

УДК 629.7.036.224

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНЖЕКЦИИ ДВУХФАЗНЫХ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СОСТАВОВ В МОДЕЛЬНУЮ КАМЕРУ СГОРАНИЯ МАЛОГО УДЛИНЕНИЯ

© 2022 г. К. Ю. Арефьев^{1, 2, 3, *}, М. А. Абрамов^{1, 2, 3, **}, А. В. Воронцов¹, Э. Е. Сон^{2, 4}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

³ФАУ “Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова”, Москва, Россия

⁴Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

*E-mail: arefyev@rambler.ru

**E-mail: abramovmaks94@gmail.com

Поступила в редакцию 06.07.2020 г.

После доработки 10.02.2021 г.

Принята к публикации 14.02.2021 г.

В статье изложены критерии оптимизации, математическая модель и результаты расчетов смешения потоков в модельной камере сгорания с различными конфигурациями системы инжекции продуктов газификации энергетического конденсированного состава. Продукты газификации представляют собой смесь газовой и конденсированной фаз. Усовершенствован ранее разработанный алгоритм обработки данных посредством введения вероятностного подхода при траекторной оценке распределения частиц дисперсной фазы в поперечных сечениях модельной камеры сгорания малого удлинения. В результате проведенных параметрических исследований предложены рекомендации в части повышения качества смешения продуктов газификации с воздушным потоком в модельной камере сгорания и минимизации интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта камеры сгорания. Результаты исследований могут быть использованы для разработки рекомендаций по обеспечению работоспособности и повышению эффективности рабочего процесса в перспективных энергосиловых установках.

DOI: 10.31857/S0040364422010124

ВВЕДЕНИЕ

Создание эффективных энергосиловых установок является важной и актуальной задачей в аэрокосмической, энергетической и технологической отраслях промышленности. В ряде случаев использование энергетических конденсированных составов (ЭКС) в качестве топлива позволяет обеспечить максимальные технические и эксплуатационные характеристики энергосиловых установок [1–5].

Однако для использования преимуществ ЭКС требует решения ряда проблем, в том числе оптимизации смешения с воздухом двухфазных продуктов газификации (ПГ) в камере сгорания (КС). Это связано с тем, что рабочий процесс в энергосиловых установках газогенераторной схемы на ЭКС разделяется на две стадии [3]. На первой стадии реализуется газификация ЭКС в газогенераторе (ГГ), а затем на второй стадии происходит смешение и горение продуктов газификации с воздушным потоком в камере сгорания.

Для современных энергосиловых установок ПГ ЭКС являются смесью многокомпонентного газа и частиц конденсированной фазы. Как отмечено в работе [6], при оценке смешения в КС следует рассматривать как газообразные продукты газификации (ГПГ), так и конденсированные продукты газификации (КПГ).

С одной стороны, КПГ содержат значительную часть химической энергии ЭКС, с другой, являются причиной интенсивной эрозии стенок проточного тракта КС. Поэтому обеспечение одновременно качественного смешения ПГ с воздухом и минимизации эрозионного воздействия частиц на стенку является одним из определяющих факторов эффективности рабочего процесса и длительной работоспособности энергосиловой установки в целом. Особенно актуальной эта проблема становится для КС малого удлинения (отношение длины к высоте проточного тракта $КС \leq 5$).

Задачей работы является оптимизация конфигурации системы инжекции ПГ в составе модель-

ной КС малого сечения с прямоугольным сечением проточного тракта.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе рассмотрена секция модельной КС с относительным удлинением $L/h = 3.2$ (L – длина КС от места инъекции ПГ до начала сужения проточного тракта, h – высота КС). Ширина секции модельной КС составляет $s = 0.8h$. Принято, что инъекция ПГ в секцию КС осуществляется через одно сопловое отверстие диаметром $d = 0.1h$. Проточный тракт выполнен с геометрическим поджатием вблизи выходного сечения, которое обеспечивает дозвуковое течение в КС со скоростью, соответствующей числу Маха $M \approx 0.3$. Схема секции модельной КС представлена на рис. 1. Исследование проведено для наиболее характерного режима работы модельной КС, при котором соотношение массовых расходов ПГ $G_{\text{ПГ}}$ и воздуха $G_{\text{в}}$ составляет $G_{\text{в}}/G_{\text{ПГ}} = 10$. При этом давление в ПГ $p_{\text{ПГ}} = 2.5$ МПа, а скоростной напор воздушного потока $q_{\text{в}} = 13.2$ кПа.

Рассмотрены три различных варианта инъекции ПГ, реализации которых возможна в рассматриваемой КС. Исследуемые конфигурации систем инъекции ПС в КС представлены на рис. 2.

В варианте № 1 инъекция осуществляется с верхней стенки КС поперек потока. При этом ось соплового отверстия ПГ перпендикулярна оси x КС. Центр соплового отверстия расположен на удалении h от входного сечения КС. Данный способ инъекции является наиболее технологичным, однако, как показано в работе [7], в этом случае может наблюдаться локальное ухудшение процессов смешения ПГ с воздушным потоком.

Вариант № 2 отличается от варианта № 1 тем, что вверх по потоку непосредственно перед сопловым

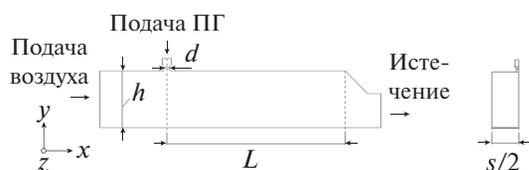


Рис. 1. Схема секции модельной КС.

