

А.А. Шилова, И.С. Кузнецов, Н.Л. Бачев, Р.В. Бульбович

Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАМЕРЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО СМЕШЕНИЯ В УТИЛИЗАЦИОННОЙ ЭНЕРГОУСТАНОВКЕ

Сжигание низкопотенциальных нестандартных топливных газов приобретает в последнее время особое значение. Для выполнения этой задачи целесообразно разрабатывать отечественные утилизационные микротурбинные установки взамен импортных установок типа Capstone. Однако существующие установки данного класса разработаны прежде всего для сжигания стандартных топливных газов типа метан, пропан, природный газ и т.д. При разработке новых отечественных утилизационных установок необходимо учитывать разнородный состав и теплопроизводительность топливных газов, что предъявляет повышенные требования к подготовке топливовоздушных смесей.

При сжигании нестандартных топливных газов в утилизационных газотурбинных энергоустановках предъявляются повышенные требования к эмиссии вредных веществ. На сегодняшний день предложены и разрабатываются различные конструкции низкоэмиссионных камер сгорания в составе газотурбинных установок. Рассматривается гомогенизация топливовоздушной смеси в камере смешения перед ее подачей в камеру сгорания. Имеющиеся исследования показывают, что при гомогенном горении предварительно подготовленной смеси эмиссия вредных веществ существенно уменьшается по сравнению с диффузионным горением при отдельной подаче компонентов. Рассматривается циклонный способ подготовки топливовоздушной смеси с тангенциальным подводом воздуха и топливного газа. В основу математической модели положены законы сохранения полной массы, импульса и энтальпии смеси, массовой концентрации окислителя и горючего. Турбулентные характеристики переноса получены с использованием $k-\epsilon$ -модели турбулентности. Проведены варианты расчетов смешения с различными значениями времени пребывания и относительной расходонапряженности. Приводится анализ скоростей, коэффициентов избытка воздуха и неравномерностей коэффициентов избытка воздуха по объему камеры смешения. Даны рекомендации по использованию обобщенных характеристик (время пребывания и относительная расходонапряженность) при определении геометрических размеров камеры смешения.

Ключевые слова: камера смешения, топливовоздушная смесь, гомогенное горение, неравномерность коэффициента избытка воздуха, время пребывания, относительная расходонапряженность, геометрические размеры камеры смешения.

A.A. Shilova, I.S. Kuznetsov, N.L. Bachev, R.V. Bulbovich

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

USING THE PRE-MIXING CHAMBER IN THE UTILIZATION POWER PLANT

The combustion of low-grade non-standard fuel gases has recently acquired particular importance. To accomplish this task, it is advisable to develop domestic utilization microturbine installations instead of imported Capstone-type installations. However, the existing plants of this class are designed primarily for burning standard fuel gases such as methane, propane, natural gas, etc. When developing new domestic utilization plants, it is necessary, first of all, to take into account the heterogeneous composition and heat output of fuel gases, which places increased demands on the preparation of fuel-air mixtures.

When burning non-standard fuel gases in utilization gas turbine power plants, there are increased requirements for the emission of harmful substances. To date, various designs of low-emission combustion chambers as part of gas turbine units have been proposed and are being developed. This paper discusses the homogenization of the fuel-air mixture in the mixing chamber before it is fed into the combustion chamber. Available studies show that with a homogeneous combustion of a previously prepared mixture, the emission of harmful substances is significantly reduced compared with diffusion burning with a separate supply of components. The paper discusses the cyclone method of preparing a fuel-air mixture with a tangential supply of air and fuel gas. The mathematical model is based on the laws of conservation of the total mass, momentum and enthalpy of the mixture, the mass concentration of the oxidizer and fuel. Turbulent transport characteristics are obtained using the $k-\epsilon$ -turbulence model. Variant calculations of mixing with different residence times and relative flow rates are carried out. The analysis of speeds, air excess factors and uneven air excess factors by volume of the mixing chamber is given. Recommendations on the use of generalized characteristics (time of stay and relative flow intensity) in determining the geometric dimensions of the mixing chamber are proposed.

Keywords: mixing chamber, fuel-air mixture, homogeneous combustion, unevenness of the coefficient of excess air, residence time, relative flow rate, geometric dimensions of the mixing chamber.

Введение

Для обеспечения минимального уровня эмиссии вредных веществ при утилизации нестандартных газов в многозонных камерах сгорания (КС) необходимо изучить следующие условия: высокую однородность смеси перед подачей в зону горения, максимально возможную скорость реакции горения, температуру в зоне горения 700–1500 °С, постоянство коэффициента избытка воздуха ($\alpha = \text{const}$) в зоне горения; оптимальное распределение воздуха в зоне разбавления [1, 2].

Известные способы снижения эмиссии вредных веществ в КС традиционных схем являются компромиссом между выбросами угарного газа и несгоревших углеводородов, с одной стороны, и выбросами оксидов азота – с другой стороны [3–5]. Создание способа одновременного снижения выброса всех видов вредных веществ является актуальной задачей. На сегодняшний день известны следующие конструктивные схемы низкоэмиссионных КС [6]: двухзонные, изменяемой геометрии, многофорсуночные, с гомогенизацией топливоздушной смеси (ТВС) и каталитические.

