

ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ФАКЕЛА РАСПЫЛА КАПЕЛЬ ЗА АЭРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ РАСПЫЛИВАНИЯ НА РАВНОМЕРНОСТЬ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЮЧЕГО В ПРЯМОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

А.В. Воронцовский¹

voron@bmstu.ru

И.А. Батенин^{1,2}

batenin.i@bmstu.ru

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

² АО «КТРВ», г. Королёв, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Исследовано влияние начальной конфигурации факела распыла капель горючего, формируемого аэродинамической системой распыливания, на равномерность распределения горючего в прямооточной модельной камере сгорания. Аэродинамическая система распыливания состоит из нескольких топливоподающих распылителей, принцип работы которых аналогичен карбюратору. В такой системе распыливания горючее впрыскивается в поток воздуха, проходящий через внутренний канал распылителя. Конфигурация факела распыла воздушно-капельной смеси определяется числом и расположением выходных отверстий. Выполнено численное моделирование двухфазного (воздушно-капельного) течения с использованием специализированного программного комплекса «ГиперКуб». Процесс горения капель горючего в такой постановке задачи не моделируется, капли полагаются инертными. В качестве варьируемых параметров выбраны конфигурация факела распыла капель, определяемая профилем распределения массового расхода горючего по высоте распылителей, и размер монодисперсных капель. Получены поля распределения скорости потока, траектории движения капель и трехмерные эпюры распределения расходонапряженности массового потока капель в различных сечениях модельной камеры сгорания. В дополнение к качественному анализу характера распределения траекторий капель в объеме камеры сгорания предложена методика количественной оценки равномерности распределения массового потока капель в заданных сечениях

Ключевые слова

Аэродинамическая система распыливания, факел распыла капель, численное моделирование, расходонапряженность, камера сгорания, среднеквадратическое отклонение, равномерность распределения

камеры сгорания. В качестве критерия выбрано среднеквадратическое отклонение расходонапряженности массового потока капель от его средней по сечению величины. Определена конфигурация факела распыла капель, обеспечивающая наилучшую равномерность распределения капель горючего в камере сгорания

Поступила 26.12.2024

Принята 07.04.2025

© Автор(ы), 2025

Введение. Для реализации высокоэффективного рабочего процесса в прямоточных камерах сгорания (КС) требуется решить ряд сложных физических и конструкторских задач. Основной составляющей реализации высокой полноты сгорания является качественная подготовка топливовоздушной смеси (ТВС) и ее равномерная подача в огневой объем КС [1–3]. Для этого применяются различные конструкции фронтных устройств (ФУ), основными элементами которых являются распылители жидкого горючего и стабилизаторы фронта пламени. Система топливоподающих распылителей должна обеспечивать распыливание жидкого горючего с заданной дисперсностью и распределять облако капель по всему сечению КС [4]. В настоящей работе рассмотрен процесс подачи ТВС в КС с помощью аэродинамической системы распыливания (АСР), которая по своему функциональному назначению является элементом ФУ, особенности функционирования которого активно изучаются многими авторами [5–10].

Цель настоящей работы — выбор конфигурации факела распыла капель, формируемого АСР и обеспечивающего улучшение равномерности распределения жидкого горючего в объеме модельной КС [11–13].

Оценка равномерности распределения капель проводится на основе результатов серии расчетов путем численного моделирования двухфазного течения с использованием специализированного программного комплекса (СПК) «ГиперКуб» [14]. Для расчета движения капель применяется стационарная (траекторная) модель. Полученные дискретные траектории преобразуются в непрерывные трехмерные эпюры (далее эпюры) распределения массового потока капель. С помощью приведенной методики количественной оценки эпюр определена конфигурация факела распыла капель, способствующая формированию наиболее равномерного распределения жидкого горючего в модельной КС.

Постановка задачи и принятые допущения. В качестве расчетной области для численного моделирования двухфазного течения рассматривается сектор внутреннего объема модельной КС (рис. 1). Камера сгорания представляет собой цилиндрический канал, в котором установлена АСР.

Угол раскрытия сектора внутреннего объема КС 45° , поэтому в расчетную область попадает 1/8 часть АСР, включающая сборку из трех распылителей.

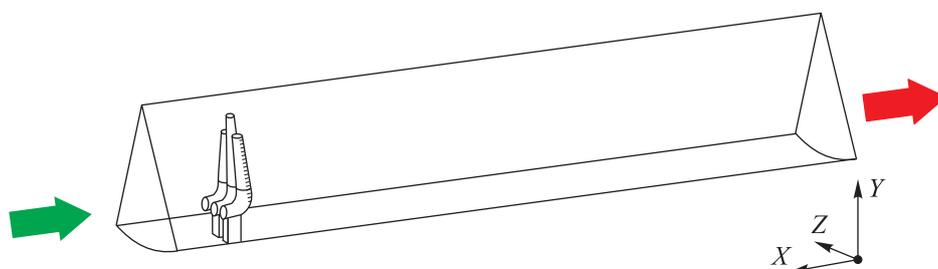


Рис. 1. Расчетная область для численного моделирования двухфазного течения — сектор внутреннего объема модельной КС

Распылители АСР выполнены в виде сужающихся патрубков (рис. 2), имеющих соосный с КС вход 1 для аэродинамического забора воздуха, внутренний канал 2, изогнутый на 90° , в котором предусмотрен впрыск горючего, и ряды отверстий 3 на задней стенке для истечения в объем КС воздушно-капельной смеси. Начало отсчета системы координат лежит в плоскости входа в распылители АСР.

Работа АСР рассмотрена при следующих параметрах подачи воздуха в КС: массовый расход воздуха $\dot{m}_B = 1$ кг/с; температура воздуха при торможении $T_B^* = 737$ К; статическое давление на выходе из КС $p_K = 94\,162$ Па; коэффициент избытка окислителя $\alpha = 1,2$.

Приведем граничные условия. На входе в расчетную область слева заданы массовый расход воздуха \dot{m}_B и его температура при торможении T_B^* , а на выходе справа — статическое давление в КС p_K . Давление p_K соответствует давлению, которое имело бы место в КС при горении воздушно-капельной смеси в данном соотношении окислителя и горючего.

На боковых границах расчетной области заданы граничные условия, соответствующие условиям симметрии; на границах, соответствующих стенкам конструкции, — условия отражения и непроницаемости (для скорости и давления), условия адиабатичности температуры.

