/с.

Оценка эффективности горения частиц в различных зонах камеры осуществляется путем сопоставления коэффициентов полноты сгорания МПЭК η в выходном и произвольном сечении газодинамического тракта. Текущее значение η может быть вычислено с помощью следующей зависимости:

$$\eta = 1 - \frac{m_n}{m_0},$$

где m_n — массовый расход несгоревших частиц МПЭК через рассматриваемое сечение и осаждаемых на стенках проточного тракта (с места подачи МПЭК до рассматриваемого сечения); m_0 — начальный массовый расход частиц МПЭК.

Исследования проведены для условного МПЭК, теплота сгорания которого принята равной 3,5 МДж/кг, а массовое стехиометрическое соотношение компонентов $L_0 = 7,16$.

При моделировании процесса горения частиц МПЭК принято, что они имеют полидисперсный состав, близкий к составу, приведенному в работе [11]. Распределение включает 22 фракции, характеристики которых сведены в таблицу, где g_m — массовая доля i -й фракции. Плотность материала частиц принята $\rho_p = 1600$ кг/м³.

Дисперсный состав конденсированного горючего

d_{pi} , МКМ	g_m	d_{pi} , МКМ	g_m
88,00	0,1047	13,08	0,0402
74,00	0,0623	11,00	0,0333
62,22	0,0740	9,25	0,0274
52,32	0,0881	7,78	0,0224
44,00	0,0917	6,54	0,0182
37,00	0,0779	5,50	0,0148
31,10	0,0740	4,62	0,0120
26,16	0,0660	3,89	0,0098
22,00	0,0606	3,27	0,0079
18,50	0,0555	2,75	0,0064
15,55	0,0480	2,31	0,0050

Пример пространственного распределения траекторий частиц в потоке представлен на рис. 2. Расчеты показывают, что среднее время пребывания частиц в рассматриваемом канале составляет 10...15 мс. При подаче со стенки частицы распределяются по всему поперечному сечению проточного тракта, а при подаче частиц по оси они локализируются в ядре потока и практически не попадают на стенки.

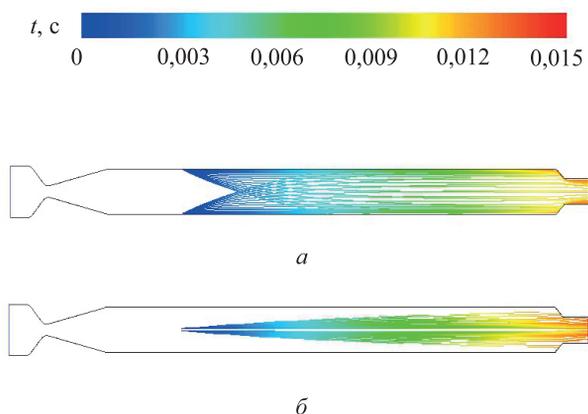


Рис. 2. Распределение времени t пребывания полидисперсных частиц вдоль их траекторий при подаче МПЭК со стенки (а) и по оси (б)

Максимальные температуры газа, реализуемые в проточном тракте, достигают 1800 К в случае подачи частиц со стенки и 1900 К — при подаче частиц по оси (рис. 3).

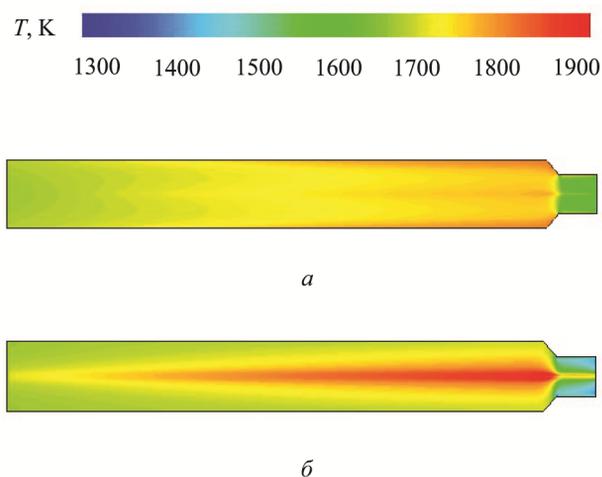


Рис. 3. Распределение температуры T в проточном тракте при подаче частиц со стенки (а) и по оси (б)