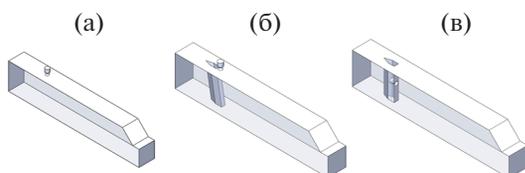


Рис. 2. Схемы инъекции продуктов газификации в КС: (а) – со стенки поперек потока, (б) – со стенки в донную область пилона, (в) – с пилона спутно потоку.

отверстием ПГ установлен наклонный пилон и инъекция осуществляется в донную область пилона. Пилон наклонен под углом 25° относительно нормали к верхней стенке. Такой способ инъекции обеспечивает более высокую “пробивную” способность двухфазной струи, так как ПГ попадают в низкоскоростную область в следе за пилоном. При этом в реализации данной схемы обычно имеет место интенсификация смешения посредством возникновения вихревого следа за пилоном [8].

Инъекция ПГ в варианте № 3 реализуется через сопловое отверстие ПГ, расположенное на задней торцевой поверхности пилона спутно потоку. При этом ось соплового отверстия ПГ и ось секции модельной КС совпадают, а сам пилон расположен вертикально. Торцевая поверхность пилона удалена на расстояние h от входного сечения КС. Подобное техническое исполнение направлено на минимизацию осаждения частиц на поверхностях проточного тракта КС.

Таким образом, каждый из описанных вариантов инъекции ПГ обладает как преимуществами, так и определенными недостатками. Вследствие чего для выбора конфигурации для модельной КС необходимым является проведение численного моделирования и анализа результатов по нескольким критериям, в частности критерию качества смешения ПГ с воздушным потоком [9] и критерию интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта [10].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В используемой математической модели заложен усовершенствованный алгоритм [9], основанный на численном расчете двухфазного течения в КС с помощью комбинированного подхода Лагранжа–Эйлера [11].

При моделировании характеристик газовой фазы решается система осредненных по Фавру уравнений Навье–Стокса, записанная для сжимаемой вязкой теплопроводной неразрывной среды [12]. Используется квазистационарная постановка задачи (с локальным временным шагом) в неявной схеме. При вычислении потоков на границах ячеек решение задачи находится по схеме AUSM (Advection Upstream Splitting Method) [13]. Система замыкается уравнением состояния идеального газа и дополнена двухпараметрической моделью турбулентности $k-\omega$ SST [14].

В отличие от работы [9], при моделировании потока КПГ частицы рассматриваются как полифракционная дискретная фаза. При этом частицы КПГ разделены на $N_{\text{фр}} = 7$ фракций по диаметрам частиц d_{qi} (представлены в таблице). Каждая фракция обладает индивидуальной массовой g_{qi} долей относительно всей массы КПГ, определенной в

соответствии с морфологическим анализом, представленным в [15].

В сечении инжекции ПГ принято, что в каждой ячейке расчетной области подаются частицы всех фракций. При этом частицы каждой фракции, находящиеся в начальный момент времени в одной расчетной ячейке, объединяются в кластер. Частицы одного кластера имеют одинаковые характеристики и общую траекторию движения. Массовый расход частиц для каждого кластера с одинаковым диаметром частиц принимается равным $G_{чi} = G_{пт}g_{чi}/K_{ин}$, где $K_{ин}$ – количество кластеров в сечении инжекции ПГ. В рамках данного подхода количество $K_{ин}$ равно количеству ячеек расчетной сетки в сечении инжекции. При этом количественный (счетный) расход частиц для каждого такого кластера определяется уравнением $N_{чi} = 6G_{пт}g_{чi}/(\pi r d_{чi} K_{ин})$. Траектории движения каждого кластера частиц КПП определяются из решения дифференциальных уравнений [12], где для описания движения конденсированной фазы используется траекторная модель. Изменение параметров частиц по траекториям определяется из уравнения движения и сохранения энергии для частиц в кластере. Воздействие конденсированной фазы на газ в данной работе не учитывается. Следует отметить, что в работе принято допущение о постоянстве размеров частиц в каждом кластере. Столкновение между частицами и их вращение в рассматриваемой математической модели также не учитывается.

При моделировании принимается, что частицы КПП (кластеры), попадающие на стенку проточного тракта КС, осаждаются на ней и исключаются из дальнейшего расчета. Данное допущение основано на том, что в большинстве энергосиловых установок газогенераторной схемы на ЭКС на стенки КС нанесено теплозащитное покрытие, которое в процессе работы установки плавится, и на поверхности образуется жидкий слой, способствующий осаждению попадающих на него частиц практически в полном объеме.

