

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СМЕШЕНИЯ ПРОДУКТОВ ГАЗИФИКАЦИИ ТВЕРДЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ С ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНЫМ ГАЗОВЫМ ПОТОКОМ В КАНАЛАХ ПОСТОЯННОГО СЕЧЕНИЯ

К.В. Федотова<sup>1,2</sup>

fedkv\_89@mail.ru

К.Ю. Арефьев<sup>1,2,3</sup>

arefyev@rambler.ru

А.В. Сухов<sup>2</sup>

Л.С. Яновский<sup>1,4</sup>

yanovskiy@ciam.ru

<sup>1</sup>Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

<sup>3</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет), г. Долгопрудный, Московская обл., Российская Федерация

<sup>4</sup>Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, Московская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведены результаты численного моделирования процессов смешения продуктов газификации твердых углеводородов с дозвуковым потоком высокоэнтальпийной кислородсодержащей смеси газов в каналах постоянного сечения. Разработана математическая модель для расчета полноты смешения, основанная на решении системы полных осредненных по Фавру уравнений Навье — Стокса для вязкого теплопроводного газа в трехмерной нестационарной постановке с учетом турбулентности. В технически значимом диапазоне рабочих параметров исследования возможность интенсификации смесеобразования в канале постоянного сечения посредством изменения числа сопел подачи продуктов газификации твердых углеводородов, выбора угла вдува и возбуждения пульсаций давления в струе продуктов газификации твердых углеводородов. Полученные данные будут полезны на этапе поисковых исследований для оценки эффективности рабочего процесса при диффузионном горении смеси газов в каналах постоянного сечения

### Ключевые слова

Численное моделирование, смешение газовых потоков, продукты газификации твердых углеводородов, методы вычислительной гидрогазодинамики, полуэмпирическая модель турбулентности, пульсация давления в сверхзвуковой струе

Поступила в редакцию 26.12.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

---

*Работа выполнена при поддержке РНФ (грант № 15-11-30012)*

**Введение.** Одним из путей повышения эффективности рабочего процесса в перспективных энергетических и силовых установках является интенсификация смесеобразования горючего с потоком окислителя. Выявлено [1–3], что для

энергетических и силовых установок актуально использование продуктов газификации твердых углеводородов (ПГТУ) в качестве горючего, а высокоэнтальпийных кислородсодержащих смесей газов (ВКСГ), в частности воздуха, — в качестве окислителя.

В настоящей работе рассмотрены процессы смешения ПГТУ и ВКСГ в каналах постоянного сечения (рис. 1): ВКСГ 1 подается в канал 2 через входное сечение 3, ПГТУ 4 — через сопла 5, расположенные на верхней стенке канала, а образовавшаяся газовая смесь выходит через сечение 6. Приведенная схема подачи ПГТУ обусловлена конструкционными и технологическими особенностями проектирования энергосиловых установок [2]. Такой способ подачи ПГТУ требует интенсификации смесеобразования в канале с минимально возможными потерями полного давления потока ВКСГ. Отметим, что к факторам, оказывающим наиболее сильное влияние на эффективность процесса смешения ПГТУ и ВКСГ, относятся число сопел, направление подачи, соотношения массовых расходов и скоростных напоров газов [4].

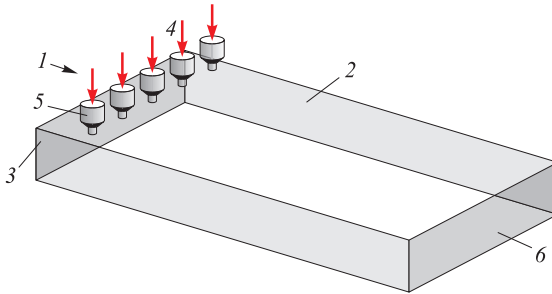


Рис. 1. Схема подачи газов

Несмотря на большое число экспериментальных и теоретических работ [2, 4, 5–7], посвященных исследованию массообмена между сверхзвуковыми струями и сносимым потоком, оптимизация геометрических и режимных параметров для улучшения смесеобразования ПГТУ и ВКСГ требует дополнительного изучения. Особенности массообмена для рассматриваемого случая связаны со специфическими теплофизическими свойствами газов, существенным различием между термобарометрическими параметрами смешиваемых потоков, а также с ограниченными размерами канала, в котором происходит образование топливоздушнoй смеси, что существенно влияет на эффективность смесеобразования. Поэтому возникает необходимость в обосновании выбора конфигурации сопел подачи ПГТУ и разработки методов интенсификации смешения в канале. Для эффективного смешения требуется определить число сопел, углы вдува ПГТУ и соотношения скоростных напоров.

Один из наиболее перспективных способов интенсификации смесеобразования ПГТУ с дозвуковым потоком ВКСГ — акустическое воздействие путем возбуждения пульсаций давления с различными спектральными характери-

ками. Значительным преимуществом такого способа перед другими является то, что он обеспечивает интенсификацию массообмена в канале практически без потерь полного давления. Из работ [8–10], посвященных исследованию массообмена в свободных струях со сложной спектральной характеристикой пульсаций давления, следует, что эффекты, связанные с акустическими, газодинамическими и физико-химическими процессами, возникающими при взаимодействии пульсирующей струи ПГТУ с потоком ВКСГ, в настоящее время изучены недостаточно. При этом важны количественные оценки эффективности акустического воздействия на смесеобразование в канале.

Применение аналитических методов анализа затруднено ввиду значительного влияния нестационарных пространственных явлений массообмена при взаимодействии струи с потоком с разными термобарометрическими параметрами.

Настоящая статья посвящена численному моделированию процессов смешения ПГТУ с дозвуковым потоком ВКСГ в каналах постоянного сечения в целях обоснования выбора геометрических и режимных параметров, обеспечивающих наибольшую интенсивность смесеобразования с минимальными потерями полного давления.

**Математическая модель.** Для моделирования нестационарного пространственного турбулентного течения при смешении сверхзвуковой струи со сносимым дозвуковым потоком в каналах могут быть использованы методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), основанные на численном решении системы уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, дополненной уравнениями состояния и диффузии компонентов [11]. Данную систему принято называть уравнениями Навье — Стокса [12].

Для описания турбулентности при решении уравнений Навье — Стокса применяется метод RANS [13], основанный на использовании осредненных по времени параметров и замыкании системы уравнений полуэмпирической моделью турбулентности [14]. Метод RANS позволяет минимизировать затраты вычислительных ресурсов в расчетах сложных газодинамических течений.