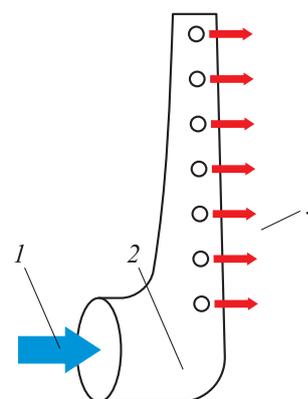


Рис. 2. Схема распылителя АСР, выполненного в виде сужающегося патрубка

В качестве жидкого горючего принята модельная жидкость с плотностью керосина ТС-1 ($\rho = 730 \text{ кг/м}^3$). Процесс горения распыленного горючего в воздушной среде за АСР не моделируется.

Различные начальные конфигурации факела распыла каплей формируются следующим образом. Источники каплей задаются в выходных сечениях отверстий распылителей. При постоянной аэродинамической картине течения воздуха в расчетах изменяются профиль распределения массового расхода каплей по высоте распылителей (далее профиль) и размеры каплей. Профили формируются посредством перераспределения массового расхода каплей между тремя группами (зонами) отверстий (рис. 3) [15].

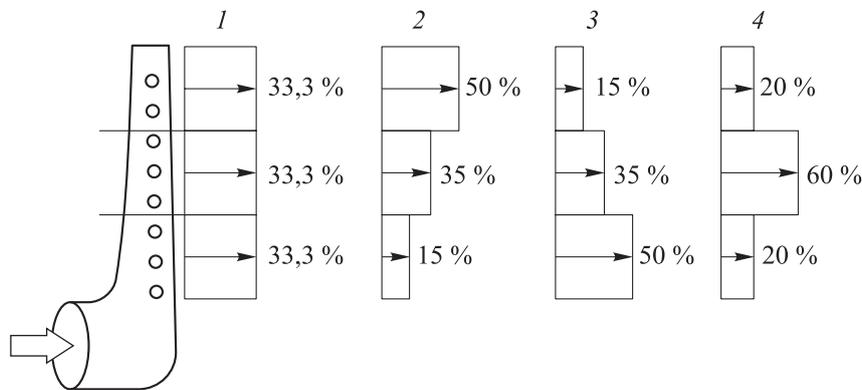


Рис. 3. Формирование профилей (1–4) посредством перераспределения массового расхода каплей между тремя группами (зонами) отверстий

Суммарный массовый расход каплей $\sum \dot{m}_k = 0,05625 \text{ кг/с}$. Он распределен между боковыми и центральным распылителями АСР в следующих пропорциях: через каждый боковой распылитель 35 %, через центральный распылитель 30 %.

Распределение массового расхода каплей (\dot{m}_k , г/с) между зонами отверстий в боковом (числитель) и центральном (знаменатель) распылителях приведено в таблице.

Для каждого профиля рассматривается подача инертных монодисперсных каплей диаметром 20, 40 и 60 мкм. Взаимодействие каплей со стенкой полагается неупругим. При достижении каплей поверхности стенки расчет ее траектории движения завершается. Предполагается, что все капли, поступающие в расчетную область, имеют начальную скорость 2 м/с, а векторы скорости каплей параллельны осям отверстий в распылителях (угол раскрытия факела распыла каплей равен нулю).

**Распределение массового расхода капель между зонами отверстий
в боковом и центральном распылителях**

Профиль	Зона		
	1	2	3
1	6,562/5,625	6,562/5,625	6,562/5,625
2	9,844/8,438	6,891/5,906	2,953/2,531
3	2,953/2,531	6,891/5,906	9,844/8,438
4	3,938/3,375	11,813/10,125	3,938/3,375

Для выполнения численного моделирования выбран разработанный в МГТУ им. Н.Э. Баумана СПК «ГиперКуб», решатель которого основан на методе конечных объемов. Параметры воздушного потока рассчитаны на основе решения системы осредненных по Фавру уравнений Навье — Стокса для идеального сжимаемого вязкого теплопроводного газа, в пространственной нестационарной постановке с замыканием системы двух-параметрической ($k-\omega$)-SST моделью турбулентности [16]. При этом применяется комбинированный метод осреднения, когда плотность ρ и давление p осредняются по Рейнольдсу, а для прочих переменных f вводятся средневзвешенные значения (осредненные по Фавру) $\tilde{f} = \overline{\rho f} / \bar{\rho}$. Таким образом, произвольный параметр течения представляется в виде суммы средневзвешенного значения и импульсной составляющей $f = \tilde{f} + f''$.

В таком случае система уравнений сохранения массы, импульса и энергии имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial x_i} &= 0; \\ \rho \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{u}_i}{\partial x_j} &= - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} v \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \bar{\rho}_j \widetilde{u_i'' u_j''} \right); \\ \rho \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\phi}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{\phi}}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\rho D \frac{\partial \tilde{\phi}}{\partial x_j} - \bar{\rho} \widetilde{u_j'' \phi''} \right), \end{aligned}$$

где ρ — плотность; u_i — компоненты вектора скорости осредненного течения; p — давление; v — коэффициент кинематической молекулярной вязкости; $\widetilde{u_i'' u_j''}$ — компоненты тензора рейнольдсовых напряжений; ϕ — скаляр; D — диффузионный перенос скаляра; $\widetilde{u_j'' \phi''}$ — составляющие потока скаляра; i, j — декартовы координаты.

Связь тензора рейнольдсовых напряжений с тензором осредненных скоростей деформаций по гипотезе Буссинеска:

$$R_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

где μ_T — турбулентная вязкость; k — кинетическая энергия турбулентности; δ_{ij} — символ Кронекера.

Замыкающие уравнения переноса для кинетической энергии турбулентности k и для удельной скорости диссипации ω записываются так:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} &= R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta^* \rho k \omega + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_T) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]; \\ \rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \omega}{\partial x_j} &= \gamma \frac{\omega}{k} R_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_\omega \mu_T) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \\ &+ 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, \end{aligned}$$

где β^* , σ_k , γ , β , σ_ω — эмпирические константы модели; F_1 — весовая функция, которая равна нулю на верхней границе пограничного слоя и стремится к единице при приближении к стенке.