Для численного моделирования двухфазного течения использовались неструктурированные расчетные сетки. Общее количество элементарных ячеек в применяемых расчетных сетках около 1.5×10^6 , причем выполнено сгущение вблизи стенок и в областях с наиболее высоким уровнем градиентов газодинамических параметров течения. Для имитации горения ПГ с воздухом в КС введено объемное тепловыделение [12]. Для этого в расчетной области (внутри КС) выделялась зона, в которой предположительно происходят все экзотермические реакции. В ней задавалось значение источникового члена для уравнения энергии, численно равного объемному тепловыделению Q_v . Для вычисления объемного тепловыделения использовалась зависимость

Фракционный состав частиц КПП

№ фракции	$d_{чi}$, мкм	$g_{чi}$
1	1	0.095
2	2	0.21
3	5	0.32
4	10	0.16
5	20	0.14
6	40	0.075
7	80	0.055

$$Q_v = \eta H_u m_{пт} / V,$$

где η – коэффициент полноты сгорания ПГ в КД; H_u – массовая теплота дожига ПГ; $m_{пт}$ – массовый расход ПГ; V – характерный объем, в котором происходит дожигание ПГ. В расчетах принято, что $\eta = 0.6–0.7$, $H_u = 3.5$ МДж/кг.

В работе [9] авторами предложена методика вторичной обработки результатов расчета двухфазного течения в КС сложной геометрии. Данная методика позволяет спрогнозировать качество смешения и оценить верхний предел коэффициента полноты сгорания ПГ в КС энергосиловых установок без прямого моделирования самого процесса горения. В настоящей работе данная методика [9] адаптирована для проведения оценок эффективности смешения полифракционного состава КПП с учетом осаждения частиц конденсированной фазы на стенках проточного тракта КС.

С целью дискретно-непрерывного преобразования параметров распределения КПП в произвольном сечении КС в работе предложен вероятностный подход для определения возможной области локализации индивидуальных траекторий частиц в рамках каждого кластера. Суть данного подхода заключается в следующем. Для рассматриваемого кластера строится функция плотности вероятности пространственной локализации траекторий частиц (ПЛТЧ) в рассматриваемом сечении. При этом положение максимума функции ПЛТЧ соответствует положению точки пересечения траектории движения кластера с плоскостью рассматриваемого сечения. В данном случае принимается, что отклонение вектора скорости кластеров КПП от нормали к плоскости рассматриваемого сечения КПП незначительно влияет на результаты анализа. Уравнение дискретно-непрерывного преобразования в данном случае основано на определении вероятности $p_{ч}$ пересечения индивидуальными частицами рассматриваемой плоскости вблизи траектории кластера. Вероятность может быть описана с помощью двумерного нормального распределения Гаусса

$$p_{ci}(x, y) = \exp\left(\frac{(y - y_0)^2 - (z - z_0)^2}{2\sigma^2}\right) (2\pi\sigma^2)^{-1},$$

где y_0, z_0 – координаты точки пересечения траектории движения частицы с плоскостью рассматриваемого сечения; σ – среднеквадратичное отклонение пространственной локализации частиц относительно траектории кластера. Параметр σ для данного исследования в первом приближении задавался как

$$\sigma = \sqrt{\frac{S_{kc}}{4K_{кл}}},$$

где $K_{кл}$ – количество кластеров, траектории которых пересекают рассматриваемое сечение; S_{kc} – площадь поперечного сечения КС. При этом параметр σ может быть скорректирован по результатам дальнейших экспериментальных исследований.

Для оценки равномерности распределения потока частиц в сечении проточного тракта КС вводится понятие расходонапряженности потока частиц КПП. Каждый кластер, проходящий через рассматриваемое сечение КС, вносит индивидуальную составляющую в распределение расходонапряженности потока частиц. Данная составляющая для i -го кластера определяется по формуле

$$q_{ci}(x, y) = p_{ci}(x, y)G_{ci}.$$

Суммарная расходонапряженность потока частиц в сечении будет определяться как суперпозиция q_{ci} для всех кластеров, траектории которых пересекают рассматриваемое сечение проточного тракта:

$$q_{пч}(x, y) = \sum_{i=1}^{K_{кл}} q_{ci,j}(x, y).$$

$$h_u = \begin{cases} \left(G_B - \sum_{i=1}^n \left(\iint_{F_i} (g_{bi}\rho w(x, y) - L_0 p_{пч}(x, y)) dx dy \right) \right) \frac{1}{G_B}, & \alpha < 1, \\ \left(G_{ч.м} - \sum_{i=1}^n \left(\iint_{F_i} \left(p_{пч}(x, y) - \frac{\rho w(x, y) g_{bi}}{L_0} \right) dx dy \right) \right) \frac{1}{G_{ч.м}}, & \alpha \geq 1, \end{cases}$$

где $\rho w(x, y)$ – расходонапряженность газа в сечении, g_{bi} – массовая доля воздуха в элементарной области, L_0 – коэффициент стехиометрического соотношения расходов воздуха и частиц.

Аналогично работе [9] вводится в качестве критерия эффективности смешения диффузионный коэффициент D_k , характеризующий эквивалентную длину смешения воздуха с КПП. Для определения D_k в сечении КС с произвольной координатой x_1 применяется следующая зависимость:

$$D_k(x_1) = \frac{\int_{x_0}^{x_1} h_u(x) dx}{x_1 - x_0},$$

где x_0 – координата, соответствующая входу в зону КС. В предельном случае (когда $h_u(x_1) = 1$) значение $D_k(x_1) \rightarrow 1$.

Помимо оценки эффективности смешения важным аспектом при исследовании работоспо-

стоит отметить, что $K_{кл}$ лежит в диапазоне значений $0 - (K_{инн} N_{фр})$, где $K_{кл} = 0$ соответствует случаю, при котором до рассматриваемого сечения произошло осаждение на стенках КС всех частиц, а $K_{кл} = K_{инн} N_{фр}$ в случае, если осаждения частиц до рассматриваемого сечения не происходило.