В рассматриваемой математической модели в каждом элементарном объеме

произвольный параметр потока  $f$  осредняется либо по Рейнольдсу  $\bar{f} = \frac{1}{T^*} \int_t^{t+T^*} f dt$ ,

либо по Фавру  $\tilde{f} = \frac{1}{\rho} \int_t^{t+T^*} \rho f dt$  [15]. Здесь  $T^*$  — период осреднения;  $t$  — время;

$\rho$  — плотность. В тензорной форме в декартовой системе координат осредненные уравнения Навье — Стокса имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_j) &= 0, \\ \frac{\partial (\bar{\rho} \tilde{U}_j)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \tilde{U}_j \tilde{U}_i) &= -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij}}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{p} (\widetilde{U_i U_j} - \tilde{U}_i \tilde{U}_j)], \end{aligned} \tag{1}$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{f}_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{p} \tilde{U}_j \tilde{f}_m + \overline{J_{mj}}) + \frac{\partial}{\partial x_j} [\bar{p} (\widetilde{f_m U_j} - \tilde{f}_m \tilde{U}_j)] = 0,$$

$$\frac{\partial \tilde{e}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} [(\tilde{e} + \bar{p}) \tilde{U}_j] = -\frac{\partial \tilde{q}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{\tau}_{ij} \tilde{U}_j}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\widetilde{e U_j} - \tilde{e} \tilde{U}_j + \overline{p U_j} - \bar{p} \tilde{U}_j) + S_h, \quad (1)$$

$$\bar{p} = p R T \sum_m \frac{\tilde{f}_m}{M_m}.$$

Здесь  $i, j = 1, 2, 3$ ;  $m = 1, 2$ ;  $x_i, x_j$  — координаты в декартовой системе координат;  $U_i, U_j$  — проекции вектора скорости газа на оси системы координат;  $p$  — статическое давление;  $\tau_{ij}$  — тензор вязких напряжений;  $f_m$  — массовые доли компонентов смеси;  $J_{mj}$  — диффузионный поток массы;  $e$  — удельная внутренняя энергия;  $q_j$  — проекция теплового потока;  $S_h$  — источниковый член;  $R$  — универсальная газовая постоянная;  $T$  — температура;  $M_m$  — молярная масса компонентов смеси.

Компоненты тензора вязких напряжений и составляющие вектора теплового потока выражаются следующим образом:

$$\tilde{\tau}_{ij} = \bar{\mu} \left( \frac{\partial \tilde{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{U}_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \tilde{U}_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \right);$$

$$\tilde{q}_j = -\bar{\lambda} \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j},$$

где  $\bar{\mu}$  — динамическая вязкость;  $\delta_{ij}$  — оператор Кронекера;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $k = 1, 2, 3$ . Внутренняя энергия  $\tilde{e}$  и энтальпия  $\tilde{h}$  связаны соотношением  $\tilde{h} = \tilde{e} + \frac{\bar{p}}{\rho}$ . Источниковый член в системе (1) моделирует процесс горения путем объемного подвода теплоты. Значение  $S_h$  определяется как

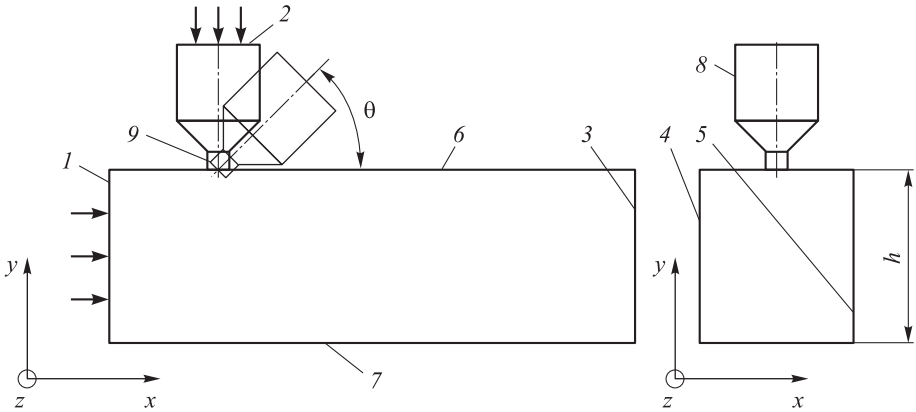
$$S_h = \frac{H_u G_\Sigma \eta}{V_{к.с}},$$

где  $H_u$  — теплота сгорания ПГТУ в воздухе;  $G_\Sigma$  — суммарный секундный массовый расход ПГТУ;  $\eta$  — коэффициент полноты сгорания ПГТУ;  $V_{к.с}$  — объем, в котором реализуется горение смеси газов.

В настоящей работе использована полуэмпирическая модель турбулентности Transition SST [16], содержащая четыре дополнительных уравнения переноса для определения кинетической энергии турбулентности и удельной скорости диссипации. Это обусловлено тем, что данная модель позволяет решать задачу взаимодействия потоков с различными скоростными и термобарометрическими параметрами [17].

В целях экономии вычислительных ресурсов газодинамическое течение моделируется в пределах одного модуля канала, расчетная область которого показана на

рис. 2. Предположим, что на левой 4 и правой 5 границах расчетной области выполняется условие симметрии:  $U_z = 0, \partial p / \partial z = 0, \partial T / \partial z = 0, \partial U_x / \partial z = 0, \partial U_y / \partial z = 0$ . Такое допущение справедливо, если ширина рассматриваемого канала на порядок больше его высоты, и следовательно, для определения основных закономерностей смесеобразования краевыми эффектами можно пренебречь. Другие граничные условия для моделирования выбраны следующим образом.



**Рис. 2.** Схема расчетной области:

1 и 2 — подача ВКСГ и ПГТУ; 3 — выход смеси газов; 4, 5 — плоскости симметрии; 6, 7, 8 — адиабатические стенки; 9 — критическое сечение сопла

В расчетную область через сечение 2, где заданы плотность потока массы и температура торможения газа, при различных углах  $\theta$  наклона сопла к оси канала подается ПГТУ. На границе 1 расчетной области заданы параметры подачи ВКСГ, а на границе 3 — условия, соответствующие выходному сечению канала. Расчетная область ограничена непроницаемыми адиабатическими стенками 6, 7, 8.