Более высокие температуры, полученные во втором случае, можно объяснить тем, что в ядре потока происходит горение с интенсивным тепловыделением, а на периферии горение практически отсутствует. При подаче со стенки тепловыделение от горения частиц практически равномерно распределено по всему объему проточного тракта, что подтверждают поля концентрации продуктов сгорания (рис. 4).

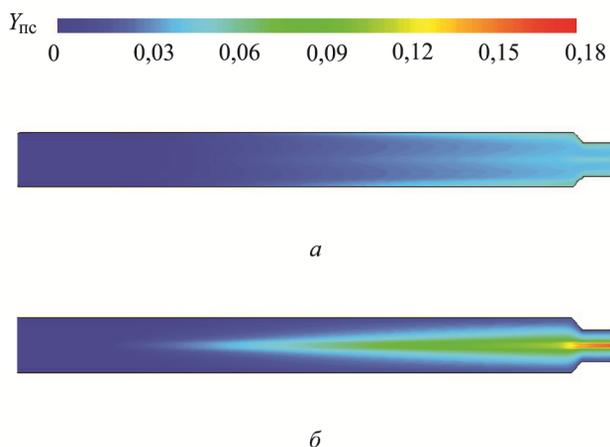


Рис. 4. Распределение массовой доли продуктов сгорания $Y_{пс}$ в проточном тракте при подаче частиц со стенки (а) и по оси (б)

В случае подачи частиц со стенки в отличие от осевой подачи частиц пространственное распределение траекторий частиц в КС в значительной степени зависит от их дисперсности. При этом крупные частицы практически полностью осаждаются на цилиндрическом участке стенки КС, а частицы с начальным диаметром $d_p < 26$ мкм в основном достигают сопла, при этом некоторые из них могут осаждаться в области критического сечения (рис. 5).

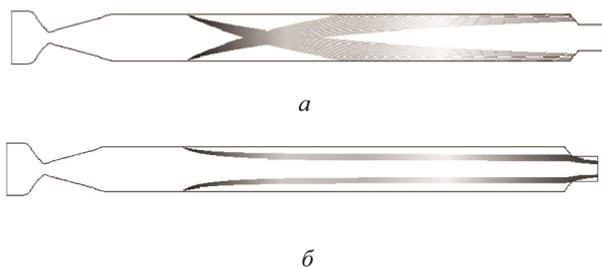


Рис. 5. Траектории частиц с d_{pi} , равным 88 (а) и 26 мкм (б)

Следует отметить, что в силу большой инерционности крупных частиц время их пребывания существенно превышает время пребывания частиц с небольшими значениями d_{pi} . Полученные данные показывают, что, варьируя дисперсность частиц и скорость их вдува, можно минимизировать массу МПЭК, осаждаемую на стенках.

Изменение η по длине проточного тракта (длина тракта приведена в относительных величинах x/x_{\max}) показано на рис. 6. Исходя из полученных данных, можно заключить, что коэффициент полноты сгорания зависит от направления подачи частиц. В случае осевой подачи частиц по потоку коэффициент η в выходном сечении составляет около $\eta = 0,61$. Подача со стенки позволяет повысить эффективность сгорания. При $\omega = 90^\circ$ коэффициент полноты сгорания составляет $\eta = 0,65$, а при $\omega = 45^\circ$ может достигать $\eta = 0,69$. Выявленное различие в значениях η для рассмотренных схем обусловлено меньшими значениями концентрации воздуха вдоль траекторий частиц при подаче по оси, что приводит к снижению скорости сгорания. Полученные данные также указывают на то, что в рассматриваемых условиях наибольшее влияние на η оказывает равномерность распределения частиц по проточному тракту, приводящая к увеличению средней концентрации воздуха вблизи частиц. Подтверждением обнаруженной тенденции является следующий факт: с повышением коэффициента избытка воздуха α значения η увеличиваются (рис. 7).