При использовании гомогенного горения в первичную зону КС подается полностью перемешанная с воздухом смесь. В данных условиях скорость горения зависит только от физико-химических свойств ТВС (теплоемкости, теплопроводности, турбулентности, давления, концентрации вещества). Достоинствами этого метода являются: малая вероятность химического недожога, небольшая длина пламени, высокая теплопроизводительность горелки, малая эмиссия вредных веществ. Недостатками такой КС являются: вероятность проскока пламени вверх по потоку в устройство подготовки ТВС, срыв пламени вниз по потоку и автоколебания давления [7, 8]. Тем не менее ввиду больших потенциальных возможностей по одновременному снижению всех видов вредных веществ такие КС находят все большее применение как в авиационных, так и в промышленных ГТД [1].

Анализ способов предварительной подготовки ТВС показал, что для предварительного перемешивания компонентов используются смесители камерного, инжекторного, циклонного типов, камеры предварительного смешения, испарительные камеры сгорания и топливные двухкомпонентные форсунки [9–11].

В данной работе рассматривается камера смешения, работающая по принципу циклонного смесителя с тангенциальным подводом воздуха и топливного газа при обеспечении интенсивной закрутки потока относительно оси горелки. Следует учитывать, что скорость ТВС при подаче ее в КС должна быть в 10–15 раз выше скорости распространения пламени, так как иначе появится опасность проскока пламени в циклонный смеситель, особенно в период запуска КС, когда потоки газа и воздуха имеют небольшие скорости подачи. Для предотвращения проскакивания пламени в смеситель необходимо выбрать диаметр входа в КС, при котором скорость истечения газозвушной смеси будет превышать скорость проскока пламени. В промышленных горелках скорость смеси при ее подаче в КС находится в пределах 20–30 м/с [8].

Математическая модель

В основу математической модели положены следующие законы сохранения [12–14]:

1. Уравнение сохранения полной массы

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho V) = 0,$$

где ρ – плотность смеси; V – вектор полной скорости.

2. Уравнение сохранения полного импульса

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla(\rho V \otimes V) = -\nabla P + \nabla((\mu + \mu_t) \nabla V),$$

где P – давление; μ , μ_t – молекулярная и турбулентная динамические вязкости.

3. Уравнение сохранения полной энтальпии h

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla(\rho V h) = \nabla \left(\left(\frac{\lambda}{c_p} + \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \nabla h \right),$$

где λ, c_p – молекулярная теплопроводность и изобарная теплоемкость смеси; турбулентное число Прандтля $Pr_t = 0,9$; $h = c_p T$, T – температура смеси.

 4. Уравнение сохранения массовой концентрации горючего $C_{гор}$

$$\frac{\partial(\rho C_{гор})}{\partial t} + \nabla(\rho V C_{гор}) = \nabla \left(\left(\frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla C_{гор} \right),$$

где Sc – число Шмидта, $Sc = \frac{\mu}{\rho D}$; турбулентное число Шмидта $Sc_t = 0,9$; D – молекулярный коэффициент диффузии.

 5. Уравнение сохранения кинетической энергии турбулентности k

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla(\rho V k) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \nabla k \right) + G_k - \rho \varepsilon,$$

где G_k – генерация турбулентности; эмпирическое число Шмидта – Прандтля $\sigma_k = 1,22$.

 6. Уравнение сохранения диссипации кинетической энергии турбулентности ε

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla(\rho V \varepsilon) = \nabla \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \nabla \varepsilon \right) + C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k},$$

где эмпирические константы $C_1 = 1,44$ и $C_2 = 1,92$; эмпирическое число Шмидта – Прандтля $\sigma_\varepsilon = 1,22$.

7. Турбулентные коэффициенты переноса

$$\mu_t = C_D \rho \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$\lambda_t = \frac{\mu_t c_p}{Pr_t},$$

где эмпирическая константа $C_D = 0,09$.

8. Относительная массовая концентрация горючего

$$\overline{C_{гор}} = \frac{C_{гор}}{\rho}.$$

9. Относительная массовая концентрация окислителя

$$\overline{C_{ок}} = 1 - \overline{C_{гор}}.$$

10. Массовая концентрация окислителя

$$C_{ок} = \rho \overline{C_{ок}}.$$

11. Стехиометрическое массовое соотношение компонентов

$$K_{m0} = \frac{\frac{8}{3} g_C^{гор} + 8 g_H^{гор} + g_S^{гор} - g_O^{гор}}{g_O^{ок} - \frac{8}{3} g_C^{ок} - 8 g_H^{ок} - g_S^{ок}},$$

где $g_i^{гор}$, $g_i^{ок}$ – массовые доли i -го элемента в составе горючего и окислителя соответственно ($i = C, H, S, O, N$).

12. Коэффициент избытка воздуха в смеси

$$\alpha = \frac{1}{K_{m0}} \frac{C_{ок}}{C_{гор}}$$

13. Неравномерность коэффициента избытка воздуха по радиусу в камере смешения

$$\theta = \frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{\alpha_{cp}}$$

где α_{max} , α_{min} , α_{cp} – максимальное, минимальное и среднее значения коэффициента избытка воздуха по радиусу.

Анализ результатов

На рис. 1 представлена принципиальная схема установки гомогенного горения, которая состоит из камеры предварительного смешения 1 и камеры гомогенного горения 2. Подбором диаметра перемычки 3 регулируется скорость подачи подготовленной смеси в камеру гомогенного горения.