Выбор площади критического сечения сопла  $F_{кр}$  определяется следующим образом. В качестве исходных данных для расчета принимаются массовый расход ВКСГ  $G_{ВКСГ}$ , коэффициент избытка окислителя  $\alpha$  и стехиометрическое соотношение  $L_0$ . Массовый расход ПГТУ  $G_{ПГТУ}$  определяется по формуле

$$G_{ПГТУ} = \frac{G_{ВКСГ}}{\alpha L_0}.$$

Тогда необходимый диаметр критического сечения сопла  $D_{кр}$  вычисляется из условия реализации режима течения с числом Маха  $M = 1$  в сечении 9 (см. рис. 2):

$$D_{кр} = \sqrt{\frac{4F_{кр}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4G_{ПГТУ}\beta\varphi_{\beta}}{\pi\rho_{ПГТУ}\mu_c}},$$

где  $\beta$  — расходный комплекс, определяемый из термодинамического расчета;  $\varphi_{\beta}$  — коэффициент расходного комплекса;  $\rho_{ПГТУ}$  — давление ПГТУ;  $\mu_c$  — коэффициент расхода сопла.

Для обобщения исходных данных и результатов моделирования введем понятие относительного скоростного напора продуктов газификации:  $q_{\text{отн}} = \frac{q_{\text{ПГТУ}}}{q_{\text{ВКСГ}}}$ .

Здесь скоростные напоры ПГТУ и ВКСГ определяются по формулам:

$$q_{\text{ПГТУ}} = \frac{\rho_{\text{ПГТУ}} W_{\text{ПГТУ}}^2}{2} = \frac{G_{\text{ПГТУ}} W_{\text{ПГТУ}}}{2F_{\text{кр}}},$$

$$q_{\text{ВКСГ}} = \frac{G_{\text{ВКСГ}} W_{\text{ВКСГ}}}{2F_{\text{к}}},$$

где  $W_{\text{ПГТУ}}$  — скорость на срезе газовой форсунки подачи ПГТУ;  $W_{\text{ВКСГ}}$  — средняя скорость ВКСГ в канале;  $\rho_{\text{ПГТУ}}$  — плотность ПГТУ;  $F_{\text{к}}$  — площадь канала.

Для оценки эффективности процесса смешения в канале предложено использовать коэффициент полноты смешения  $\eta_{\text{см}}$ , определяемый как

$$\eta_{\text{см}} = \begin{cases} \frac{G_{\text{ПГТУ}} - \int v_{\text{ПГТУ}} (f_{\text{ПГТУ}} - f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}}) \rho U dF}{G_{\text{ПГТУ}}} & \text{при } \alpha \geq 1; \\ \frac{G_{\text{ВКСГ}} - \int v_{\text{ВКСГ}} (f_{\text{ВКСГ}}^{\text{пред}} - f_{\text{ВКСГ}}) \rho U dF}{G_{\text{ВКСГ}}} & \text{при } \alpha < 1. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь  $v_{\text{ПГТУ}}$ ,  $v_{\text{ВКСГ}}$  — коэффициенты массового содержания:

$$v_{\text{ПГТУ}} = 0 \text{ при } f_{\text{ПГТУ}} < f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}},$$

$$v_{\text{ПГТУ}} = 1 \text{ при } f_{\text{ПГТУ}} \geq f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}},$$

$$v_{\text{ВКСГ}} = 0 \text{ при } f_{\text{ВКСГ}} > f_{\text{ВКСГ}}^{\text{пред}},$$

$$v_{\text{ВКСГ}} = 1 \text{ при } f_{\text{ВКСГ}} \leq f_{\text{ВКСГ}}^{\text{пред}};$$

$f_{\text{ПГТУ}}$  и  $f_{\text{ВКСГ}}$  — массовое содержание ПГТУ и ВКСГ;  $f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}}$  и  $f_{\text{ВКСГ}}^{\text{пред}}$  — предельное массовое содержание ПГТУ и ВКСГ;  $\rho$  — плотность потока;  $U$  — скорость потока смеси газов в сечении;  $F$  — площадь поперечного сечения канала.

Предельные массовые содержания ПГТУ и ВКСГ, которые могут вступить в химические реакции, определяются как

$$f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}} = \frac{1}{1 + L_0};$$

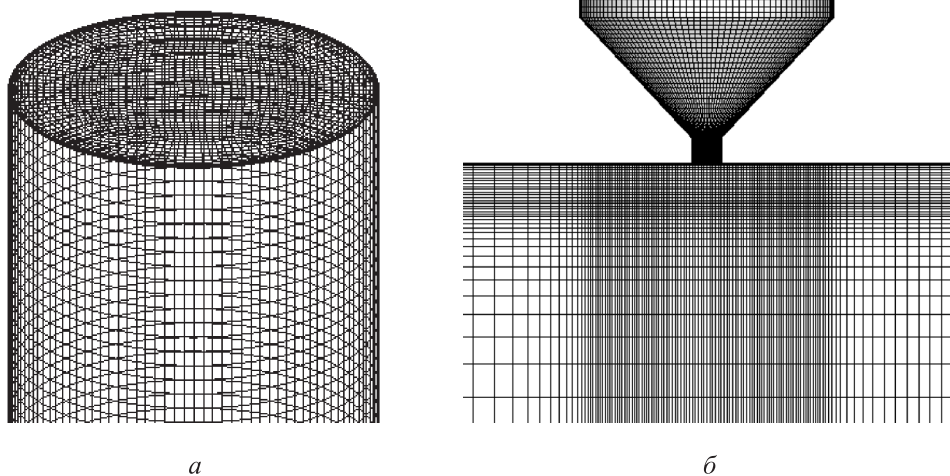
$$f_{\text{ВКСГ}}^{\text{пред}} = \frac{L_0}{1 + L_0}.$$

Расчет по формулам (2) позволяет для каждого сечения канала найти отношение массового расхода компонента (ПГТУ при  $\alpha \geq 1$ , ВКСГ при  $\alpha < 1$ ), способного вступить в химическую реакцию, к его суммарному массовому расходу.

При идеальном смешении ПГТУ с ВКСГ полнота смешения примет значение  $\eta_{см} = 1$ . Однако в реальности коэффициент полноты смешения  $\eta_{см} < 1$ . Таким образом, формулы (2) позволяют оценить качество смесеобразования в канале.

Известно [18], что одним из основных показателей эффективности рабочего процесса в воздушно-реактивных двигателях (ВРД) является значение коэффициента полноты сгорания, определить которое можно экспериментально или моделируя газодинамическое течение, учитывая кинетику химических реакций. Эти работы требуют значительных материальных и временных затрат. Однако в предельном случае, когда горение топливной смеси происходит в диффузионном режиме, коэффициенты полноты сгорания и полноты смешения будут равны [7]. Таким образом, на режимах, близких к диффузионному, скорость сгорания ПГТУ с ВКСГ лимитируется скоростью их смешения [19, 20]. На этапе поисковых исследований допустимо оценивать эффективность рабочего процесса, используя коэффициент полноты смешения в качестве основного критерия.