Эмпирические константы модели турбулентности вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} \beta^* &= 0,09; \\ \sigma_k &= 1 - 0,5F_1; \\ \gamma &= 0,441 + 0,112F_1; \\ \beta &= 0,0828 - 0,0078F_1; \\ \sigma_\omega &= 0,856 - 0,356F_1. \end{aligned}$$

Для моделирования двухфазного газочапельного течения применяется комбинированный метод Лагранжа — Эйлера. Движение капель описывается с использованием траекторной модели [17]. Изменение параметров каждой капли при движении по траектории определяется из уравнений движения и сохранения энергии:

$$\begin{aligned} \frac{dr_p}{dt} &= v_p; \\ m_p \frac{dv_p}{dt} &= \frac{1}{2} \rho_g A_p C_D (v_g - v_p) |v_g - v_p|; \\ \frac{dT_p}{dt} (m_p C_p) &= S_p \text{Nu}_p \frac{\lambda_g (T_g - T_p)}{d_p}, \end{aligned}$$

где r_p , v_p , m_p — положение капли в пространстве, ее скорость и масса; ρ_g и v_g — плотность и скорость газа, в котором движется капля; A_p — площадь миделевого сечения капли; C_D — коэффициент сопротивления; T_p — температура капли; S_p — площадь поверхности капли; Nu_p — число Нуссельта для капли; λ_g — теплопроводность газа.

В СПК «ГиперКуб» присутствует уравнение для вычисления температуры T_p , однако вследствие принятого допущения об инертности капель при моделировании уравнение исключено. При численном интегрировании приведенных уравнений используется явная схема Эйлера. Отметим, что обратное воздействие капель на воздушный поток в расчетах не учитывалось вследствие их невысокой массовой и объемной доли в потоке.

Для численного моделирования построена расчетная сетка, состоящая из тетраэдрических элементов. Число ячеек сетки 8 316 524, число узлов 1 451 254.

Методика количественного анализа равномерности распределения расходонапряженности в сечениях модельной КС. В дополнение к качественной (визуальной) оценке распределения траекторий капель в объеме КС выполнен количественный анализ равномерности распределения расходонапряженности в нескольких поперечных сечениях КС с применением метода дискретно-непрерывного перехода, позволяющего преобразовать дискретные траекторные данные в эпюры распределения расходонапряженности.

Рассмотрим основные особенности методики проведения анализа. Задачей анализа является получение на первом этапе эпюр распределения расходонапряженности. В таком случае под расходонапряженностью понимается отношение массового расхода горючего через единичную ячейку расчетной области в заданном сечении к площади данной ячейки. На втором этапе вводится критерий, численное значение которого характеризует степень неравномерности массового расхода горючего в конкретном сечении.

В результате численного моделирования получены данные о траекториях капель. В действительности число капель значительно больше, чем рассмотрено в расчете, поэтому полученные траектории необходимо интерпретировать как движение групп капель (кластеров) с одинаковыми траекториями и параметрами. В связи с этим целесообразно использовать термин «псевдочастица» в рамках метода дискретно-непрерывного перехода. Этот метод основан на принятом допущении, что псевдочастицы могут двигаться не строго по базовым траекториям, а в их окрестно-

стях. Таким образом, по аналогии с трубками тока для жидкости формируются трубки тока псевдочастиц. Сумма всех трубок тока псевдочастиц с учетом их локализации и расходных характеристик в рассматриваемом сечении КС образует эпюру распределения расходонапряженности.

Для каждой псевдочастицы рассмотрим функцию плотности вероятности локализации траектории в сечении с координатой x . Максимум функции соответствует положению точки пересечения базовой траектории псевдочастицы с рассматриваемой плоскостью поперечного сечения. Эта функция описывается с помощью двумерного нормального распределения Гаусса с коэффициентом корреляции случайных величин $r = 0$:

$$p_{\text{пч}}(y, z) = \frac{\exp\left(-\frac{(y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}{2\sigma^2}\right)}{2\pi\sigma^2},$$

где y, z — случайные величины координат локализации траектории псевдочастицы; y_0, z_0 — координаты точки пересечения базовой траектории псевдочастицы с плоскостью рассматриваемого сечения; σ — среднеквадратическое отклонение пространственной локализации траектории псевдочастицы относительно базовой траектории ее движения (принимается, что среднеквадратические отклонения случайных величин равны $\sigma_y = \sigma_x = \sigma$). При этом величины y и z являются независимыми, а характерный размер поперечного сечения трубки тока псевдочастицы определяет параметр σ . В настоящей работе принято значение $\sigma = 0,005$ [17].

Для построения эпюры распределения расходонапряженности в сечении КС необходимо оценить индивидуальный вклад каждой псевдочастицы. Эта составляющая определяется по формуле

$$q_{\text{пч}_i}(y, z) = p_{\text{пч}_i}(y, z)G_{\text{пч}_i},$$

где $G_{\text{пч}_i}$ — массовый расход для i -й псевдочастицы.

В этой постановке эпюру распределения расходонапряженности в конкретном сечении можно получить по формуле:

$$q_{\text{пч}}(y, z) = \sum_{i=1}^N q_{\text{пч}_i}(y, z),$$

где N — число псевдочастиц, пересекающих рассматриваемое сечение расчетной области.

Изучив работы, в той или иной степени касающиеся определения равномерности распределения параметров в КС, авторы настоящей работы в качестве критерия количественной оценки равномерности распре-

деления массового потока капель в сечении КС выбрали среднеквадратическое отклонение расходонапряженности от среднего для рассматриваемого сечения значения [18–23]:

$$\theta(y, z) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\iint_{F_i} q_{\text{пч}}(y, z) dydz}{F_i} - q_{\text{ср}} \right)^2}{n}},$$

где $q_{\text{ср}} = G_{\text{пч}}/F$ — среднее значение расходонапряженности в рассматриваемом сечении площадью F ($G_{\text{пч}}$ — суммарный массовый расход капель в сечении); n — число расчетных ячеек $dydz$.

По значению данного критерия можно определить, насколько равномерна и однородна эпюра распределения расходонапряженности в рассматриваемом сечении КС. Отметим, что в предельном случае, если капли распределены в сечении равномерно, значение θ будет численно стремиться к нулю.

Для большей наглядности представления результатов дополнительно вводится относительное значение указанного критерия $\theta_{\text{отн}} = \theta/q_{\text{ср}}$.

Результаты расчетов и их анализ. Рассмотрим результаты моделирования течения воздуха в модельной КС. Поля распределения скорости воздуха V в поперечных сечениях КС приведены на рис. 4. Видна значительная неравномерность в сечениях за АСР. На входе в расчетную область перед АСР в соответствии с граничным условием задано равномерное поле распределения скорости $V = 100$ м/с. Можно выделить высокоскоростные участки в приосевой зоне и на границе симметрии расчетной области. На этих участках за ФУ скорость V достигает значений более 230 м/с.