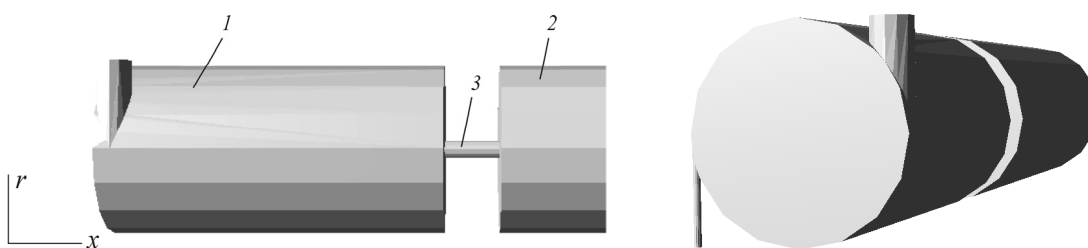


Рис. 1. Принципиальная схема установки гомогенного горения

По предложенной математической модели проведены варианты расчетов смешения воздуха и нефтяного газа (НГ) в камере смешения 1 с использованием программного комплекса FlowVision [15]. Расчетные варианты различаются схемами тангенциального подвода, расходом воздуха и НГ, геометрическими размерами узлов подвода и параметрами расчетной сетки.

Исходные данные расчетного варианта № 1 представлены ниже.

Вариант № 1

Схема подачи окислителя	тангенциальная, по часовой стрелке
Схема подачи горючего	тангенциальная, по часовой стрелке
Диаметр форсунки окислителя	6 мм
Диаметр форсунки горючего	1 мм
Удельный расход окислителя	88,4 кг/(м ² ·с)
Удельный расход горючего	318,0 кг/(м ² ·с)
Расход окислителя	2,5 г/с
Расход горючего	0,25 г/с
Стехиометрическое соотношение компонентов	17,2
Ожидаемый коэффициент избытка воздуха	0,58
Длина камеры смешения	50 мм
Диаметр камеры смешения	30 мм
Давление в камере смешения	125 200 Па
Относительная расходонапряженность	31 · 10 ⁻⁶ кг/(с·Н)

На рис. 2 представлены поле скоростей и зависимость модуля полной скорости от продольной координаты для варианта № 1.

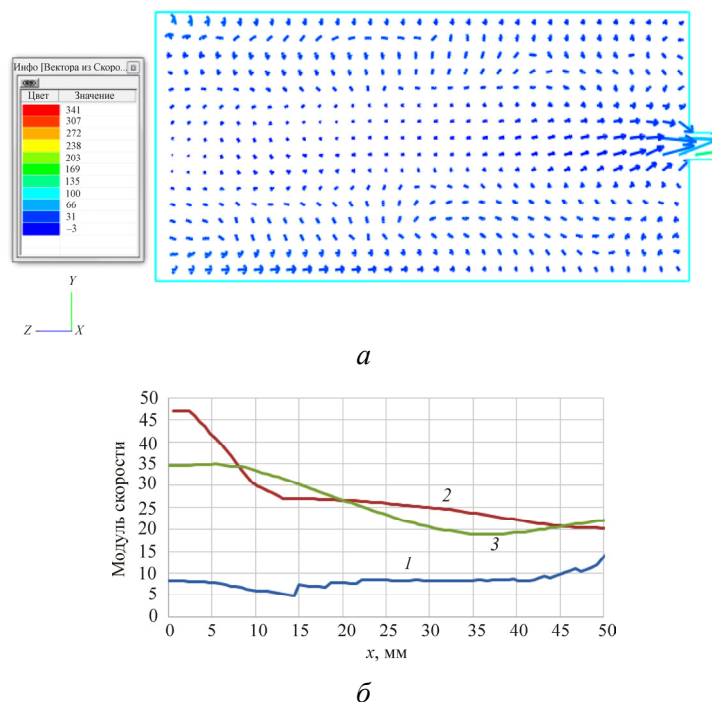


Рис. 2. Полная скорость смеси (для варианта № 1): *a* – поле скоростей; *б* – продольные профили полной скорости (*1* – ось камеры; *2* – плоскость подвода окислителя; *3* – плоскость подвода горючего)

На рис. 3 представлены продольные профили коэффициента избытка воздуха и его радиальной неравномерности для варианта № 1.