В численных расчетах использована блочная гексагональная сетка объемом ~5,5 млн ячеек. Для разрешения пограничного слоя выполнено сгущение расчетной сетки к стенкам (рис. 3, а). Кроме того, сгущение расчетной сетки проводилось в области интенсивного взаимодействия потоков (рис. 3, б), где реализуются высокие градиенты параметров.



**Рис. 3.** Блочная гексагональная сетка для проведения численного расчета в областях сечения подачи ПГТУ (а) и вдува струи в сносящий поток (б)

Приведенная математическая модель позволяет исследовать влияние различных факторов на процесс смешения струй ПГТУ с ВКСГ и способы его интенсификации.

**Анализ результатов.** Параметрическое исследование влияния пространственных эффектов на процессы смешения проведено для различных значений коэффициента избытка окислителя  $\alpha = 1-2$  и отношения числа газовых форсунок к единице ширины канала  $n = 3,6 \dots 5,0$  шт./м.

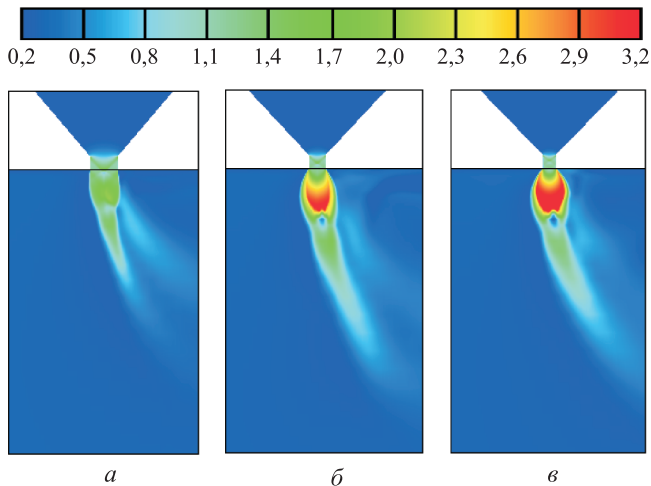
Значения  $D_{кр}$  и  $q_{отн}$  для различных  $\alpha$  и  $n$  приведены в таблице.

**Значения диаметров критических сечений и относительного скоростного напора**

Коэффициент избытка окислителя $\alpha$	Диаметр сечения подачи ПГТУ $D_{кр}$ при $n$ , шт./м		Скоростной напор $q_{отн}$ при $n$ , шт./м	
	3,6	5,0	3,6	5,0
1	0,024	0,020	35,4	36,4
	0,014	0,012	97,5	94,9
	0,011	0,009	154,2	164,6
2	0,017	0,014	35,3	37,1
	0,01	0,009	95,6	84,4
	0,008	0,007	145,9	136,0

В настоящей работе приведены значения коэффициента избытка окислителя  $\alpha \geq 1$ . Для этого случая полнота смешения в сечении камеры сгорания (КС)  $\eta_{см} = 1$ , если массовое содержание ПГТУ в любой точке этого сечения не превышает предельного значения  $f_{ПГТУ}^{пред}$ . Если  $f_{ПГТУ} > f_{ПГТУ}^{пред}$ , в газовой смеси имеется избыток горючих компонентов, который не может прореагировать с окислителем, что негативно сказывается на эффективности рабочего процесса.

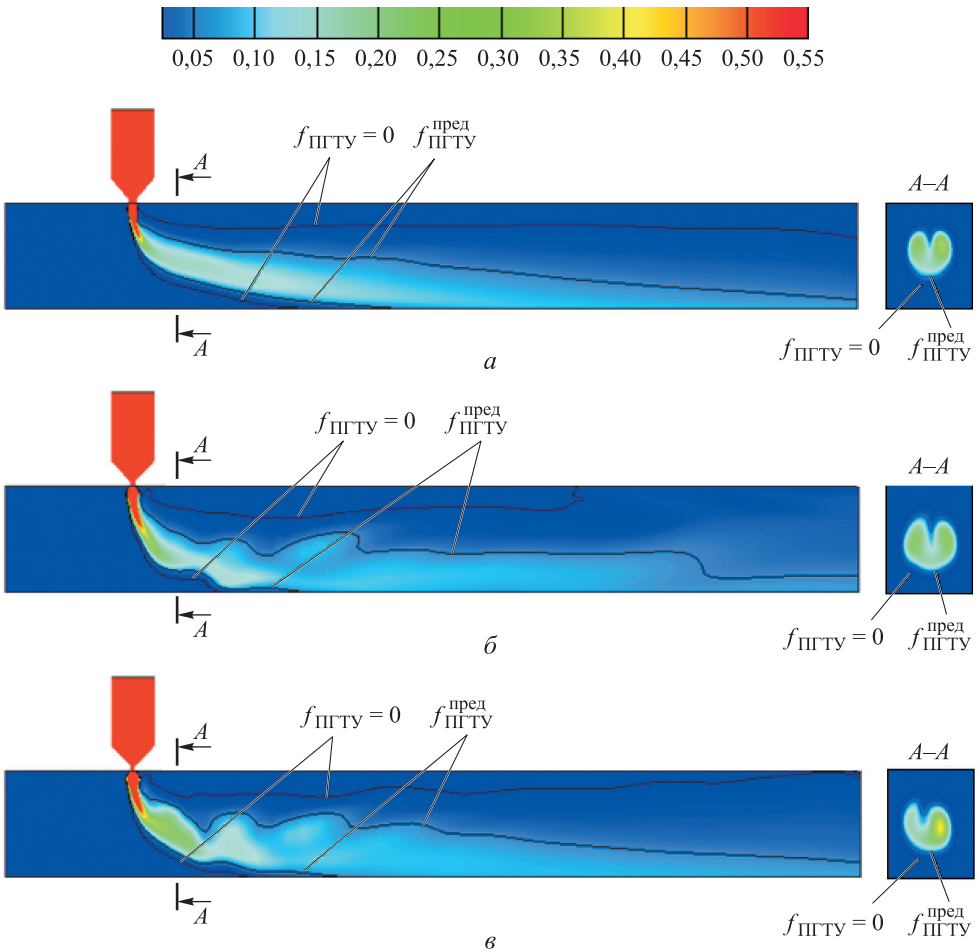
На рис. 4 приведены поля числа Маха в зависимости от относительного скоростного напора  $q_{отн}$ . С повышением  $q_{отн}$  увеличивается степень нерасчетности струи ПГТУ, что приводит к формированию недорасширенной струи бочкообразной формы. Отметим, что при повышении  $q_{отн}$  увеличиваются размеры циркуляционных зон, образующихся в канале в непосредственной близости от сопла. Наличие циркуляционных зон оказывает значительное влияние на интенсивность турбулентного массообмена.