Одним из количественных критериев оценки равномерности распределения расхода КПП в сечении КС является значение среднеквадратичного отклонения расходонапряженности потока частиц $\sigma_{пч}$

$$\sigma_{пч}(x, y) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{F_i} \iint_{F_i} q_{ci}(x, y) dx dy - q_{cp} \right)^2}.$$

Здесь F_i – элементарная область в рассматриваемом сечении площадью F_i ; n – количество элементарных областей в сечении; $q_{cp} = G_{ч.н}/F_s$ – среднее значение расходонапряженности потока частиц в сечении, $G_{ч.н}$ – суммарный расход частиц КПП в рассматриваемом сечении (с учетом осаждения на стенках). Значение данного критерия показывает, насколько равномерно и однородно поле расходонапряженности частиц КПП в рассматриваемом сечении проточного тракта. В предельном случае (если частицы распределены в сечении равномерно) значение $\sigma_{пч}$ будет стремиться к нулю.

В соответствии с результатами работы [9] в рамках настоящего исследования применяется критерий эффективности смешения h_u , который характеризует максимально возможное значение коэффициента полноты сгорания КПП с воздухом в данном сечении КС. Критерий h_u в случае полифракционного состава КПП, а также с учетом процессов осаждения частиц на стенках проточного тракта КС может быть рассчитан следующим образом:

способности КС является сравнительный анализ интенсивности воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта. Для сравнения интенсивности воздействия при различных способах инжекции ПГ в работе использованы критерии, детально описанные в [10]: I_Σ – интегральная относительная интенсивность эрозионного воздействия частиц на стенки КС; U_1 – средняя плотность потока энергии при ударе одной частицы:

$$I_\Sigma = \frac{1}{u_{кр}^2} \sum_{i=1}^{N_\Phi} \frac{g_i \sum_{j=1}^{N_i} [|\mathbf{u}_{pi}|_j \sin(\beta)]^2}{K_i}, \quad U_1 = \frac{E_1}{\tau F}.$$

Здесь $u_{кр}$ – скорость частиц в выходном отверстии соплового отверстия ГГ; N_i – количество кластеров частиц i -й фракции, попадающих на стенки; K_i – суммарное количество кластеров частиц i -й фракции; E_1 – средняя энергия одного удара частицы о стенку [10]; τ – характерное время взаимодействия частицы со стенкой; F – характерная площадь контакта частицы при ударе [10].

Следует отметить, что существует несколько математических моделей, которые позволили бы оценить эффективность смешения ПГ с воздухом при одновременном учете осаждения и эрозионного воздействия частиц на стенки проточного тракта [16–18]. Немаловажным является то, что применительно к рассматриваемой задаче данные модели имеют ряд ограничений. В частности, их использование предполагает интеграцию дополнительной системы уравнений, описывающей процессы воспламенения и горения конденсированных частиц, в итерационный цикл расчета, что существенно увеличивает требуемые вычислительные ресурсы. Разработанная математическая модель дает возможность сравнить качество смешения ПГ с воздушным потоком в сечении модельной КС и интенсивность воздействия частиц конденсированной фазы на стенки проточного тракта без непосредственного расчета процесса горения. Такой подход дает возможность проводить комплексную оптимизацию системы инжекции ПГ на основе математической обработки результатов газодинамического расчета течения двухкомпонентной не реагирующей смеси и наложенных траекторий конденсированных частиц в квазистационарной постановке. При этом полученные данные позволяют при использовании методики [9] оценивать значения коэффициента полноты сгорания.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Распределение скорости течения V в сечении подачи ПГ модельной КС показано на рис. 3. Хотя V находится в диапазоне 100–300 м/с, на выходе из соплового отверстия ГГ скорость ГПГ для всех вариантов КС достигает 1200 м/с. Стоит от-

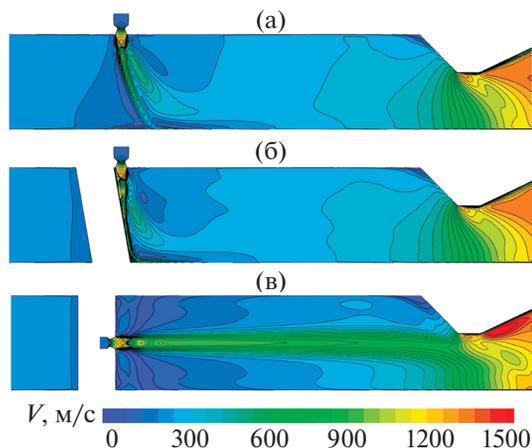


Рис. 3. Распределение скорости потока в продольном сечении модельной КС: (а) – вариант № 1, (б) – 2, (в) – 3.

метить, что для варианта № 2 характерна большая глубина проникновения струи ГПГ в области за пилоном, чем для варианта № 1. Это связано в первую очередь с меньшими скоростями сносимого воздушного потока, воздействующего на корневую область струи ГПГ, при наличии пилона. Однако после взаимодействия струи ГПГ со стенкой, противоположной сопловому отверстию ГГ, происходит образование поперечного вихря и торможение ГПГ до характерных скоростей в КС. В случае спутной подачи ПГ (вариант № 3) торможения струи ГПГ до характерных скоростей воздуха в КС не происходит, и тогда средняя скорость потока ГПГ по длине КС составляет 700–800 м/с.