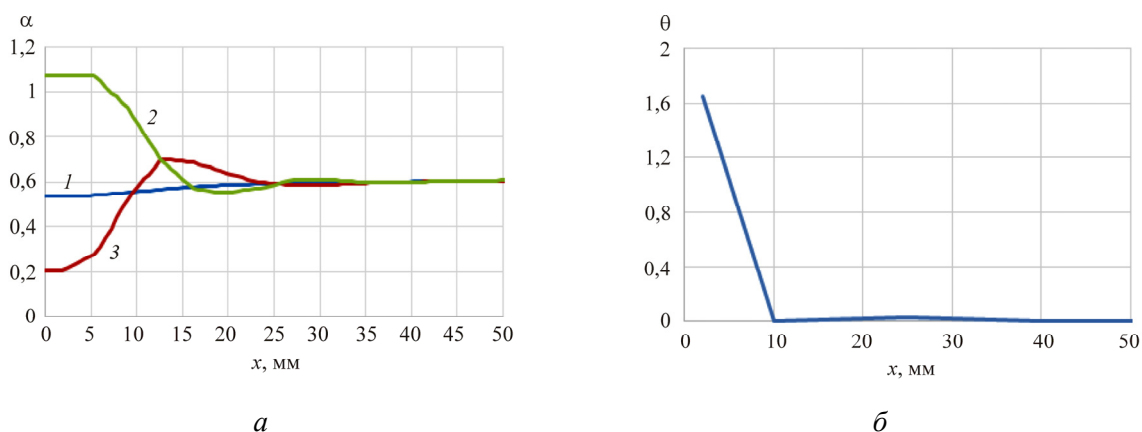


Рис. 3. Характеристики смешения (для варианта № 1): *a* – значения коэффициента избытка воздуха (*1* – ось камеры; *2* – плоскость подвода окислителя; *3* – плоскость подвода горючего); *б* – неравномерность распределения значений коэффициента избытка воздуха

Анализ данных на рис. 2 и 3 показывает, что полное перемешивание смеси происходит на расстоянии $x = 10$ мм от плоскости ввода компонентов, что соответствует удлинению $x/d = 0,33$ и среднему значению коэффициента избытка воздуха $\bar{\alpha} = 0,6$. В момент полного перемешивания компонентов среднерасходная продольная скорость составила $\bar{V} = 30$ м/с, а время пребывания $\tau_{\text{п}} = 0,333$ мс.

Исходные данные расчетного варианта № 2 представлены ниже. По сравнению с вариантом № 1 расходонапряженность увеличена в 4,7 раза.

Вариант № 2

Схема подачи окислителя	тангенциальная, по часовой стрелке
Схема подачи горючего	тангенциальная, по часовой стрелке
Диаметр форсунки окислителя	6 мм
Диаметр форсунки горючего	1 мм
Удельный расход окислителя	423,5 кг/(м ² ·с)
Удельный расход горючего	1248,5 кг/(м ² ·с)
Расход окислителя	12,0 г/с
Расход горючего	0,98 г/с
Стехиометрическое соотношение компонентов	17,2
Ожидаемый коэффициент избытка воздуха	0,58
Длина камеры смешения	50 мм
Диаметр камеры смешения	30 мм
Давление в камере смешения	125 200 Па
Относительная расходонапряженность	147 · 10 ⁻⁶ кг/(с·Н)

На рис. 4 представлены поле скоростей и зависимость модуля полной скорости от продольной координаты (для варианта № 2).

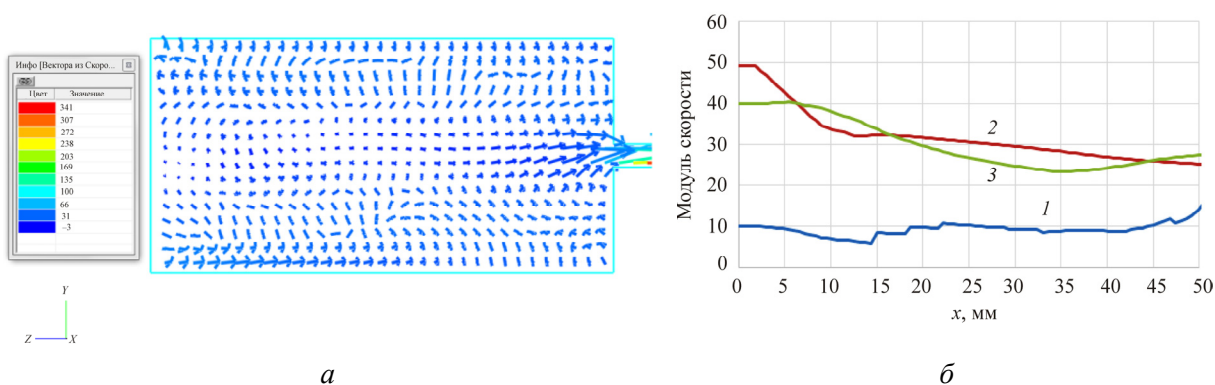


Рис. 4. Полная скорость смеси (для варианта № 2): а – поле скоростей; б – продольные профили полной скорости (1 – ось камеры; 2 – плоскость подвода окислителя; 3 – плоскость подвода горючего)

На рис. 5 представлены продольные профили коэффициента избытка воздуха и его радиальной неравномерности (для варианта № 2).