**Рис. 4.** Поля числа Маха при разных относительных скоростных напорах  $q_{отн} = 36$  (а), 95 (б), 165 (в)



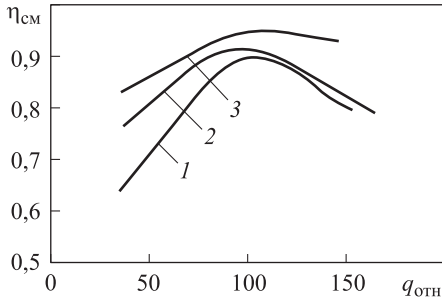
На рис. 5 для характерных значений скоростного напора приведены поля массового содержания ПГТУ в смеси газов. Изолиниями показаны границы зоны с  $0 \leq f_{\text{ПГТУ}} \leq f_{\text{ПГТУ}}^{\text{пред}}$ . Характерной особенностью этой зоны является то, что все ПГТУ в ней могут прореагировать с ВКСГ. При  $q_{\text{отн}} = 36$  струя ПГТУ интенсивно сносится и слабо смешивается с потоком ВКСГ, имеется зона у верхней стенки канала с нулевым содержанием продуктов газификации. Как отмечалось ранее, с увеличением  $q_{\text{отн}}$  возрастает степень нерасчетности и дальнобойность струи ПГТУ, что приводит к увеличению интенсивности ее турбулентного массообмена с ВКСГ. На этом режиме с определенного сечения в канале  $L/h = 4,5$  не остается зон с нулевым содержанием продуктов газификации ( $L$  — расстояние от центра сечения подачи ПГТУ до данного сечения,  $h$  — высота канала). При значении  $q_{\text{отн}} = 165$  струя ПГТУ имеет наибольшие нерасчетность и дальнобойность. Наличие циркуляционных зон у верхней стенки около сечения подачи продуктов газификации приводит к возникновению крупномасштабных вихре-



**Рис. 5.** Поля массового содержания ПГТУ при разных относительных скоростных напорах (значения  $q_{\text{отн}}$  см. рис. 4)

вых структур, повышающих неравномерность распределения ВКСГ в канале. Поля параметров потока при этом приобретают значительную пульсационную составляющую.

На рис. 6 приведены зависимости среднего значения коэффициента полноты смешения от относительного скоростного напора. Наличие максимума обусловлено тем, что при сравнительно небольших значениях  $q_{отн}$  струя ПГТУ сносится потоком ВКСГ и массообмен происходит сравнительно слабо. При больших значениях  $q_{отн}$  струя продуктов газификации, напротив, обладая большой дальностью, достигает нижней стенки канала, и смешение происходит в основном в этой области. Наиболее полное смешение при  $q_{отн} = 100$ , соответствующее максимуму  $\eta_{см}$  (см. рис. 6), может быть получено, когда дальность струи обеспечивает проникание ПГТУ в ядро потока ВКСГ.



**Рис. 6.** Зависимость коэффициента полноты смешения от относительного скоростного напора: кривые 1 и 3 при  $n = 3,6$  шт./м,  $\alpha = 1$  и 2; кривая 2 —  $n = 5$  шт./м,  $\alpha = 1$

Отметим, что с увеличением отклонения соотношения компонентов от стехиометрического, коэффициент полноты смешения увеличивается.

Влияние изменения угла вдува  $\theta$  ПГТУ в сносящий дозвуковой поток ВКСГ на интенсификацию процесса смешения исследовали для трех значений угла  $\theta = 45, 90$  и  $135^\circ$ . На рис. 7 приведены поля массового содержания ПГТУ в смеси газов, полученные в результате численного моделирования для углов вдува  $\theta_1 = 45^\circ$ ,  $\theta_3 = 135^\circ$  (для  $\theta_2 = 90^\circ$  поля показаны на рис. 5, б). Подача продуктов газификации против потока с углом  $\theta_3 = 135^\circ$  приводит к сравнительно большему размыванию струи и уменьшению областей с нулевым содержанием ПГТУ, что, с точки зрения эффективности смешения, положительно сказывается на рабочем процессе. Однако следует отметить, что подобный вариант вдува приводит к снижению импульса потока в выходном сечении канала. Подача продуктов газификации под углом  $\theta_1 = 45^\circ$  по потоку негативно сказывается на качестве процессов смешения. Поток ВКСГ сносит струю ПГТУ, практически не перемешиваясь с ней.

Далее приведены результаты исследования воздействия колебаний давления, возбуждаемых в области подачи ПГТУ, на процессы смешения газов.

Вынужденные пульсации давления задавались в следующем виде:

$$p = p_0 + A p_0 \sin 2\pi f t,$$

где  $p_0$  — начальное давление подачи;  $A, f$  — относительная амплитуда и частота колебаний.

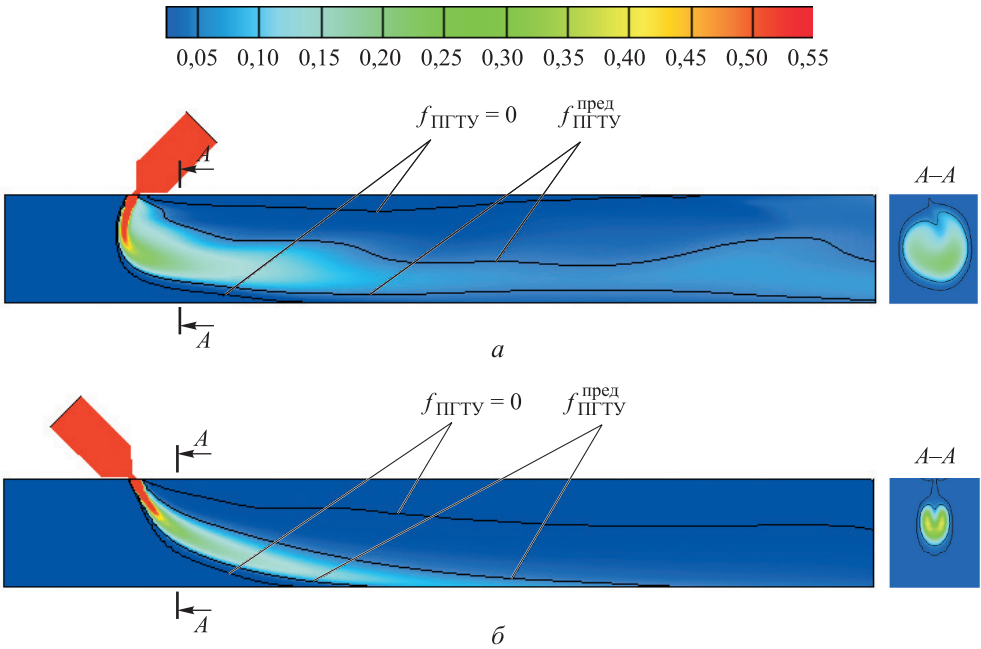


Рис. 7. Поля массового содержания ПГТУ при  $q_{отн} = 95$ ,  $\alpha = 1$ ,  $n = 5$ ,  $\theta = 135^\circ$  (а) и  $45^\circ$  (б)

Относительная амплитуда колебаний варьировалась в диапазоне  $A = 0,05-0,15$ , частота колебаний  $f = 5 \dots 45$  кГц. Полученные поля массового содержания ПГТУ в канале приведены на рис. 8. Видно, что возбуждение пульсаций давления в области подачи ПГТУ может оказывать заметное влияние на процесс смешения газов.