Инжекция ПГ поперек воздушного потока приводит к образованию поперечных вихрей вблизи нижней и верхней стенок КС. Это достаточно отчетливо видно на рис. 4, где показано распределение массовых долей ГПГ в сечениях проточного тракта. Основной причиной вихреобразования является взаимодействие потока ГПГ со стенками КС. При этом вихрь вблизи нижней стенки более интенсивный и имеет большую протяженность, чем вблизи верхней стенки. Наличие пилона несколько интенсифицирует вихреобразование, что

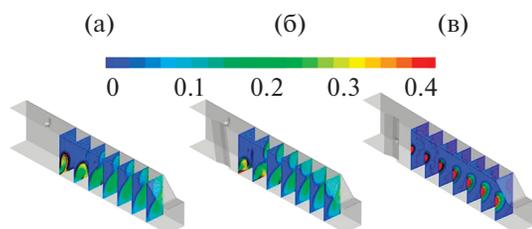


Рис. 4. Распределение массовых долей ГПГ в сечениях проточного тракта по длине КС: (а) – вариант № 1, (б) – 2, (в) – 3.

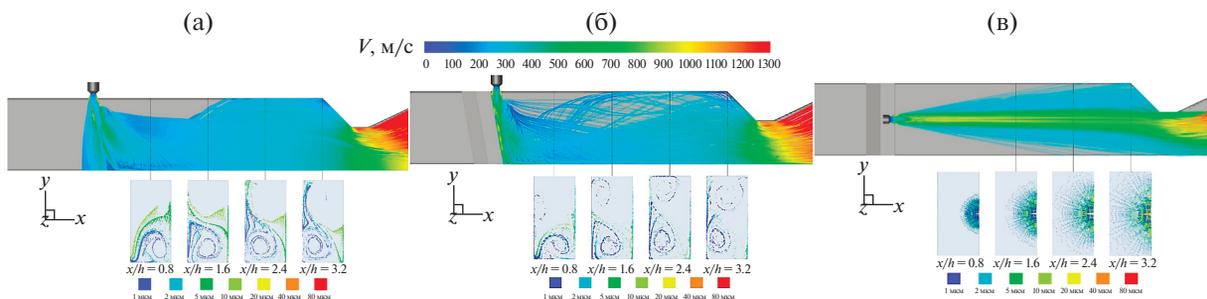


Рис. 5. Траектории движения кластеров частиц в проточном тракте модельной КС: (а) – вариант № 1, (б) – 2, (в) – 3.

является следствием более высоких скоростей течения ГПГ при взаимодействии с нижней стенкой. В варианте № 3 интенсивные вихревые зоны отсутствуют.

На рис. 5 показаны траектории движения кластеров частиц в проточном тракте модельной КС с различными конфигурациями системы инъекции ПГ. Траектории в продольном сечении КС окрашены в соответствии со скоростью движения частиц КПП. Видно, что при инъекции поперек воздушного потока характерным для потока КПП является интенсивное воздействие частиц на стенку КС напротив соплового отверстия ГГ. Скорость частиц при ударе составляет 200–400 м/с в варианте № 1 и 300–600 м/с в варианте № 2. В варианте № 3 взаимодействие частиц со стенкой происходит исключительно в области геометрического сужения проточного тракта. Анализируя траектории движения частиц различной размерности (рис. 5, поперечные сечения), можно видеть, что сносящий поток в варианте № 1 обеспечивает закрутку потока и образование вихревого движения как крупных, так и мелких частиц. В случае инъекции ПГ в торцевую область пилона (вариант № 2) практически все крупные частицы осаждаются на стенку проточного тракта. При этом частицы размерами меньше 10 мкм уносятся потоком и образуются два вихря: вблизи нижней и верхней стенок КС. Траектории движения кластеров в варианте № 3 практически прямолинейны. При этом в конце КС ($x/h = 3.2$) наблюдается достаточно полное заполнение частицами ядра поперечного сечения проточного тракта.

Определение характеристик смешения частиц КПП с воздухом проводится на основе анализа расходонапряженности потока частиц в контрольных сечениях КС. В соответствии с предложенной моделью вторичной обработки результатов численного моделирования построение функций $q_{пч}$ проводится на основе дискретно-непрерывного преобразования параметров распределения КПП в произвольном сечении КС с применением ПЛТЧ-функции.

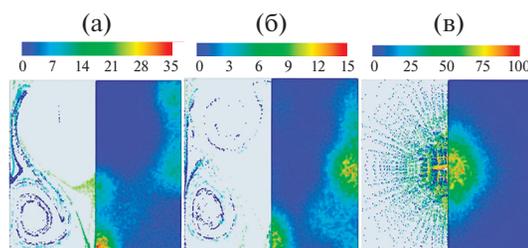


Рис. 6. Примеры построения $q_{пч}$ в сечении КС $x/h = 3.2$: (а) – вариант № 1, (б) – 2, (в) – 3.

Пример построения функций $q_{пч}$ в сечении $x/h = 3.2$ для различных вариантов конфигурации КС показан на рис. 6. Здесь для сравнения представлены распределение траекторий частиц КПП в сечении (слева от оси симметрии канала) и поля распределения функции $q_{пч}$ (справа от оси симметрии канала). Анализ данных распределений показывает, что для каждого из вариантов конфигурации существуют локальные максимумы расходонапряженности потока частиц, которые составили $q_{пч} \approx 35$ кг/(с м²) для варианта № 1, 15 – для № 2, 100 – для № 3. При этом среднее значение расходонапряженности потока частиц в сечении составило 2.8 кг/(с м²), 1.6, 7.9 для вариантов №№ 1, 2, 3 соответственно. На основе полученных данных могут быть определены равномерность распределения частиц КПП (характеризуется параметром $\sigma_{пч}$) в сечении и качество смешения конденсированных частиц с воздухом (характеризуется критериями h_u и D_k).