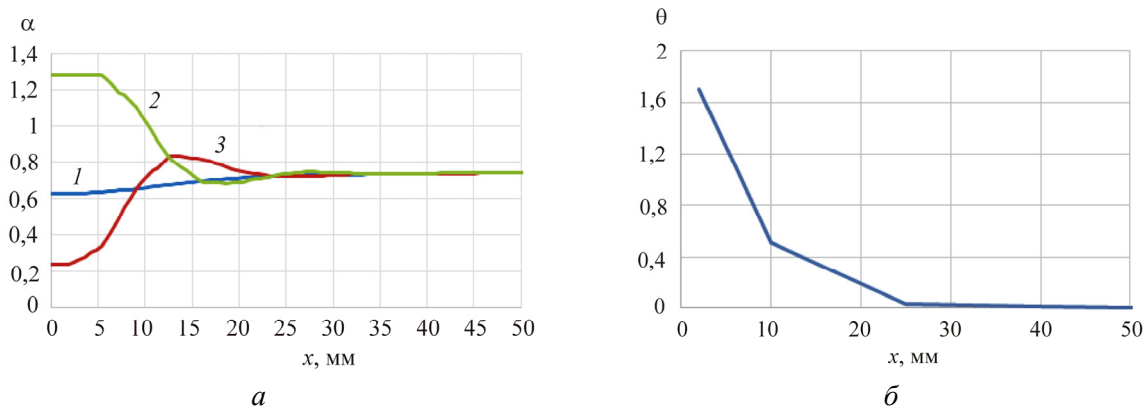


Рис. 5. Характеристики смешения (для варианта № 2): а – значения коэффициента избытка воздуха (1 – ось камеры; 2 – плоскость подвода окислителя; 3 – плоскость подвода горючего); б – неравномерность распределения значений коэффициента избытка воздуха

Анализ данных на рис. 4 и 5 показывает, что полное перемешивание смеси происходит на расстоянии $x = 25$ мм от плоскости ввода компонентов, что соответствует удлинению $x/d = 0,833$ и среднему значению коэффициента избытка воздуха $\bar{\alpha} = 0,74$. В момент полного перемешивания компонентов среднерасходная продольная скорость $\bar{V} = 33,1$ м/с, а время пребывания $\tau_{п} = 0,755$ мс.

Исходные данные расчетного варианта № 3 представлены ниже. По сравнению с базовым вариантом № 1 длина КС и размеры расчетных ячеек уменьшаются в 1,7 раза.

Вариант № 3

Схема подачи окислителя	тангенциальная, по часовой стрелке
Схема подачи горючего	тангенциальная, по часовой стрелке
Диаметр форсунки окислителя	6 мм
Диаметр форсунки горючего	1 мм
Удельный расход окислителя	88,4 кг/(м ² ·с)
Удельный расход горючего	318,0 кг/(м ² ·с)
Расход окислителя	2,5 г/с
Расход горючего	0,25 г/с
Стехиометрическое соотношение компонентов	17,2
Ожидаемый коэффициент избытка воздуха	0,58
Длина камеры смешения	30 мм
Диаметр камеры смешения	30 мм
Давление в камере смешения	125 200 Па
Относительная расходонапряженность	$31 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·Н)

На рис. 6 представлены поле скоростей и зависимость модуля полной скорости от продольной координаты для варианта № 3.

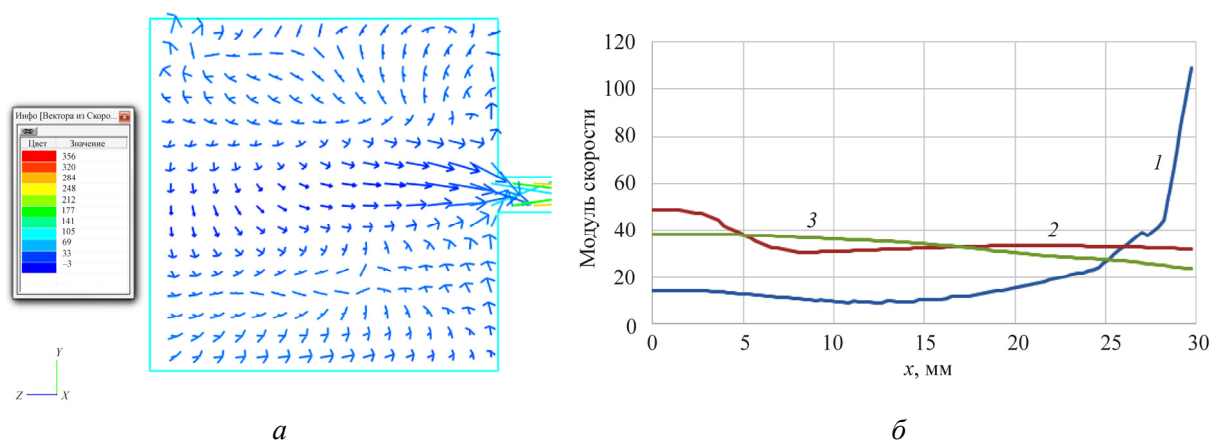


Рис. 6. Полная скорость смеси (для варианта № 3): *a* – поле скоростей; *б* – продольные профили полной скорости (*1* – ось камеры; *2* – плоскость подвода окислителя; *3* – плоскость подвода горючего)

На рис. 7 представлены продольные профили коэффициента избытка воздуха и его радиальной неравномерности для варианта № 3.