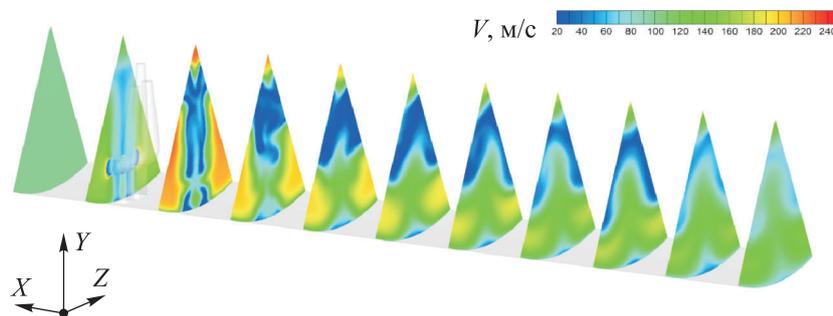


Рис. 4. Поля распределения скорости воздуха в поперечных сечениях КС

Низкоскоростная область поля распределения скорости ($V < 20$ м/с) располагается в тени центрального распылителя и достигает 70 % длины рассматриваемой КС. На выходе из расчетной области значения скорости V лежат в диапазоне 60...140 м/с.

Траектории движения капель, полученные в результате моделирования двухфазного течения, для случая с конфигурацией факела распыла, заданного профилем 1, приведены на рис. 5. Другие случаи расчета не приведены, так как изменение конфигурации факела распыла практически не влияет на локализацию траекторий. Это связано с тем, что профилем задается распределение массового расхода капель по высоте распылителей и его изменение при условии сохранения таких параметров капель, как температура, диаметр и начальная скорость, приводит лишь к изменению частоты ввода капель в КС.

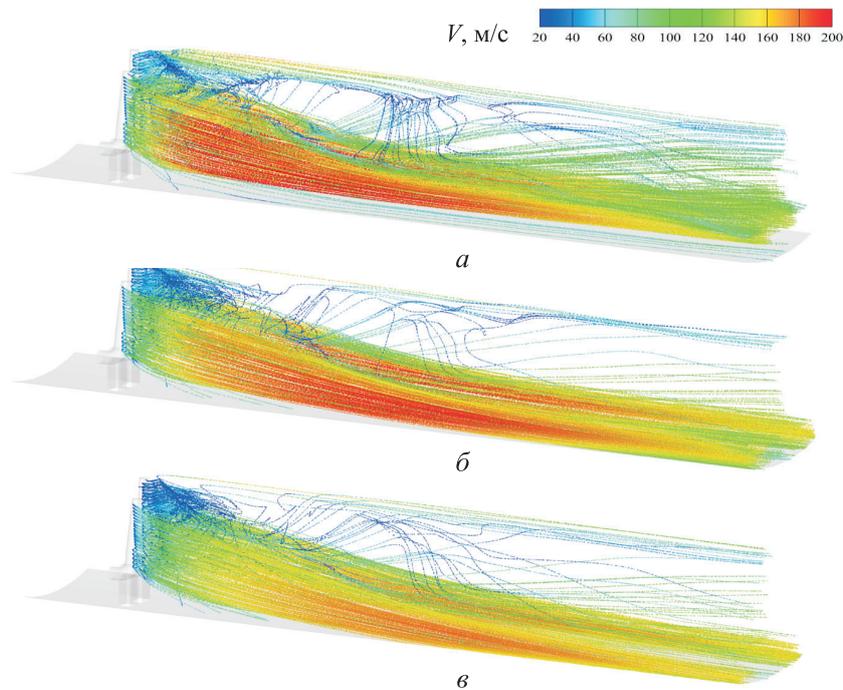


Рис. 5. Траектории движения капель (профиль 1) размером 20, 40 и 60 мкм (а–в)

Увеличение размера капель и, соответственно, их массы приводит к росту сил инерции, действующих на капли. Это наглядно отражается на траекториях и изменении скорости капель V_k по длине КС. Основная масса капель размером 20 мкм достигает скорости $V_k = 200$ м/с, близкой к скорости V потока, уже в прилегающей к АСР области. Каплям размером 40 мкм требуется больше времени для достижения аналогичных ско-

ростей и V_k порядка 200 м/с достигается на половине длины КС. Капли размером 60 мкм ускоряются до максимальной $V_k = 160$ м/с.

Следует отметить пространственную локализацию основной массы капель. Траектории капель по мере движения по КС смещаются в высокоскоростную пристенную область. При этом движение капель размером 20 мкм происходит на некотором удалении от стенки и параллельно последней капле, капли размером 40 и 60 мкм сохраняют радиальную составляющую вектора V_k , направленную к стенке, на всем протяжении КС, что приводит к частичному осаждению капель на стенке.

Меньшая часть траекторий попадает в низкоскоростную приосевую область. Максимальная концентрация капель с низкой скоростью V_k имеет место в зоне, примыкающей к верхней части центрального распылителя. В этой области $V_k = 20 \dots 30$ м/с.

При детальном анализе рис. 6 видно резкое изменение направления движения капель на расстоянии 10 мм от отверстий в результате воздействия воздушного потока. Следует особо рассмотреть общую структуру потока капель. Конструктивное расположение рядов отверстий в трех распылителях АСР формирует две основные группы. Траектории капель, поступающих из центрального распылителя, пересекаются с траекториями капель из боковых распылителей. Сформированные группы располагаются радиально по высоте распылителей в начальный момент и к концу КС превращаются в два узконаправленных пучка. Имеет место пересечение каплями границы симметрии в низкоскоростной зоне и зеркальное их отражение (см. рис. 6), что указывает на массообмен между секторами КС.

С помощью описанного метода дискретно-непрерывного перехода построены эпюры распределения расходонапряженности для всех расчетных случаев в сечениях № 1 с координатой $x = -0,1$ м, расположенных за АСР, и сечениях № 2 с координатой $x = -0,8$ м, расположенных в конце КС. Схема расположения поперечных сечений КС приведена на рис. 7.