Среднеквадратичное отклонение расходонапряженности потока частиц показывает (рис. 7), что для вариантов №№ 1, 2 оно находится на уровне 7–15 кг/(с м²) практически по всей длине рассматриваемой КС. Следует отметить, что установка пилон дает возможность снизить $\sigma_{пч}$ практически в 2 раза по всей длине проточного тракта. При этом имеется локальный минимум распределения $\sigma_{пч}$ при $x/h = 1.6–2.4$. Для варианта № 3 наблюдается монотонное снижение среднеквадратичного

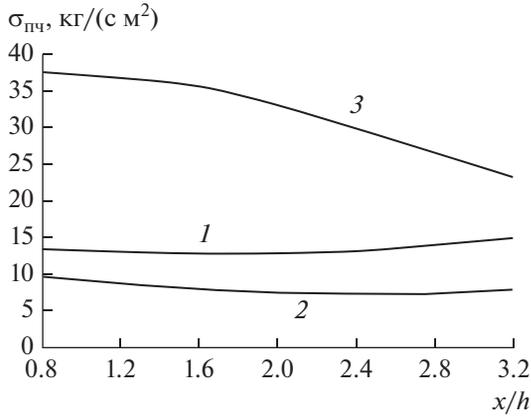


Рис. 7. Среднеквадратичное отклонение расходонапряженности потока частиц по длине КС для схем: 1 – вариант № 1, 2 – 2, 3 – 3.

отклонения расходонапряженности с $\sigma_{пч} = 37$ до 23 кг/(с м²). Полученные данные показывают, что инжекция ПГ поперек сносящего воздушного потока позволяет снизить $\sigma_{пч}$ при $x/h = 3.2$ в 1.5–3.2 раза и, как следствие, получить более равномерное распределение частиц КПП в выходном сечении КС за счет перемешивания потоков посредством вихреобразования.

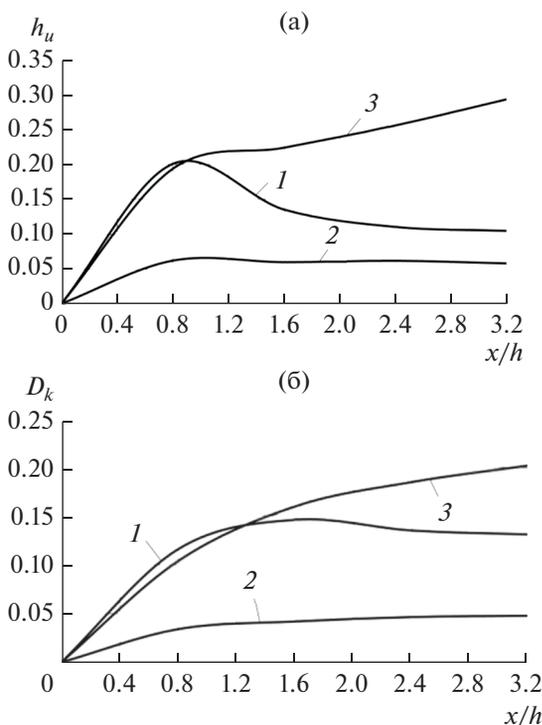


Рис. 8. Зависимости h_u (а) и D_k (б): 1 – вариант № 1, 2 – 2, 3 – 3.

Несмотря на получаемый уровень равномерности смешения (в сравнении с результатами работы [9]) $\sigma_{пч}$ для рассматриваемых в данном исследовании конфигураций КС получилась в среднем в три раза ниже, что говорит о более равномерном распределении частиц КПП в сечениях модельного проточного тракта) для вариантов инжекции ПГ №№ 1, 2, критерии h_u и D_k оказались более высокими для варианта № 3 (рис. 8). Следует отметить, что для варианта № 3 D_k вблизи выходного сечения модельной КС в 1.5 раза выше относительно варианта № 1 и в 4 раза – относительно варианта № 2. Это говорит о том, что спутная с воздушным потоком инжекция ПГ позволяет повысить эффективность смешения за счет минимизации осаждения частиц на стенках проточного тракта.

Для анализа осаждения частиц КПП на стенки условно можно разделить проточный тракт на четыре участка:

- первый участок – $x/h = 0-0.8$,
- второй – $x/h = 0.8-1.6$,
- третий – $x/h = 1.6-2.4$,
- четвертый – $x/h = 2.4-3.2$.