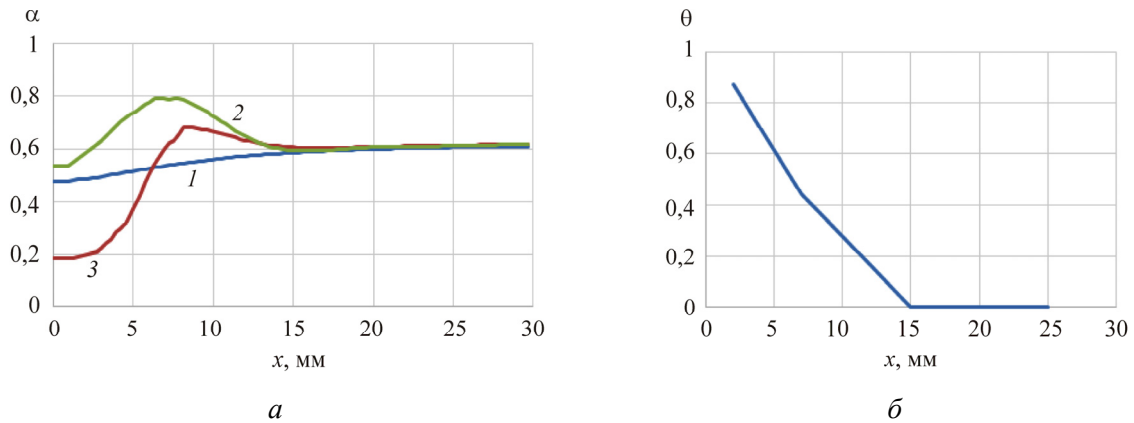


Рис. 7. Характеристики смешения (для варианта № 3): а – значения коэффициента избытка воздуха (1 – ось камеры; 2 – плоскость подвода окислителя; 3 – плоскость подвода горючего); б – неравномерность распределения значений коэффициента избытка воздуха

Анализ данных на рис. 6 и 7 показывает, что полное перемешивание смеси происходит на расстоянии $x = 15$ мм от плоскости ввода компонентов, что соответствует удлинению $x/d = 0,5$ и среднему значению коэффициента избытка воздуха $\bar{\alpha} = 0,61$. В момент полного перемешивания компонентов среднерасходная продольная скорость $\bar{V} = 25,5$ м/с, а время пребывания $\tau_{\text{п}} = 0,590$ м/с. Таким образом, расчетные величины характеристик перемешивания (особенно длина полного смешения) зависят от размеров расчетных ячеек. При уменьшении размеров ячейки в 1,7 раза длина полного смешения увеличилась на 30 % при прочих равных условиях.

Исходные данные расчетного варианта № 4 представлены ниже. По сравнению с вариантами № 1–3 здесь рассматривается встречная тангенциальная подача воздуха и нефтяного газа.

Вариант № 4

Схема подачи окислителя	тангенциальная, по часовой стрелке
Схема подачи горючего	тангенциальная, против часовой стрелки
Диаметр форсунки окислителя	6 мм
Диаметр форсунки горючего	1 мм
Удельный расход окислителя	423,5 кг/(м ² ·с)
Удельный расход горючего	1248,5 кг/(м ² ·с)
Расход окислителя	12,0 г/с
Расход горючего	0,98 г/с
Стехиометрическое соотношение компонентов	17,2
Ожидаемый коэффициент избытка воздуха	0,58
Длина камеры смешения	50 мм
Диаметр камеры смешения	30 мм
Давление в камере смешения	125200 Па
Относительная расходонапряженность	$147 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·Н)

На рис. 8 представлены поле скоростей и зависимость модуля полной скорости от продольной координаты для варианта № 4.

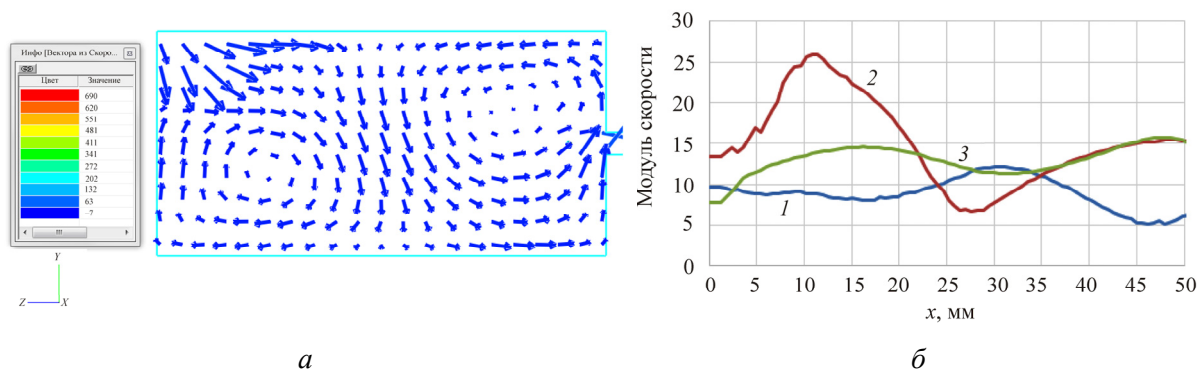


Рис. 8. Полная скорость смеси (для варианта № 4): *а* – поле скоростей; *б* – продольные профили полной скорости (*1* – ось камеры; *2* – плоскость подвода окислителя; *3* – плоскость подвода горючего)

На рис. 9 представлены продольные профили коэффициента избытка воздуха и его радиальной неравномерности для варианта № 4.