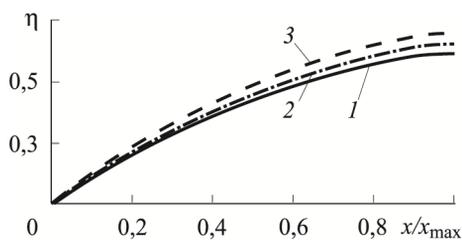


Рис. 6. Изменение коэффициента полноты сгорания η по длине КС при подаче частиц:
 1 — по оси; 2 — со стенки при $\omega = 45^\circ$;
 3 — со стенки при $\omega = 90^\circ$

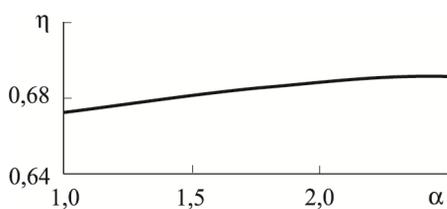


Рис. 7. Зависимость коэффициента полноты сгорания η от коэффициента избытка воздуха α

Отметим, что рост η с повышением α имеет место только в ограниченной области режимов горения, когда температура рабочего тела достаточно велика. Для рассматриваемого в настоящей статье уровня температур воздушного потока на входе при $\alpha > 2,5$ можно наблюдать снижение η [12], что обусловлено лимитированием ско-

рости химических реакций температурным фактором. Однако ввиду исследования технически значимого диапазона $\alpha = 1 \dots 2,5$ в используемой математической модели влияние температуры газа на линейную скорость горения частиц не учитывается.

Показано, что при подаче МПЭК со стенки угол вдува частиц ω влияет не только на η , но и на количество частиц, осаждающихся на стенках проточного тракта. При $\omega = 90^\circ$ более 20 % от массы подаваемых полифракционных частиц попадает на стенки. С уменьшением ω до 45° количество частиц, осаждаемых на стенках, уменьшается на 40...50 %. Снижение количества частиц, попадающих на стенки проточного тракта, — один из возможных методов повышения η .

Проведенные параметрические исследования указывают на то, что эмпирические константы в законе горения оказывают существенное влияние на расчетные значения η МПЭК в выходном сечении проточного тракта. Предварительное сравнение с экспериментальными данными, описанными в работе [11], и другими известными результатами, показывает, что удовлетворительное совпадение с расчетом может быть получено в случае использования следующих эмпирических констант в законе горения: $u_{p0} = 0,05$ м/с, $n = 1$. Такое значение n указывает на то, что в рассмотренном случае горение преимущественно протекает в диффузионном режиме [13]. Учитывая высокую температуру воздуха на входе в КС, можно считать, что оксидная пленка на поверхности частиц МПЭК практически отсутствует [13]. На рис. 8 представлены зависимости изменения относительного коэффициента η / η_0 полноты сгорания при варьировании u_{p0} и n (η_0 — коэффициент полноты сгорания при $u_{p0} = 0,05$ м/с, $n = 1$).

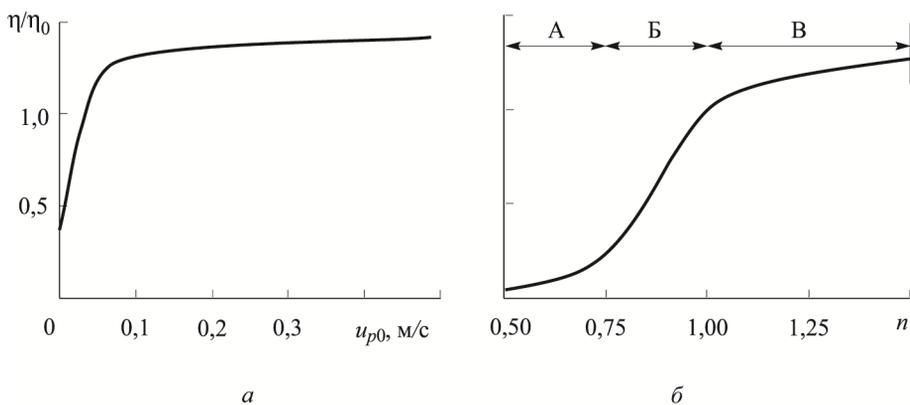


Рис. 8. Зависимость относительного коэффициента η / η_0 полноты сгорания от константы в законе горения u_{p0} (а) и показателя степени n (б)