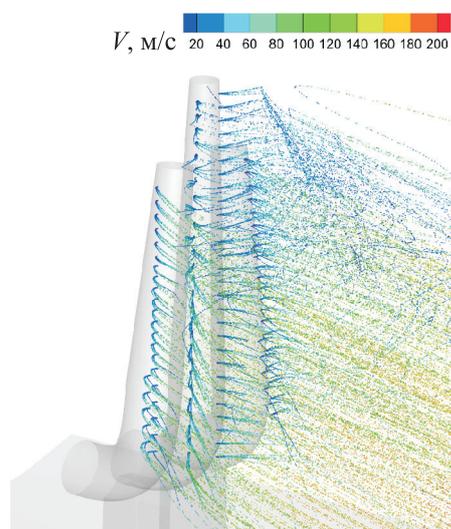


Рис. 6. Фрагмент траектории движения капель (капли размером 40 мкм; профиль 1)

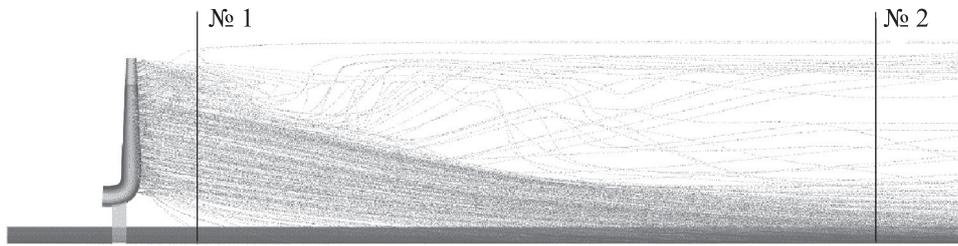


Рис. 7. Схема расположения поперечных сечений КС

Из всех расчетных случаев выбраны наиболее характерные варианты (рис. 8). Под $q_{отн}$ понимается относительная расходонапряженность (по отношению к максимальному значению в рассматриваемых сечениях $q_{пч\ max} = 45 \text{ кг}/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$). В частности, на рис. 8, а, б приведены эпюры для профиля 3, на рис. 8, в, г — варианты с максимальной неравномерностью распределения $q_{отн}$ для профилей 2 и 4.

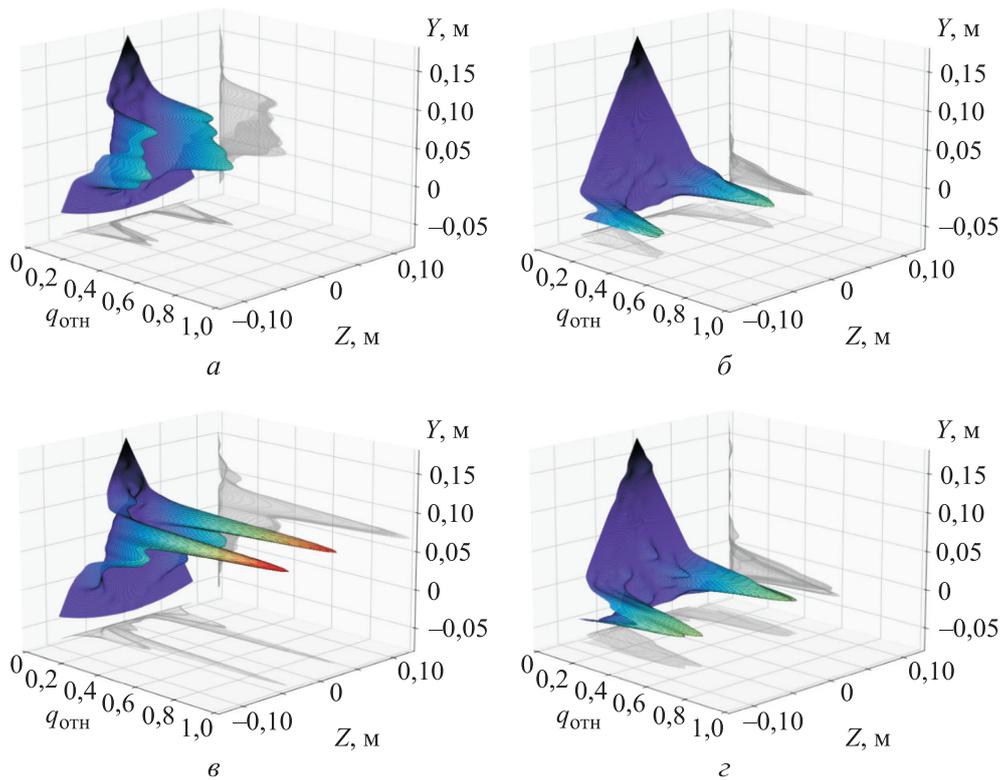


Рис. 8. Эпюры распределения относительной расходонапряженности:
 а — сечение № 1, профиль 3; б — сечение № 2, профиль 3; в — сечение № 1, профиль 2;
 г — сечение № 2, профиль 4; капли размером 20 (а), 60 (б, в) и 40 мкм (г)

При анализе полученных распределений можно выделить особенности, общие для всех конфигураций факела распыла капель. На эпюрах (см. рис. 8), как указано ранее при анализе характера распределения траекторий, видны две ярко выраженные зоны с пиками $q_{отн}$. Характер распределения в сечении № 1 слабо зависит от размера капель. Однако при увеличении размера капель зона с наибольшей $q_{отн}$ смещается по направлению к границе симметрии расчетной области, в соответствии с начальным направлением вектора скорости капель.

В сечении № 2 при увеличении размера капель пики эпюр смещаются в пристенную зону. Для капель размером 60 мкм максимальные значения $q_{отн}$ уменьшены примерно на 5...10 % относительно капель размером 40 мкм. Это вызвано тем, что с увеличением размера капель все большая их часть осаждается на стенке КС.

Значения критерия $\theta_{отн}$, характеризующего неравномерность распределения расходонапряженности в сечениях модельной КС, для всех рассматриваемых случаев приведены на рис. 9.