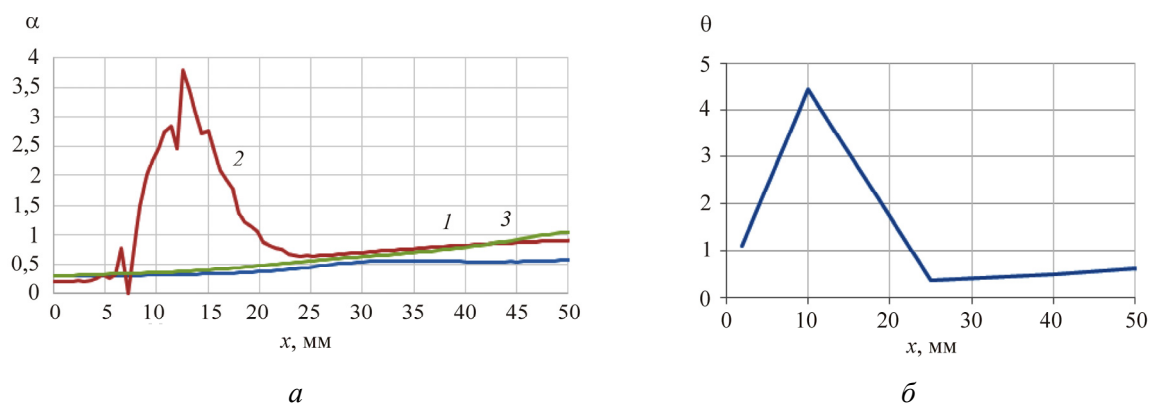


Рис. 9. Характеристики смешения (для варианта № 4): *а* – значения коэффициента избытка воздуха (*1* – ось камеры; *2* – плоскость подвода окислителя; *3* – плоскость подвода горючего); *б* – неравномерность распределения значений коэффициента избытка воздуха

Анализ данных на рис. 8 и 9 показывает, что в данном варианте полного перемешивания смеси не происходит. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что при встречной подаче компонентов происходит торможение потоков, т.е. микрообъемы не перемешиваются, а «скользят» относительно друг друга.

Проведенные исследования позволяют сформулировать вывод о том, что однонаправленный тангенциальный подвод компонентов способствует их полному перемешиванию в малых объемах камеры смешения. При разработке камер смешения следует ориентироваться на время пребывания $\tau_{\text{п}} \geq 1$ мс и относительную расходонапряженность $\overline{g_{\text{к}}} \geq 150 \cdot 10^{-6}$ кг/(с·Н).

Библиографический список

1. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок: учеб. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с. (Сер. Газотурбинные двигатели.)
2. Ведешкин Г.К., Свердлов Е.Д. Организация низкоэмиссионного сжигания газа в газотурбинных установках // Теплоэнергетика. – 2005. – № 11. – С. 10–13.
3. Расчет образования СО и NO_x в камерах сгорания ГТД: электрон. учеб. пособие / С.Г. Матвеев, С.В. Лукачев, М.Ю. Орлов, И.В. Четет, Ю.В. Красовская. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та им. С.П. Королева, 2012. – 41 с.

4. Скибин В.А., Волков С.А. Выбросы вредных веществ от авиационных двигателей // ЦИАМ. Аэрокосмический курьер. – 2003. – № 2. – С. 18–19.
5. Постников А.М. Снижение оксидов азота и выхлопных азот ГТУ. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2002. – 286 с.
6. Перспективы создания высокотемпературных малотоксичных камер сгорания стационарных ГТУ / А.Г. Тумановский [и др.] // Теплоэнергетика. – 2002. – № 10. – С. 23–26.
7. Исследование автоколебаний давления в камере сгорания с предварительным смешением топлива / Р.С. Кашапов, Д.А. Максимов, Д.В. Скиба, С.В. Куликов, М.Н. Баштанников // Газотурбинные технологии. – 2001. – № 4(13). – С. 34–37.
8. Разработка динамической модели камеры сгорания с предварительным смешением топлива / Р.С. Кашапов, Д.А. Максимов, Д.В. Скиба, С.В. Куликов, М.Н. Баштанников // Вестник Самар. гос. аэрокосм. ун-та. – 2012. – № 2(2). – С. 52–59.
9. Камера предварительного смешивания для газовых турбин: пат. 2262638 Рос. Федерация: МКП F23 R3/30 / Мей Лучано, Миальяни Алесслио, Дин Энтони. – № 2000124312/06; заявл. 22.09.2000; опубл. 20.10.2005. – Бюл. № 29.
10. Колпакова Н.В., Колпаков А.С. Газоснабжение: учеб. пособие / под ред. Н.П. Ширяева. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
11. Удыма П.Г. Аппараты с погружными горелками. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Машиностроение, 1973. – 272 с.
12. Бачев Н.Л., Бетинская О.А., Бульбович Р.В. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания для утилизации попутного нефтяного газа // Инженерно-физический журнал. – 2016. – Т. 89, № 1. – С. 212–220.
13. Бачев Н.Л., Матюнин О.О., Козлов А.А. Численное моделирование рабочего процесса в камере сгорания жидкостных ракетных двигателей с дожиганием генераторного газа при сверхкритических параметрах // Вестник МАИ. – 2011. – Т. 18, № 2. – С. 108–116.
14. Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. Физические и химические аспекты, моделирование, эксперименты, образование загрязняющих веществ. – М.: Физматлит, 2003. – 352 с.
15. FlowVision. Версия 2.5. Руководство пользователя. – М.: ТЕСИС, 2008. – 285 с.