Расчеты проведены для случая подачи частиц со стенки под углом при соотношении компонентов, соответствующем коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 2$.

Вначале рассмотрим зависимость $\eta/\eta_0 = f(u_{p0})$, которая имеет резкий излом в зоне значений $u_{p0} = 0,07 \dots 0,08$ м/с (рис. 8, а). При дальнейшем увеличении u_{p0} наблюдается своеобразное «насыщение» кривой: рост u_{p0} в 5 раз приводит к возрастанию η/η_0 всего лишь на 6...7%. На начальном участке кривой аналогичное увеличение u_{p0} сопровождается ростом η/η_0 в 3 раза, или на 200%. Полученный характер кривой свидетельствует о том, что, начиная с определенного уровня, нет смысла бороться за дальнейшее увеличение u_{p0} , поскольку интегральная полнота будет определяться наличием достаточного для горения количества кислорода в зоне пролета частицы.

Далее проанализируем, как величина n влияет на η/η_0 (рис. 8, б). Обычно в зависимости от возможности доступа кислорода к поверхности, где реализуется химическое взаимодействие, порядок реакции по окислителю (кислороду) может находиться в диапазоне от 0 до 2 и даже выше [14]. Причем ограничение доступа кислорода может быть обусловлено несколькими факторами: 1) концентрацией кислорода; 2) коэффициентом диффузии кислорода в конкретной газовой смеси; 3) наличием и свойствами образующегося на реакционной поверхности оксида. Показатель $n = 0$ означает, что скорость горения (окисления) контролируют чисто кинетические процессы. В рассматриваемом случае параметрическое исследование проведено для $n = 0,5 \dots 1,5$.

Кривая зависимости $\eta/\eta_0 = f(n)$ имеет три характерных участка (см. рис. 8, б). Как видно, наиболее существенное влияние n на η/η_0 имеет место на участке Б при $n = 0,75 \dots 1,0$. Угол наклона кривой на участках А ($n = 0,5 \dots 0,75$) и В ($n = 1,0 \dots 1,5$) практически совпадает и оказывается существенно меньше, чем на участке Б. Это означает, что на участках А и В интегральная полнота все в меньшей степени зависит от концентрации кислорода и определяется u_{p0} .

Проведенный анализ выполнен на базе достаточно ограниченной базы экспериментальных данных, что позволяет пока рекомендовать для дальнейшего использования лишь наиболее вероятные диапазоны изменения u_{p0} и n . При накоплении достаточного количества экспериментальных данных предложенный методический аппарат предоставит возможность путем численного моделирования уточнить

значения эмпирических констант в законе горения (u_{p0} и n) для конкретных частиц МПЭК. Полученные данные могут быть использованы для прогнозирования завершенности физико-химических процессов в осесимметричных каналах и при разработке рекомендаций по повышению эффективности рабочего процесса в перспективных энергосиловых установках.

Выводы.

1. Разработанная и реализованная в специализированном модуле математическая модель позволяет адаптировать программный пакет ANSYS Fluent для проведения имитационного моделирования двухфазного газодинамического течения с учетом горения конденсированных частиц МПЭК в высокоэнтальпийном воздушном потоке.