Расчеты показывают (рис. 9), что на стенках первого участка в варианте № 1 инжекции ПГ осажается более 50% от массового расхода всех частиц. Для варианта № 2 осаждение частиц на первом участке КС более значительно и составляет около 73% от общего массового расхода КПП. Причем частицы диаметром более 10 мкм осаждаются с вероятностью практически 100% для обоих вариантов инжекции ПГ. С уменьшением диаметра наблюдается также и снижение процентного соотношения осажденных частиц. Для частиц диаметром 1–10 мкм доля осажденных частиц КПП от общего расхода составила 2–60% в варианте № 1 и 10–90% – в № 2. Как видно, наличие пилона снижает воздействие сносящего воздушного потока на частицы в зоне инжекции ПГ, что при-

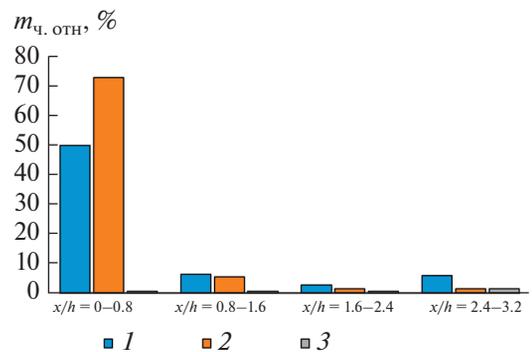


Рис. 9. Доля от общего расхода КПП осевших на стенках частиц на контрольных участках КС различных схем: 1 – вариант № 1, 2 – 2, 3 – 3.

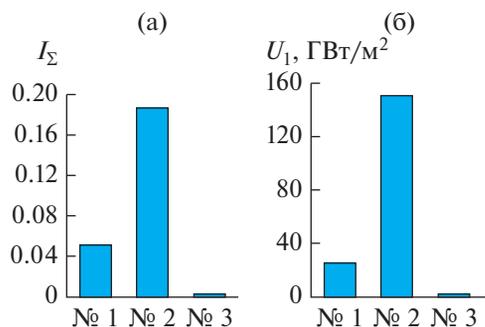


Рис. 10. Диаграммы значений I_{Σ} (а) и U_1 (б).

водит к более существенному осаждению частиц на нижней стенке.

На последующих участках в каждом из этих двух вариантов суммарно осаждаются менее 15% от массового расхода частиц. При этом на каждом из отдельных участков доля осаждаемых частиц каждой фракции не превышает 8%. На некотором удалении от места инъекции ($x/h \approx 1$) частицы приходят в скоростное равновесие с потоком газа и увлекаются вслед за ним. Осаждение частиц на участках 2–4 происходит в результате взаимодействия частиц со стенками КС при их движении в больших вихревых структурах газа (данные структуры отчетливо видны по траекториям движения частиц на рис. 5). В варианте № 3 суммарное количество частиц, попадающих на стенку, не превышает 5%, при этом их большая часть осаждается на сужающейся части проточного тракта.

Анализ закономерностей воздействия частиц на стенки проточного тракта (рис. 10) показал, что наибольшая интенсивность этого процесса наблюдается в варианте № 2 ($I_{\Sigma} = 0.18$ и $U_1 = 150$ ГВт/м²). Эти значения более чем на порядок выше аналогичных показателей, представленных в работе [10]. Такое увеличение I_{Σ} и U_1 может указывать на интенсивную эрозию стенок в месте попадания частиц (на первом участке нижней стенки КС). Для варианта № 1 интенсивность воздействия частиц на стенку практически в четыре раза ниже относительно варианта № 2. Наименьшее воздействие частиц наблюдается в варианте № 3 ($I_{\Sigma} = 1.5 \times 10^{-3}$ и $U_1 = 0.2$ ГВт/м²). Вследствие этого можно считать, что для обеспечения длительной работоспособности проточного тракта КС целесообразно реализовать спутную с основным потоком инъекцию ПГ с торцевой стенки пилона.

Комплексный анализ результатов расчетного исследования показал, что для рассматриваемой конфигурации модельной КС наиболее предпочтительным по критериям эффективности смешения и минимизации эрозионного воздействия на

стенку проточного тракта является вариант № 3, когда инъекция ПГ реализуется спутно потоку через сопловое отверстие ГГ, расположенное на торцевой поверхности пилона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ результатов проведенного исследования смесеобразования в модельной КС малого удлинения с прямоугольным поперечным сечением позволяет сделать следующие выводы.

1. Предложенный алгоритм обработки расчетных данных посредством введения вероятностного подхода при траекторной оценке распределения частиц КПП может быть использован для анализа эффективности смешения и минимизации эрозионного воздействия частиц на стенки проточного тракта КС.

2. Структура течения при поперечной инъекции ПГ обеспечивает закрутку потока и образование вихревого движения как крупных, так и мелких частиц. Для частиц диаметром $d_q > 10$ мкм характерно наиболее интенсивное осаждение на стенке проточного тракта. В случае спутной инъекции ПГ траектории движения частиц практически прямолинейны и при $x/h = 3.2$ наблюдается достаточно полное заполнение частицами ядра поперечного сечения проточного тракта КС с минимальным осаждением частиц всех рассматриваемых размеров.

3. Относительное среднее квадратичное отклонение расходонапряженности потока частиц для варианта инъекции ПГ № 1 практически в 5.5 раз превышает ее среднее значение для рассматриваемой конфигурации. Установка пилона дает возможность снизить величину $\sigma_{пч}$ почти в 2 раза в абсолютных и в 3.5 раза в относительных ($\sigma_{пч}/q_{ср}$) величинах по всей длине проточного тракта. В варианте № 3 наблюдается монотонное снижение среднее квадратичного отклонения расходонапряженности с $\sigma_{пч}/q_{ср} = 4.7$ до 2.9.

4. Спутная с воздушным потоком инъекция ПГ позволяет повысить эффективность смешения за счет минимизации осаждения частиц на стенках проточного тракта. Для варианта № 3 интегральный параметр смешения D_k в 1.5 раза выше относительно варианта № 1 и в 4 раза – относительно варианта № 2.