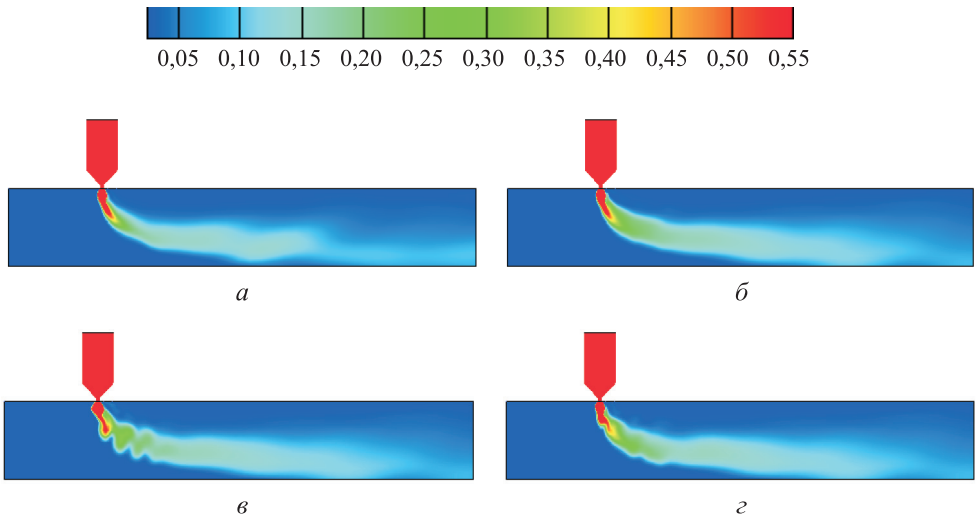
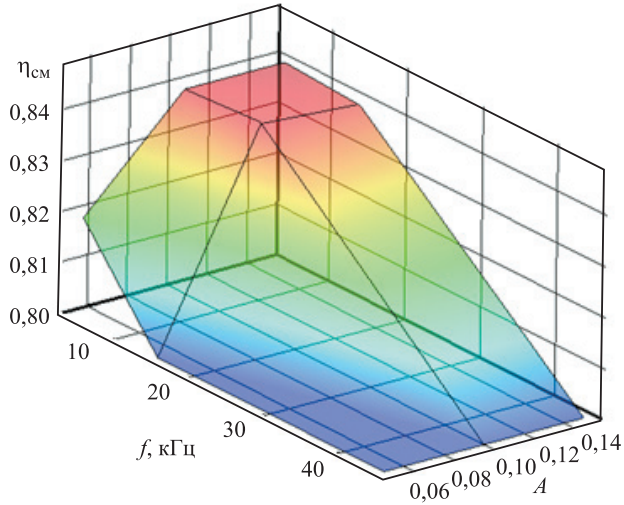


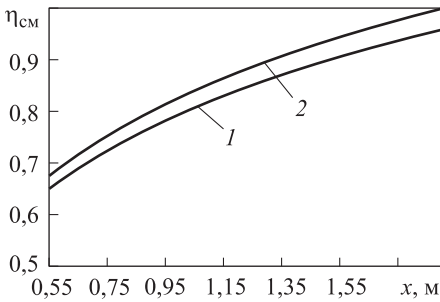
Рис. 8. Поля массового содержания ПГТУ в зависимости от режима течения: а — без колебаний давления; б и г —  $f = 15$  кГц,  $A = 0,1$  и  $0,15$ ; в —  $f = 5$  кГц,  $A = 0,1$

На рис. 9 приведена зависимость полноты смешения ПГТУ с ВКСГ в сечении канала, расположенном на расстоянии 1 м от сечения подачи ВКСГ, от относительной амплитуды и частоты колебаний. Для всех рассмотренных режимов значительное влияние вынужденных колебаний на процесс массообмена наблюдается при уменьшении частоты колебаний и увеличении относительной амплитуды.



**Рис. 9.** Зависимость коэффициента полноты смешения от параметров  $A$  и  $f$

Из полученных данных следует, что для эффективной интенсификации смешения требуется надлежащим образом выбирать амплитудно-частотную характеристику возбуждаемых пульсаций давления. На рис. 10 приведены графики изменения коэффициента полноты смешения вдоль канала для различных значений  $A$  и  $f$ . Заметный эффект от пульсаций давления проявляется при частоте колебаний  $f < 15$  кГц и амплитуде  $A > 0,15$ .



**Рис. 10.** Изменение коэффициента полноты смешения по длине канала в зависимости от режима течения:

1 — без колебаний давления; 2 —  $f = 5$  кГц,  $A = 0,1$

На основе параметрических расчетов, выполненных с использованием разработанной математической модели определения коэффициента полноты смешения, получены следующие результаты для разных условий смесеобразования потоков

ПГТУ и ВКСГ в канале постоянного сечения.

**Выводы.** 1. Наиболее качественное смешение ( $\eta_{см} = 0,9-0,95$ ) при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1-2$  может быть получено в случае реализации относительного скоростного напора  $q_{отн} \sim 100$  при числе газовых форсунок на единицу ширины канала  $n = 3,6...5,0$  шт./м.

2. Подача ПГТУ под углом к стенке против потока ВКСГ позволяет улучшить качество смешения на 7...12 % по сравнению со вдувом по нормали к потоку.