2. Выполнена апробация математической модели и адаптированного программного пакета применительно к модельной прямоточной КС. Проанализировано влияние схемы смешения конденсированных частиц МПЭК с высокоэнтальпийным воздушным потоком. Показано, что для рассматриваемой конфигурации прямоточной КС при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 2$ наименьшее значение коэффициента полноты сгорания составляет $\eta = 0,61$ и имеет место при подаче частиц по оси КС. Подача частиц со стенки КС (по периметру) позволяет повысить коэффициент полноты сгорания до $\eta = 0,65$ при угле подачи $\omega = 90^\circ$ и до $\eta = 0,69$ — при $\omega = 45^\circ$. Отмечено, что с повышением коэффициента избытка воздуха α (в диапазоне $\alpha = 1,0 \dots 2,5$) значения η увеличиваются.

3. Проанализировано влияние на η констант u_{p0} и n в использованном эмпирическом законе, описывающем скорость горения частиц. Для рассмотренного МПЭК предложены наиболее вероятные диапазоны изменения u_{p0} и n , которые могут быть уточнены после расширения базы доступных экспериментальных данных.

Работа выполнена при поддержке Гранта ведущей научной школы Российской Федерации, проект НШ-9774.2016.8

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вареных Н.М., Шабунин А.И., Сарабьев В.И., Харисантов М.В., Шибанов С.В., Калинин С.В. Основные направления разработки твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей с повышенными энергобаллистическими характеристиками. *Боеприпасы и спецхимия*, 2013, № 1, с. 44–50.
- [2] Бакулин В.Н., Дубовкин Н.Ф., Котов В.Н., Сорокин В.А., Францкевич В.П., Яновский Л.С. *Энергоемкие горючие для авиационных и ракетных двигателей*. Москва, Физматлит, 2009, 400 с.

- [3] Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance assessment for a throttleable ducted rocket powered lower tier interceptor. *51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, AIAA Propulsion and Energy Forum, USA, Orlando, 27–29 July 2015 (AIAA 2015-4234)*, pp. 6407–6423.
- [4] Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верхоломов В.К. и др. *Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета*. Москва, Академкнига, 2006, 343 с.
- [5] 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, issue 6, pp. 882–891. DOI 10.1134/S001851X16050047
- [6] Воронецкий А.В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии. *Наука и образование: электрон. науч.-техн. изд.*, 2016, № 1. URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/830993.html> (дата обращения 15.05.2017).
- [7] Ягодников Д.А. *Воспламенение и горение порошкообразных металлов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009, 432 с.
- [8] Spalart P.R. Editorial RANS modeling into a second century. *Special issue of international Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2009, vol. 23, no. 4, pp. 291–293.
- [9] Трусов Б.Г. Программная система TERRA для моделирования фазовых и химических равновесий при высоких температурах. *III Междунар. симпозиум «Горение и плазмохимия». Казахстан, Алма-Ата, 24–26 августа 2005*. Изд-во Казахского ун-та, 2005, с. 52–57.
- [10] Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Прохоров А.Н., Федотова К.В., Шаров М.С., Яновский Л.С. Методика экспериментальных исследований эффективности рабочего процесса в высокоскоростных ПВРД газогенераторной схемы на твердых топливах. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 2, с. 65–74. DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75
- [11] Ягодников Д.А., Лапицкий В.И., Сухов А.В., Томак В.И. Результаты морфологического, химического и дисперсного анализа конденсированных продуктов сгорания пиротехнических составов. *Инженерный вестник*, 2014, № 11. URL: <http://engsi.ru/doc/743675.html> (дата обращения 15.05.2017).
- [12] Van Wie D., D'Alessio S., White M. Hypersonic airbreathing propulsion. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2005, vol. 26, issue 4, pp. 430–437.
- [13] Гремячкин В.М., Михальчук М.В. К теории горения частицы бора в воздухе. *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*, 2014, т. 15, вып. 5. URL: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/250> (дата обращения 15.05.2017).
- [14] Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачаев В.С., Коротков А.И. *Горение порошкообразных металлов в активных средах*. Москва, Наука, 1972, 294 с.