References

1. Inozemtsev A. A., etc. Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok [Bases of designing of aviation engines and power stations]. Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, vol. 2, 368 p.
2. Vedeshkin G.K., Sverdlov E.D. Organizatsiya nizkoemissionnogo szhiganiya gaza v gazoturbinnnykh ustanovkakh [Organization of low-emission gas combustion in gas-turbine installations]. *Teploenergetika*, 2005, no. 11, pp. 10–13.
3. S.G. Matveyev, S.V. Lukachov, M.YU. Orlov, I.V. Chechet, Yu.V. Krasovskaya. Raschetobrazovaniya CO i NO_x v kamerakh sgoraniya GTD: elektron. ucheb. posobiye [Calculation of the formation of CO and NO_x in combustion chambers GTE: electron. training. allowance]. Samara, Samara university, 2012, 41 p.
4. Skibin V.A., Volkov S.A. Vybrosov vrednykh veshchestv ot aviatsionnykh dvigateley [Emissions of harmful substances from aircraft engines]. *Aerokosmicheskii kuryer*, Central Institute of Aviation Motors, 2003, no. 2, pp. 18–19.
5. Postnikov A.M. Snizheniye oksidov azota i vykhlopnykh gazov GTU [Reduction of nitrogen oxides and exhaust gases of gas turbines]. Samara: Publishing house of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2002, 286 p.
6. Tumanovskiy A.G. idr. Perspektivy sozdaniya vysokotemperaturnykh malotoksichnykh kamer sgoraniya statsionarnykh GTU [Prospects for the creation of high-temperature low-toxic combustion chambers of stationary gas turbines]. *Teploenergetika*, 2002, no. 10, pp. 23–26.
7. Kashapov R.S., Maksimov D.A., Skiba D.V., Kulikov S.V., Bashtannikov M.N. Issledovaniye avtokolebaniy davleniya v kamere sgoraniya s predvaritelnyim smesheniyem topliva [Investigation of auto-oscillations of pressure in the combustion chamber with preliminary mixing of fuel]. *Gazoturbinnnyye tekhnologii*, 2001, no. 4(13), pp. 34–37.
8. Kashapov R.S., Maksimov D.A., Skiba D.V., Kulikov S.V., Bashtannikov M.N. Razrabotka dinamicheskoy modeli kamery sgoraniya s predvaritelnyim smesheniyem topliva [Development of a dynamic

model of a combustion chamber with preliminary mixing of fuel]. VESTNIK of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering, 2012, no. 2(2), pp. 52-59.

9. Kamera predvaritel'nogo smeshivaniya dlya gazovykh turbin [Chamber of preliminary mixing for gas turbines]. Patent 2262638 Russian Federation: MKP F23 R3/30. Mei Luchano, Mil'ani Alessio, Din Entoni. № 2000124312/06.

10. N.V. Kolpakova, A.S. Kolpakov. Gazosnabzheniye :uchebnoye posobiye [Gas supply: study guide]. Yekaterinburg: Publishing house of the Ural University, 2014, 200 p.

11. Udyma P.G. Apparaty s pogruzhnymi gorelkami [Devices with immersion burners]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1973, 272 p.

12. Bachev N.L., Betinskaya O.A., Bulbovich R.V. Chislennoye modelirovaniye rabocheho protsessa v kamere sgoraniya dlya utilizatsii poputnogo neftyanogo gaza [Numerical simulation of the working process in the combustion chamber for utilization of associated petroleum gas]. Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 2016, vol. 89, no. 1, pp. 212-220.

13. Bachev N.L., Matyunin O.O., Kozlov A.A. Chislennoye modelirovaniye rabocheho protsessa v kamere sgoraniya zhidkostnykh raketnykh dvigateley s dozhiganiyem generatornogo gaza pri sverkhkriticheskikh parametrah [Numerical simulation of the working process in the combustion chamber of liquid rocket engines with afterburning of generator gas at supercritical parameters]. Aerospace MAI Journal, 2011, vol. 18, no. 2, pp. 108-116.

14. Varnatts Yu., Maas U., Dibbl R. Goreniye. Fizicheskiye i khimicheskiye aspekty, modelirovaniye, eksperimenty, obrazovaniye zagryaznyayushchikh veshchestv [Physical and chemical aspects, modeling, experiments, the formation of pollutants]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 352 p.

15. FlowVision. Versiya 2.5. Rukovodstvo polzovatelya [FlowVision. Version 2.5. User's manual]. Moscow: TESIS, 2008, 285 p.

Об авторах

Шилова Алена Алексеевна (Пермь, Россия) – инженер кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: alyona1203@gmail.com).

Кузнецов Иван Сергеевич (Пермь, Россия) – студент ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: radiofm_2010@mail.ru).

Бачев Николай Леонидович (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: bnl54@yandex.ru).

Булбович Роман Васильевич (Пермь, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы» ФГБОУ ВО ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., д. 29; e-mail: Bulbovich@pstu.ru).

About the authors

Alyona A. Shilova (Perm, Russian Federation) – Engineer of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: alyona1203@gmail.com).

Ivan S. Kuznetsov (Perm, Russian Federation) – Student, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: radiofm_2010@mail.ru).

Nikolay L. Bachev (Perm, Russian Federation) – CSc in Technical Sciences, Professor of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: bnl54@yandex.ru).

Roman V. Bulbovich (Perm, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of Rocket and Space Engineering and Power Generating Systems Department, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation; e-mail: Bulbovich@pstu.ru).