3. Возбуждение колебаний давления в области подачи ПГТУ интенсифицирует массообмен в канале и увеличивает коэффициент полноты смешения на 10...15 %. Наиболее значимый эффект получен при частотах  $f < 15$  кГц и относительных амплитудах  $A > 0,1$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Van Wie D., D'Alessio S., White M.* Hypersonic airbreathing propulsion // Johns Hopkins APL Technical Digest. 2005. Vol. 26. No. 4. P. 430–437.  
URL: <http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td2604/VanWie.pdf>
2. Александров В.Н., Быцкевич В.М., Верхоломов В.К. и др. Интегральные прямоточные воздушно-реактивные двигатели на твердых топливах. Основы теории и расчета / под ред. Л.С. Яновского. М.: Академкнига, 2006. 343 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, Propulsion and Energy Forum. 2015. DOI: 10.2514/6.2015-4234  
URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-4234>
4. Пиралишвили Ш.А., Поляев В.М., Сергеев М.Н. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения. М.: УНПЦ «Энергомаш», 2000. 412 с.
5. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. М.: Наука, 1991. 600 с.
6. Гуськов О.В., Копченов В.И. Численное исследование структуры течения в канале при сверхзвуковых условиях на входе // Аэромеханика и газовая динамика. 2001. № 1. С. 28–39.
7. *Sosoumov V.A.* Research and development of ramjets/Ramrockets. Part 1. Integral solid propellant ramrockets // Research and Development of Ram/Scramjets and Turboramjets in Russia. Loughton. 1994. P. 10–12.
8. *Hamed A., Das K., Basu D.* Numerical simulation of unsteady flow in resonance tube // AIAA. 2002. No. 1118. P. 1–14.
9. Александров В.Ю., Арефьев К.Ю., Ильченко М.А. Экспериментальное исследование влияния акустико-вихревых автоколебаний на процесс разрушения недорасширенной сверхзвуковой струи в затопленном пространстве // Теплофизика и аэромеханика. 2016. № 4. С. 533–542. DOI: 10.1134/S0869864316040041
10. Гиневский А.С., Власов Е.В., Каравосов Р.К. Акустическое управление турбулентными струями. М.: Физматлит, 2001. 232 с.
11. *Ferziger J.H., Peric M.* Computational methods for fluid dynamics. Berlin, Germany, 2002.
12. *Wilcox D.C.* Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, 2006.
13. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Травин А.К., Шур М.Л. Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2016. 234 с.
14. Волков К.Н., Емельянов В.Н. Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. М.: Физматлит, 2008. 368 с.
15. *Favre A.J.* Review of space-time correlations in turbulent fluids // Journal of Applied Mechanics. 1965. Vol. 32. No. 2. P. 241–257.

16. Фрик П.Г. Турбулентность: подходы и модели. М.: НИЦ РХД, 2010. 107 с.
17. Ильина Е.Е., Ильина Т.Е., Денисенко П.В. Применимость различных дифференциальных моделей турбулентности при численном расчете сверхзвуковых неизобарических струй // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 500–508. DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-500-508
18. Влияние полноты сгорания топлива на характеристики прямоточных воздушно-реактивных двигателей / И.С. Аверьков, В.Ю. Александров, К.Ю. Арефьев, А.В. Воронцовский, Гуськов О.В., А.Н. Прохоров, Л.С. Яновский // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 6. С. 939–949. DOI: 10.7868/S0040364416050045
19. Аннушкин Ю.М. Основные закономерности выгорания турбулентных струй водорода в воздушных каналах // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17. № 4. С. 59–71. DOI: 10.1007/BF00761209
20. Александров В.Ю., Кукушкин Н.В. Модифицированная кривая выгорания для модельных высокоскоростных камер сгорания, интегрированных с воздухозаборным устройством // Физика горения и взрыва. 2016. Т. 52. № 3. С. 32–36. DOI: 10.1134/S0010508216030047

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

**Арефьев Константин Юрьевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2); доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший научный сотрудник лаборатории «Гиперзвуковые и плазменные технологии» Московского физико-технического института (государственного университета) (Российская Федерация, 140090, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский переулок, д. 9).

**Сухов Алексей Васильевич** — д-р техн. наук, профессор кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

**Яновский Леонид Самойлович** — д-р техн. наук, профессор, начальник отдела «Специальные авиационные двигатели и химмотология» Центрального института авиационного моторостроения имени П.И. Баранова (Российская Федерация, 111116, Москва, Авиамоторная ул., д. 2); заведующий отделом горения и взрыва Института проблем химической физики РАН (Российская Федерация, 142432, Московская обл., г. Черноголовка, пр-т академика Семенова, д. 1).

#### **Пробьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Федотова К.В., Арефьев К.Ю., Сухов А.В., Яновский Л.С. Исследование процессов смешения продуктов газификации твердых углеводородов с высокоэнтропийным газовым потоком в каналах постоянного сечения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 11–27. DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-11-27

## RESEARCH OF SOLID HYDROCARBON FUEL GASIFICATION PRODUCTS MIXING WITH HIGH-ENTHALPY GAS FLUX IN UNIFORM CROSS-SECTION DUCTS

K.V. Fedotova<sup>1,2</sup>

fedkv\_89@mail.ru

K.Yu. Arefev<sup>1,2,3</sup>

arefyev@rambler.ru

A.V. Sukhov<sup>2</sup>

L.S. Yanovskiy<sup>1,4</sup>

yanovskiy@ciam.ru

<sup>1</sup> Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (CIAM),  
Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

<sup>3</sup> Moscow Institute of Physics and Technology (State University), Dolgoprudnyy,  
Moscow Region, Russian Federation

<sup>4</sup> Institute of Problems of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (IPCP RAS),  
Moscow Region, Chernogolovka, Russian Federation

---

### Abstract

This paper presents the analysis of numerical simulation results for solid hydrocarbon fuel (SHF) gasification products mixing processes with subsonic high-enthalpy oxygen-containing gas (HEOG) flux in the uniform cross-section ducts. Mathematical model of mixing efficiency estimation for supersonic SHF gasification products jets with subsonic HEOG flux is developed based on numerical solution of a full system of Favre averaged Navier — Stokes equations for viscous, heat-conducting gas in 3D transient definition together with Transition SST turbulence model. Different methods of mixing process intensification are examined such as the number of SHF gasification products blast nozzles, SHF gasification products jet feed direction and pressure pulsations. The obtained results may be useful at preconceptual study phase for operating process efficiency estimation of gas mixture diffusion combustion in the uniform cross-section ducts. On the ground of parametric analysis by the developed mathematical model the most effective mixing process ( $\eta_{\text{mix}} = 0,9...0,95$ ) is implemented when fuel-air equivalence ratio is over the range 0,5 to 1, relative dynamic velocity pressure is approximately 100 and the number of gas jets ratio to duct width is over the range of 3,6 to 5,0 piece/m. SHF gasification products jet feed direction can improve mixing efficiency up to 7...12 % when pointed against HEOG flux at angle of 45° compared with perpendicular and 45° along the main flux direction. The pressure pulsations of SHF gasification products jet with frequency  $f < 15$  kHz and relative amplitude  $A > 0,1$  can improve mixing up to 10...15 %