Статья поступила в редакцию 23.03.2017

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Воронецкий А.В., Смоляга В.И., Арефьев К.Ю., Гусев А.А., Абрамов М.А. Параметрическое исследование взаимодействия частиц конденсированной фазы с высокоэнтальпийным потоком воздуха в прямоточной камере сгорания. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2017, вып. 8.

<http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2017-8-1663>

Воронцовский Андрей Владимирович — д-р техн. наук, профессор, заведующий отделом НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теория горения высокометаллизированных топлив, математическое моделирование рабочих процессов в ракетных двигателях. Автор более 140 научных публикаций.
e-mail: voron@bmsu.ru

Смоляга Владимир Иванович — заместитель начальника отдела АО «НПО «Сплав». Область научных интересов: прикладные исследования в области разработки, создания и испытаний силовых установок перспективных летательных аппаратов. Автор семи научных публикаций. e-mail: jagersw@yandex.ru

Арефьев Константин Юрьевич — канд. техн. наук, науч. сотрудник НИИЭМ, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теория смещения и горения гомогенных и гетерогенных топливных композиций, математическое моделирование рабочих процессов в воздушно-реактивных двигателях. Автор более 40 научных публикаций.
e-mail: arefyev@rambler.ru

Гусев Андрей Алексеевич — инженер НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теория смещения и горения гомогенных и гетерогенных топливных композиций, математическое моделирование рабочих процессов в воздушно-реактивных двигателях. Автор шести публикаций.
e-mail: andrew_gusman@mail.ru

Абрамов Максим Александрович — инженер НИИЭМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: теория смещения и горения гомогенных и гетерогенных топливных композиций, математическое моделирование рабочих процессов в воздушно-реактивных двигателях. Автор трех публикаций.
e-mail: abramovmaks94@gmail.com

Parametric study of condensed phase particles interaction with a high-enthalpy air flow in a co-current combustion chamber

© A.V. Voronetskiy¹, V.I Smolyaga², K.Yu. Arefiev¹,
A.A Gusev¹, M.A.Abramov¹

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

²Joint-stock company Scientific-Production Association SPLAV, Tula, 300004, Russia

The article considers mathematical modeling working process problems in perspective energy-power plants for intra-atmospheric aircraft using fuel based on high-metallized energy-intensive compositions (VEK). The mathematical model developed and realized in the specialized module allows us to adapt the software package ANSYS Fluent for simulating a two-phase gas-dynamic flow taking into account the condensed BEC particles combustion in a high-enthalpy air stream. The article gives the parametric calculations, which result in obtaining some regularity in the particles combustion completeness coefficient and its changing dependence on the ratio of components, two-phase mixing conditions, and empirical constants in the combustion law. The article considers the cases of particle feeding both from the combustion chamber wall and along the flow axis. The obtained data can be used to refine the condensed particles combustion empirical laws, to predict the physical and chemical processes completeness in real chambers and to develop recommendations for improving the work process efficiency in advanced power-generating plants.

Keywords: mathematical modeling, condensed fuel particles, air flow, mixture formation scheme, empirical combustion law

REFERENCES

- [1] Varenikh N.M., Shabunin A.I., Sarabev V.I., et al. *Boepripasy i spetskimiya — Ammunition and special chemistry*, 2013, no. 1, pp. 44–50.
- [2] Bakulin V.N., Dubovkin N.F., Kotov V.N., Sorokin V.A., Frantskevich V.P., Yanovskiy L.S. *Energoemkie goryuchie dlya aviatsionnykh i raketnykh dvigateley* [Energy-intensive fuels for aviation and rocket engine]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2009, 400 p.
- [3] Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance Assessment for a Throttled Rocket Powered Lower Tier Interceptor. *51st AIAA/SAE/ASEE. Proc. of Joint Propulsion Conference, Propulsion and Energy Forum, USA, Orlando, 27–29 July 2015 (AIAA 2015-4234)*, pp. 6407–6423.
- [4] Aleksandrov V.N., Bytskevich V.M., Verkholomov V.K., et al. *Integralnye pryamotokhnnye vozdušno-reaktivnye dvigateli na tverdykh toplivakh. Osnovy teorii i rascheta* [Integral ramjet air-jet engines on solid fuels. Fundamentals of theory and calculation]. L.S. Yanovskiy, ed. Moscow, Akademkniga Publ., 2006. 343 p.
- [5] Averkov I.S., Aleksandrov V.Yu., Arefev K.Yu., Voronetskiy A.V., Guskov O.V., Prokhorov A.N., Yanovsky L.S. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 2016, no. 6, pp. 882–891.
- [6] Voronetskiy A.V. *Nauka i obrazovanie: ehlektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie — Science and Education: Scientific Publication*, 2016, no. 1. Available at: <http://technomag.bmstu.ru/doc/830993.html> (accessed May 15, 2017).