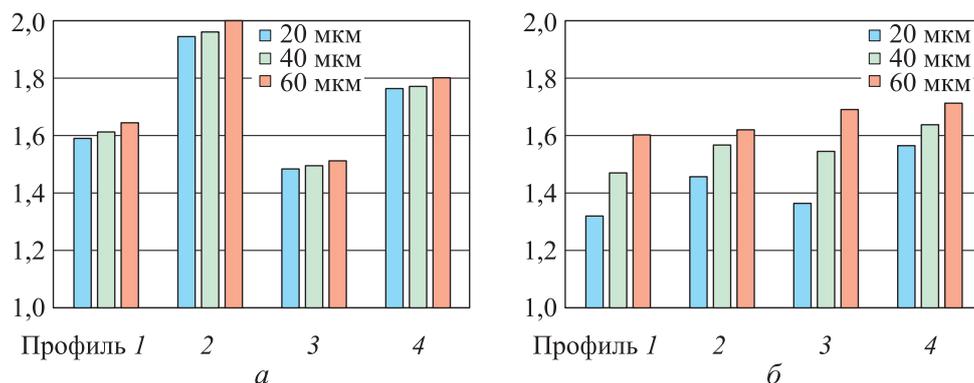


Рис. 9. Гистограммы значений $\theta_{отн}$ для сечений № 1 (а) и № 2 (б)

Сравнивая полученные результаты, следует выделить вариант с профилем 3 (капли размером 20 мкм), которому соответствует наиболее равномерное распределение массового потока капель горячего в сечении № 1. Значение $\theta_{отн}$ в конце модельной КС ниже в среднем на 19 % относительно сечения за АСР для всех расчетных случаев. Из рассмотренных вариантов минимальная неравномерность достигается в сечении № 2 для профиля 1.

Заключение. В результате исследования влияния начальной конфигурации факела распыла капель горячего, формируемого АСР, на равномерность распределения массового потока капель в прямоточной модельной КС установлено следующее.

В расчетном случае с конфигурацией факела распыла капель размером 20 мкм, заданного профилем 3, достигается лучшая равномерность распределения капель в объеме КС. Среднее для сечений № 1 и № 2 значение относительного среднеквадратического отклонения расходонапряженности $\theta_{отн} = 1,42$, для худшего случая (капли размером 60 мкм, профиль 2) $\theta_{отн} = 1,81$.

Изменение профиля подачи капель существенно влияет на равномерность распределения капель в сечении № 1. Если рассматривать расчетный случай с размером капель 40 мкм, то диапазон значений $\theta_{отн} = 1,50-1,96$ (23 %) для сечения № 1 против $\theta_{отн} = 1,47-1,63$ (10 %) для сечения № 2.

Изменение размера капель в большей степени влияет на равномерность в сечении № 2, где для профиля 3 диапазон значений $\theta_{отн} = 1,36-1,69$ (20 %), против $\theta_{отн} = 1,48-1,51$ (2 %) в сечении № 1.

Полученные данные позволяют сделать вывод о возможности использования рассмотренной методики при конкретизации конструктивного облика и рабочих режимов систем топливоподачи и АСР, в частности, применительно к прямоточным КС. Настоящая работа может быть расширена в части исследования влияния начальной конфигурации факела распыла капель горючего на эффективность рабочего процесса в модельной КС.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Воронцовский А.В. Метод сравнительной оценки эффективности горения мелкодисперсного конденсированного горючего в камерах РПД произвольной геометрии. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2016, № 1. EDN: VJOEGP
- [2] Арефьев К.Ю., Воронцовский А.В., Прохоров А.Н. и др. Экспериментальное исследование полноты сгорания двухфазных продуктов газификации борсодержащих энергоемких конденсированных составов в высокоэнталийном воздушном потоке. *Физика горения и взрыва*, 2017, № 3, с. 42–52. DOI: <http://doi.org/10.15372/FGV20170305>
- [3] Борисов А.Д. Исследование влияния способа подачи струй в камеру на эффективность смешения и горения топливовоздушной смеси. *Труды МАИ*, 2016, № 90. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74721>
- [4] Вафин И.И., Мингазов Б.Г. Моделирование процесса смешения в камерах сгорания. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2014, № 2, с. 29–32. EDN: STWMIF
- [5] Васильев А.Ю., Свириденков А.А., Гольцев В.Ф. и др. Разработка струйного фронтального устройства с закруткой потока для камер сгорания. *Теплоэнергетика*, 2005, № 11, с. 19–29. EDN: GYFNFX

- [6] Рыжов А.А., Гребенюк Г.П., Головкин Ю.В. Результаты экспериментального исследования влияния параметров фронтального устройства камеры сгорания на концентрацию вредных веществ в продуктах сгорания. В кн.: *Процессы горения, теплообмена и экология тепловых двигателей*. Самара, Самарский ун-т, 2000, с. 224–230. EDN: TZZJDN
- [7] Свириденков А.А., Третьяков В.В., Токталиев П.Д. Распыливание топлива и смесеобразование в нестационарных закрученных течениях за фронтальным устройством камеры сгорания с газодинамическим стабилизатором. *Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках. Тез. докл. V Междунар. конф.* Казань, Свое издательство, 2015, с. 156–157. EDN: UYDUST
- [8] Назукин В.А. Определение требований к расчетным моделям для прогнозирования аэродинамики фронтальных устройств малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей. *Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации*, 2015, № 1, с. 22–26. EDN: VRRAlB
- [9] Ливерко Е.А., Логинова А.А., Маслов В.П. и др. Применение метода PSV для исследования характеристик аэрозоля за фронтальным устройством камеры сгорания ГТД. *Матер. III Отраслевой конф. по измерительной технике и метрологии для исследований летательных аппаратов*. Жуковский, ЦАГИ, 2018, с. 324–344. EDN: UUJXHT
- [10] Воронецкий А.В., Филимонов Л.А., Абрамов М.А. и др. Математическое моделирование течения в топливоподающем распылителе прямооточной камеры сгорания. *XLIII Академические чтения по космонавтике*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019, с. 70–71. EDN: YXAQRN
- [11] Ниязбаев К.Т., Ивченкова И.А., Кудрявцев В.А. и др. Методика экспериментального исследования устройства подготовки двухфазной среды. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, № 1. DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2145>
- [12] Картовицкий Л.Л., Левин В.М., Яковлев А.А. Численное исследование процесса смешения в прямооточном воздушно-реактивном двигателе. *Физика горения и взрыва*, 2014, № 3, с. 41–45. DOI: <http://doi.org/10.15372/FGV20150305>
- [13] Петров В.Н., Евдокимов Ю.К., Шабалина О.К. и др. Моделирование многофазных потоков. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*, 2019, № 1, с. 5–10. DOI: [http://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-1\(546\)-5-10](http://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-1(546)-5-10)
- [14] Воронецкий А.В., Краснопольский Б.И., Филимонов Л.А. Специализированный программный комплекс «ГиперКуб» версии 2. Свид. о гос. рег. прогр. для ЭВМ № 2023684218 от 03.11.2023.
- [15] Данильченко В.П., ред. Некоторые вопросы проектирования авиационных газотурбинных двигателей. Самара, СНИЦ РАН, 2002.
- [16] Третьяков В.В., Свириденков А.А., Токталиев П.Д. Распыливание топлива и смесеобразование в нестационарных закрученных течениях за газодинамическим стабилизатором. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2017, № 3, с. 106–112. EDN: ZNEAXT