### Keywords

*Numerical simulation, gas fluxes mixing, gasification products of solid hydrocarbon fuel, CFD, semiempirical turbulence model, pressure pulsations in supersonic gas jet*

## REFERENCES

- [1] Van Wie D., D'Alessio S., White M. Hypersonic airbreathing propulsion. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 2005, vol. 26, no. 4, pp. 430–437.  
Available at: <http://techdigest.jhuapl.edu/TD/td2604/VanWie.pdf>
- [2] Aleksandrov V.N., Bytskevich V.M., Verkholomov V.K. et al. Integral'nye pryamotochnye vozdušno-reaktivnye dvigateli na tverdykh toplivakh. Osnovy teorii i rascheta [Integrated ramjet engines on solid propellant. Theory and calculation fundamentals]. Moscow, Akademkniga Publ., 2006. 343 p.
- [3] Kurth G., Bauer C., Hopfe N. Performance assessment for a throttleable ducted rocket powered lower tier interceptor. *51st AIAA/SAE/ASME Joint Propulsion Conference, Propulsion and Energy Forum*, 2015. DOI: 10.2514/6.2015-4234  
Available at: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2015-4234>
- [4] Piralishvili Sh.A., Polyayev V.M., Sergeev M.N. Vikhrevoy effekt. Eksperiment, teoriya, tekhnicheskie resheniya [Swirling effect. Experiment, theory, engineering solutions]. Moscow, UNPTs «Energomash» Publ., 2000. 412 p.
- [5] Abramovich G.N. Prikadnaya gazovaya dinamika [Applied gas dynamics]. Moscow, Nauka Publ., 1991. 600 p.
- [6] Gus'kov O.V., Kopchenov V.I. Numerical study of channel flow structure under supersonic input conditions. *Aeromekhanika i gazovaya dinamika*, 2001, no. 1, pp. 28–39 (in Russ.).
- [7] Sosounov V.A. Research and development of ramjets/Ramrockets. Part 1. Integral solid propellant ramrockets. In: *Research and Development of Ram/Scramjets and Turboramjets in Russia*. Loughton. 1994. Pp. 10–12.
- [8] Hamed A., Das K., Basu D. Numerical simulation of unsteady flow in resonance tube. *AIAA*, 2002, no. 1118, pp. 1–14.
- [9] Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Il'chenko M.A. Experimental investigation of acoustic self-oscillation influence on decay process for underexpanded supersonic jet in submerged space. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 513–521.  
DOI: 10.1134/S0869864316040041  
Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0869864316040041>
- [10] Ginevskiy A.S., Vlasov E.V., Karavosov R.K. Akusticheskoe upravlenie turbulentnymi struyami [Acoustic control on turbulent jets]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2001. 232 p.
- [11] Ferziger J.H., Peric M. Computational methods for fluid dynamics. Berlin, Germany, 2002.
- [12] Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. DCW Industries, 2006.
- [13] Garbaruk A.V., Strelets M.Kh., Travin A.K., Shur M.L. Sovremennye podkhody k modelirovaniyu turbulentnosti [Modern approaches to the turbulence simulation]. Sankt-Petersburg, SPbSTU Publ., 2016. 234 p.
- [14] Volkov K.N., Emel'yanov V.N. Modelirovanie krupnykh vikhrey v raschetakh turbulentnykh techeniy [Large vortex simulation in calculations of turbulent flow]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 368 p.
- [15] Favre A.J. Review of space-time correlations in turbulent fluids. *Journal of Applied Mechanics*, 1965, vol. 32, no. 2, pp. 241–257.
- [16] Frik P.G. Turbulentnost': podkhody i modeli [Turbulence: approaches and models]. Moscow, NITs RKhD Publ., 2010. 107 p.



[17] Il'ina E.E., Il'ina T.E., Denisenko P.V. Applicability of various differential turbulence models in the calculation of supersonic gas jets. *Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and technical journal of information technologies, mechanics and optics], 2015, vol. 15, no. 3, pp. 500–508 (in Russ.).

DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-3-500-508

Available at: [http://ntv.ifmo.ru/ru/article/13550/interferenciya\\_skachkov\\_uplotneniya\\_odnogo\\_napravleniya.htm](http://ntv.ifmo.ru/ru/article/13550/interferenciya_skachkov_uplotneniya_odnogo_napravleniya.htm)

[18] Aver'kov I.S., Aleksandrov V.Yu., Aref'ev K.Yu., Voronetskiy A.V., Gus'kov O.V., Prokhorov A.N., Yanovskiy 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: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0018151X16050047>

[19] Annushkin Yu.M. Basic rules governing the burning of turbulent jets of hydrogen in air channels. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1981, vol. 17, no. 4, pp. 400–411.

DOI: 10.1007/BF00761209 Available at: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF00761209>

[20] Aleksandrov V.Yu., Kukshinov N.V. Modified combustion efficiency curve for high-velocity model combustors integrated with the inlet. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 281–285. DOI: 10.1134/S0010508216030047

Available at: <http://link.springer.com/article/10.1134/S0010508216030047>

**Fedotova K.V.** — Junior Research Scientist of Aerospace Engines Department, Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (CIAM) (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation); Assistant of Rocket Engines Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Aref'ev K.Yu.** — Cand. Sc. (Eng.), Chief Research Scientist of Aerospace Engines Department, Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (CIAM) (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation); Assoc. Professor of Rocket Engines Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Chief Research Scientist of Hypersonic and Plasma Technologies Laboratory, Moscow Institute of Physics and Technology (State University) (Institutskiy pereulok 9, Dolgoprudnyy, Moscow Region, 140090 Russian Federation).

**Sukhov A.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor of Rocket Engines Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

**Yanovskiy L.S.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of Special Aircraft Engines and Chemmology Department, Baranov Central Institute of Aviation Motor Development (CIAM) (Aviamotornaya ul. 2, Moscow, 111116 Russian Federation); Head of Combustion and Explosion Department, Institute of Problems of Chemical Physics of Russian Academy of Sciences (IPCP RAS) (Akademika Semenova prospekt 1, Chernogolovka, Moscow Region, 142432 Russian Federation).

#### Please cite this article in English as:

Fedotova K.V., Aref'ev K.Yu., Sukhov A.V., Yanovskiy L.S. Research of Solid Hydrocarbon Fuel Gasification Products Mixing with High-Enthalpy Gas Flux in Uniform Cross-Section Ducts. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2017, no. 4, pp. 11–27.

DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-11-27