- [7] Yagodnikov D.A. *Vosplamnenie i gorenie poroshkoobraznykh metallov* [Ignition and combustion of powdered metals]. Moscow, BMSTU Publ., 2009, 432 p.
- [8] Spalart P.R. *International Journal. of Computational Fluid Dynamic*, Special issue, no. 4, 2009, pp. 291–293.
- [9] Trusov B.G. Programmnaya sistema TERRA dlya modelirovaniya fazovykh i khimicheskikh ravnovesiy pri vysokikh temperaturakh [TERRA software system for modeling phase and chemical equilibria at high temperatures]. *III Mezhdunarodnyy simpozium "Gorenie i plazmokhimiya"* [Proc. of III International Symposium Combustion and Plasma Chemistry]. August 24–26, 2005, Almaty, Kazakhstan, 2005, pp. 52–57.
- [10] Aleksandrov V.Yu., Arefev K.Yu., Prokhorov A.N., Fedotova K.V., Sharov M.S., Yanovskiy L.S. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 2, pp. 65–74. DOI 10.18698/0536-1044-2016-2-65-75
- [11] Yagodnikov D.A., Lapitskiy V.I., Sukhov A.V., Tomak V.I. *Inzhenernyy vestnik — Engineering Bulletin*, 2014, no. 11. Available at: <http://engsi.ru/doc/743675.html> (accessed May 15, 2017).
- [12] Van Wie D., D'Alessio S., White M. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2005, vol. 26, issue 4, pp. 430–437.
- [13] Gremyachkin V.M., Mihalchuk M.V. *Fiziko-khmicheskaya kinetika v gazovoy dinamike — Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2014, vol. 15, issue 5. Available at: <http://chemphys.edu.ru/issues/2014-15-5/articles/250/> (accessed May 15, 2017).
- [14] Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachaev V.S., Korotkov A.I. *Gorenie poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Combustion of powdered metals in active media], Moscow, Nauka Publ., 1972, 294 p.

Voronetskiy A.V., Dr. Sc. (Eng.), Professor, head of the department at Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include combustion theory of high-metallized fuels, mathematical modeling of working processes in rocket engines. Author of over 140 scientific publications. e-mail: voron@bmstu.ru

Smolyaga V.I., Deputy head of the department at Joint-stock company Scientific-Production Association SPLAV. Research interests include applied research in the field of development, creation and testing of power plants for advanced aircraft. Author of 7 scientific publications. e-mail: jagersw@yandex.ru

Arefev K.Yu., Cand. Sc. (Eng.), works in Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Assoc. Professor of the Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include theory of bias and combustion of homogeneous and heterogeneous fuel compositions, mathematical modeling of work processes in air-jet engines. Author of over 40 scientific publications. e-mail: arefyev@rambler.ru

Gusev A.A., engineer at Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include theory of mixing and combustion of homogeneous and heterogeneous fuel compositions, mathematical modeling of work processes in air-jet engines. Author of 6 publications. e-mail: andrew_gusman@mail.ru

Abramov M.A., engineer at Research Institute of Power Engineering, Bauman Moscow State Technical University. Research interests include theory of mixing and combustion of homogeneous and heterogeneous fuel compositions, mathematical modeling of work processes in air-jet engines. Author of 3 publications. e-mail: abramovmaks94@gmail.com