5. При инъекции поперек воздушного потока характерно интенсивное воздействие на стенку КС напротив соплового отверстия ГГ. Скорость частиц при ударе составляет 200–400 м/с для варианта № 1 и 300–600 м/с для варианта № 2. При спутной инъекции ПГ (вариант № 3) взаимодействие частиц со стенкой происходит исключительно в области геометрического сужения проточного тракта. Наибольшая интенсивность воздействия частиц на стенку наблюдается в варианте № 2 ($I_{\Sigma} = 0.18$, $U_1 =$

= 150 ГВт/м²). В варианте № 1 интенсивность воздействия частиц на стенку практически в четыре раза ниже. Наименьшее воздействие частиц наблюдается в варианте № 3 ($I_2 = 1.5 \times 10^{-3}$, $U_1 = 0.2$ ГВт/м²).

Полученные результаты могут быть использованы на этапе предварительного проектирования и выбора конфигурации системы инжекции ПГ в КС перспективных энергосиловых установок.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-49-02031)¹.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Van Wie D.M., D'Alessio S.M., White M.E.* Hypersonic Airbreathing Propulsion // Johns Hopkins APL Tech. Dig. 2005. V. 26. № 4. P. 430.
2. *Дегтярь В.Г., Сон Э.Е.* Гиперзвуковые летательные аппараты. М.: Янус-К, 2018. С. 189.
3. *Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верховолов В.К., Граменицкий М.Д., Дулепов Н.П., Скибин В.А., Суриков Е.В., Хилькевич В.Я., Яновский Л.С.* Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / Под ред. Яновского Л.С. М.: Академкнига, 2006. С. 343.
4. *Haddad A., Natan B., Arieli R.* The Performance of a Boron-loaded Gel-fuel Ramjet // Progress in Propulsion Physics. 2011. V. 2. P. 499.
5. *Вареных Н.М., Шабунин А.И., Сарабьев В.И.* Основные направления разработки твердых пиротехнических топлив для воздушно-реактивных двигателей с повышенными энерго-баллистическими характеристиками // Боеприпасы и спецхимия. 2013. № 1. С. 44.
6. *Арефьев К.Ю., Воронцов А.В., Прохоров А.Н., Яновский Л.С.* Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнталийном воздушном потоке // ФГВ. 2017. Т. 53. № 3. С. 42.
7. *Арефьев К.Ю., Захаров В.С., Серпинский О.С., Федотова К.В.* Влияние способа подачи газогенераторного газа на эффективность смешения в каналах со сверхзвуковым потоком // Актуальные проблемы российской космонавтики. Матер. XXXVIII академических чтений по космонавтике. Сб. тез. М.: Комиссия РАН, 2014. С. 151. <http://ihst.ru/~akm/38t7.pdf>
8. *Арефьев К.Ю., Прохоров А.Н., Савельев А.С.* Исследование деструкции капле в вихревом следе за пилоном при высоких скоростях набегающего воздушного потока // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25. № 1. С. 57.
9. *Воронцов А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А.* Расчетное исследование инжекции двухфазного потока горящего в цилиндрическую камеру дожига с несимметричным подводом воздуха // Теплофизика и аэромеханика. 2020. Т. 27. № 6. С. 833.
10. *Воронцов 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 прямоточного воздушно-реактивного двигателя // Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2018. № 4(121). С. 16.
11. *Воронцов А.В., Сучков С.А., Филимонов Л.А.* Особенности течения сверхзвуковых двухфазных потоков продуктов сгорания в каналах со специально формируемой системой скачков уплотнения // Теплофизика и аэромеханика. 2007. Т. 14. № 2. С. 209.
12. *Воронцов А.В.* Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2016. № 1. С. 10. <https://doi.org/10.7463/0116.0830993>
13. *Liou M.-S., Steffen C.J.* A New Flux Splitting Scheme // J. Comput. Phys. 1993. V. 107. № 1. P. 23.
14. *Langtry R.B., Menter F.R.* Correlation-based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes // AIAA J. 2009. V. 47. № 12. P. 2894.
15. *Ягодников Д.А., Лапицкий В.И., Сухов А.В., Томак В.И.* Результаты морфологического, химического и дисперсного анализа конденсированных продуктов сгорания пиротехнических составов // Инж. вестник. 2014. № 11. С. 12.
16. *Xu S., Hao X., Zhang H.* Calculation of Internal Insulation Ablation Mass Loss of Solid Rocket Motor // J. Solid Rocket Technol. 2003. № 3. P. 28.
17. *Zhang B., Liu Y., Wang C., Ren J.* Computation of Ablation of Thermal-protection Layer in Long-time Working Solid Rocket Motors // J. Solid Rocket Technol. 2011. № 2. P. 189.
18. *Li L., Yang T., Cheng X., Yang L.* Ablation Model of Silicon Insulator in Ramjet Combustion Chamber // J. Propul. Technol. 2012. № 3. P. 450.

¹ Примечание: в статье "Исследование плазменного воздействия на эффективность горения газообразного метана в сверхзвуковом потоке" Арефьева К.Ю., Александрова В.Ю., Рудинского А.В., Федотовой К.В., Крикуновой А.И., Панова В.А. (ТВТ. 2021. Т. 59. № 4. С. 548) вместо "Поступила в редакцию 12.07.2020 г." следует читать "Поступила в редакцию 12.08.2020 г."