- [17] Воронцовский А.В., Сучков С.А., Филимонов Л.А. Особенности течения сверхзвуковых высокотемпературных двухфазных потоков продуктов сгорания в каналах со специально формируемой системой скачков уплотнения. *Теплофизика и аэромеханика*, 2007, т. 14, № 2, с. 209–218. EDN: IBFGOP
- [18] Воронцовский А.В., Арефьев К.Ю., Абрамов М.А. Параметрическое расчетное исследование влияния вероятностного характера отклонений траекторий частиц на неравномерность их локализации в модельном тракте. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2021, № 8. DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2107>
- [19] Baklanov A.V. The influence of the method of fuel supply into the combustion chamber on the quality of mixing and on the carbon oxide formation. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 356–363. DOI: <http://doi.org/10.31772/2587-6066-2020-21-3-356-363>
- [20] Бакланов А.В., Неумоин С.П. Методика определения качества смешения газообразного топлива и воздуха за вихревой горелкой камеры сгорания ГТД. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2017, № 1, с. 87–92. EDN: YKMJYZ
- [21] Нгуен Т.Д., Александров Ю.Б., Сулаиман А.И. и др. Экспериментальное и численное определение коэффициента смешения за различными лопаточными завихрителями камеры сгорания газотурбинного двигателя. *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*, 2020, № 4, с. 101–107. EDN: UXIOCH
- [22] Нгуен Т.Д., Александров Ю.Б., Мингазов Б.Г. и др. Экспериментальное исследование процесса смешения в камерах сгорания газотурбинных двигателей. *Вестник РГТА имени П.А. Соловьева*, 2021, № 4, с. 22–30. EDN: SYJQDK
- [23] Бакланов А.В., Маркушин А.Н. Исследование смешения в комбинированном горелочном устройстве малоэмиссионной камеры сгорания ГТД. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2013, № 1, с. 8–14. EDN: SMXCYP
- [24] Маркушин А.Н., Бакланов А.В., Салимзянова Г.Ф. Влияние расходных характеристик фронтного устройства на неравномерность температурного поля камеры сгорания ГТУ. *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*, 2016, т. 18, № 1, с. 95–100. EDN: WJDLFJ

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

Батенин Иван Андреевич — аспирант кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); ведущий специалист АО «КТРВ» (Российская Федерация, 141080, Московская обл., г. Королёв, ул. Ильича, д. 7).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Воронецкий А.В., Батенин И.А. Влияние начальной конфигурации факела распыла капель за аэродинамической системой распыливания на равномерность распределения горючего в прямоточной камере сгорания. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2025, № 4 (155), с. 23–42. EDN: KMCMP1

INFLUENCE OF THE DROPLET SPRAY TORCH INITIAL CONFIGURATION BEHIND THE AERODYNAMIC SPRAYING SYSTEM ON FUEL DISTRIBUTION UNIFORMITY IN THE DIRECT-FLOW COMBUSTION CHAMBER

A.V. Voronetskiy¹

voron@bmstu.ru

I.A. Batenin^{1,2}

batenin.i@bmstu.ru

¹BMSTU, Moscow, Russian Federation

²JSC “Tactical Missiles Corporation”, Korolev, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The paper examines influence of the initial fuel droplet spray torch configuration generated by the aerodynamic spraying system on uniformity of the fuel distribution in the direct-flow combustion chamber. The aerodynamic spraying system consists of several fuel-delivery sprayers, which operating principle is similar to a carburetor. Fuel in this spraying system is injected into the air flow passing through the sprayer internal channel. The air-droplet mixture droplet spray torch configuration is determined by the number and position of the outlet openings. The paper presents results of a numerical simulation of the two-phase (air-droplet) flow using the specialized “HyperCube” software package. The fuel droplet combustion process is not simulated in this problem statement; the droplets are assumed to be inert. The variable parameters chosen include spray configuration determined by the fuel mass flow rate distribution profile across the nozzle height, and the monodisperse droplets size. Flow velocity distribution fields, droplet motion trajectories, and three-dimensional distribution diagrams of the droplet mass flow rate intensity in various cross-sections of the model combustion chamber are obtained. In addition to a qualitative analysis of the droplet trajectory distribution within the combustion chamber volume, the paper

Keywords

Aerodynamic spraying system, droplet spray torch, numerical simulation, flow rate intensity, combustion chamber, mean square deviation, distribution uniformity

proposes a method for quantitatively assessing uniformity of the droplet mass flow distribution in the given combustion chamber cross-sections. In the latter case, standard deviation of the mass flow rate intensity from its cross-sectional average value is chosen as the criterion. The paper determines a droplet spray torch configuration that ensures best uniformity of the fuel droplet distribution in the combustion chamber

Received 26.12.2024

Accepted 07.04.2025

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Voronetskiy A.V. Method of comparative analysis of highly dispersed condensed fuel combustion efficiency in arbitrary geometry solid propellant ramjet burners. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education: Scientific Publication], 2016, no. 1 (in Russ.). EDN: VJOEGP
- [2] Arefyev K.Yu., Voronetskiy A.V., Prokhorov A.N., et al. Experimental study of the combustion efficiency of two-phase gasification products of energetic boron-containing condensed compositions in a high-enthalpy airflow. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2017, vol. 53, no. 3, pp. 283–292. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508217030054>
- [3] Borisov A.D. Studying jets injection into the combustion chamber method effect on air-fuel mixture mixing efficiency. *Trudy MAI*, 2016, no. 90 (in Russ.). Available at: <https://trudymai.ru/published.php?ID=74721>
- [4] Vafin I.I., Mingazov B.G. Modeling of the process of mixing in the combustion chambers. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 2, pp. 29–32 (in Russ.). EDN: STWMIF
- [5] Vasilyev A.Yu., Sviridenkov A.A., Goltsev V.F., et al. Development of a jet burner with flow swirling a for combustion chambers. *Therm. Eng.*, 2005, vol. 52, no. 11, pp. 838–848.
- [6] Ryzhov A.A., Grebenyuk G.P., Golovkin Yu.V. Rezultaty eksperimentalnogo issledovaniya vliyaniya parametrov frontovogo ustroystva kamery sgoraniya na kontsentratsiyu vrednykh veshchestv v produktakh sgoraniya [Results of an experimental study of the effect of front-end device parameters of a combustion chamber on concentration of harmful substances in combustion products]. V kn.: *Protsessy goreniya, teploobmena i ekologiya teplovykh dvigateley* [In: Combustion processes, heat transfer and ecology of heat engines]. Samara, Samarskiy un-t Publ., 2000, pp. 224–230 (in Russ.). EDN: TZZJDN
- [7] Sviridenkov A.A., Tretyakov V.V., Toktaliev P.D. [Fuel atomization and mixture formation in unsteady swirling flows behind a combustion chamber front with a gas-dynamic stabilizer]. *Tplomassoobmen i gidrodinamika v zakruchennykh potokakh. Tez. dokl. V Mezhdunar. konf.* [Heat and Mass Transfer and Hydrodynamics in Swirling Flows. Abs. V Int. Conf.]. Kazan, Svoe izdatelstvo Publ., 2015, pp. 156–157 (in Russ.). EDN: UYDUST
- [8] Nazukin V.A. Determination of requirements for computational models for predicting the aerodynamics of front-end devices of low-emission combustion chambers of gas turbine engines. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, no. 1, pp. 22–26 (in Russ.). EDN: VRRRAIB

- [9] Liverko E.A., Loginova A.A., Maslov V.P., et al. [Application of the PSV method to study the characteristics of aerosol behind the front device of a gas turbine engine combustion chamber]. *Mater. III Otrasevoy konf. po izmeritel'noy tekhnike i metrologii dlya issledovaniy letatel'nykh apparatov* [Proc. III Industry Conf. on Measurement Technology and Metrology for Aircraft Research]. Zhukovskiy, TsAGI Publ., 2018, pp. 324–344 (in Russ.). EDN: UUJXHT
- [10] Voronetskiy A.V., Filimonov L.A., Abramov M.A., et al. [Mathematical modeling of flow in a fuel-injection nozzle of a direct-flow combustion chamber.]. *XLIII Akademicheskie chteniya po kosmonavtike* [XLIII Academic Readings on Cosmonautics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2019, pp. 70–71 (in Russ.). EDN: YXAQRN
- [11] Niazbaev K.T., Ivchenkova I.A., Kudryavtsev V.A., et al. Experimental research technique for a two-phase medium preparation device. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2022, no. 1 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-1-2145>
- [12] Kartovitskiy L.L., Levin V.M., Yakovlev A.A. Numerical study of mixing in an air-breathing rocket engine. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2015, vol. 51, no. 3, pp. 319–323. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508215030053>
- [13] Petrov V.N., Evdokimov Yu.K., Shabalina O.K., et al. Modeling of multiphase flows. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, Telemechanization and Communication in Oil Industry], 2019, no. 1, pp. 5–10 (in Russ.). DOI: [http://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-1\(546\)-5-10](http://doi.org/10.33285/0132-2222-2019-1(546)-5-10)
- [14] Voronetskiy A.V., Krasnopolskiy B.I., Filimonov L.A. Spetsializirovannyi programnyy kompleks “GiperKub» versii 2 [Specialized software package “HyperCube” version 2]. Software reg. certificate no. 2023684218 of 03.11.2023 (in Russ.).
- [15] Danilchenko V.P., ed. Nekotorye voprosy proektirovaniya aviatsionnykh gazoturbinnykh dvigateley [Some issues of designing aircraft gas turbine engines]. Samara, SNTs RAN Publ., 2002.
- [16] Tretyakov V.V., Sviridenkov A.A., Toktaliev P.D. Fuel atomization and mixing in unsteady swirling flows behind the gas-dynamic stabilizer. *Russ. Aeronaut.*, 2017, vol. 60, no. 3, pp. 434–441. DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799817030163>
- [17] Voronetskiy A.V., Suchkov S.A., Filimonov L.A. Peculiarities of high-temperature two-phase flow of combustion products in channels with an intentionally structured system of shock-waves. *Thermophys. Aeromech.*, 2007, vol. 14, no. 2, pp. 201–210. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0869864307020060>
- [18] Voronetskiy A.V., Arefyev K.Yu., Abramov M.A. Parametric computational study of particle trajectory deviation probabilistic nature influencing the unevenness of their localization in the model tract. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2021, no. 8 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/2308-6033-2021-8-2107>

- [19] Baklanov A.V. The influence of the method of fuel supply into the combustion chamber on the quality of mixing and on the carbon oxide formation. *Siberian Journal of Science and Technology*, 2020, vol. 21, no. 3, pp. 356–363 (in Russ.).
DOI: <http://doi.org/10.31772/2587-6066-2020-21-3-356-363>
- [20] Baklanov A.V., Neumoin S.P. A technique of gaseous fuel and air mixture quality identification behind the swirl burner of gas turbine engine combustion chamber. *Russ. Aeronaut.*, 2017, vol. 60, no. 1, pp. 90–96.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799817010135>
- [21] Nguen T.D., Aleksandrov Yu.B., Sulaiman A.I., et al. Experimental and numerical investigation of the mixing ratio for various vane swirlers of the combustion chamber of a gas turbine engine. *Russ. Aeronaut.*, 2020, vol. 63, no. 4, pp. 669–676.
DOI: <https://doi.org/10.3103/S1068799820040145>
- [22] Nguen T.D., Aleksandrov Yu.B., Mingazov B.G., et al. Experimental investigation of mixing process in gas turbine engine combustors. *Vestnik RGATA imeni P.A. Solovyeva*, 2021, no. 4, pp. 22–30 (in Russ.). EDN: SYJQDK
- [23] Baklanov A.V., Markushin A.N. Study of mixing in a combined burner of the gte low emission combustion chamber. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2013, no. 1, pp. 8–14 (in Russ.). EDN: SMXCYP
- [24] Markushin A.N., Baklanov A.V., Salimzyanova G.F. The effect of flow characteristics of the dome on temperature field variation at the combustor exhaust. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Izvestia RAS SamSC], 2016, vol. 18, no. 1, pp. 95–100 (in Russ.). EDN: WJDLFJ

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

Batenin I.A. — Post-Graduate Student, Department of the Rocket Engines, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Leading Specialist, JSC “Tactical Missiles Corporation” (Ilyicha ul. 7, Korolev, Moscow Region, 141080 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Voronetskiy A.V., Batenin I.A. Influence of the droplet spray torch initial configuration behind the aerodynamic spraying system on fuel distribution uniformity in the direct-flow combustion chamber. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2025, no. 4 (155), pp. 23–42 (in Russ.).
EDN: KMCMPI