

ВЛИЯНИЕ ТУРБУЛЕНТНОСТИ НА РАЗВИТИЕ ТЕЧЕНИЯ В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ*

А. Э. Зангиев¹, В. С. Иванов², С. Н. Медведев³, С. М. Фролов⁴, Ф. С. Фролов⁵,
И. В. Семенов⁶, В. В. Власенко⁷

Аннотация: Проведено двумерное численное моделирование развития течения в высокоскоростной камере сгорания ЦАГИ с учетом влияния турбулентных пульсаций температуры на среднюю скорость химических превращений. Показано, что учет этого эффекта приводит к изменению динамики процессов в камере, имеющей пилоны подачи горючего и уступ для стабилизации горения. После воспламенения топливно-воздушной смеси, вызванного дросселированием потока в конце камеры сгорания, возникающая в канале зона горения значительно быстрее достигает уступа и проскакивает к пилонам, чем в расчете без учета этого эффекта. Исследованы причины такого изменения динамики процессов. Оказалось, что интенсивность турбулентных пульсаций температуры в предпламенной зоне с большими градиентами скорости может достигать 6%–10% (110–180 К), что вызвано генерацией турбулентности интенсивностью до 15%–20% в этой зоне. Такие пульсации температуры оказывают существенное влияние на среднюю скорость реакции, приводя к ускорению процессов.

Ключевые слова: высокоскоростная камера сгорания; горение; турбулентные пульсации температуры; средняя скорость реакции; численное моделирование

Введение

В камерах сгорания прямоточных двигателей высокоскоростных летательных аппаратов температура воздуха может превышать 1000 К, а интенсивность турбу-

* Работа выполнена при поддержке Центра компьютерного моделирования им. О. М. Белоцерковского ЦАГИ–РАН.

¹ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), sydra777@gmail.com

² Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, ivanov.vls@gmail.com

³ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук, medvedevs@chph.ras.ru

⁴ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), smfrol@chph.ras.ru

⁵ Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова Российской академии наук; Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), f.frolov@chph.ru

⁶ Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), Институт автоматизации проектирования Российской академии наук, semenov@icad.org.ru

⁷ Центральный аэрогидродинамический институт им. Н. Е. Жуковского (ЦАГИ), vlasenko.vv@yandex.ru

лентности может достигать 20%–25%. В таких условиях горение углеводородного топлива, скорее всего, происходит в комбинированном фронтально-объемном режиме, когда в потоке сосуществуют тонкие зоны реакции, отделяющие свежую смесь от продуктов горения, и широкие зоны объемного энерговыделения. При численном моделировании турбулентного горения в таких камерах сгорания возникает проблема расчета средней скорости химической реакции, входящей в осредненные уравнения энергии и неразрывности химических компонентов. Эту проблему часто называют проблемой «взаимодействия турбулентности с химией» (ВТХ; в англоязычной литературе: “turbulence–chemistry interaction”), поскольку при определении средней скорости химических превращений необходимо учесть пространственную неоднородность химической активности в расчетной ячейке, вызванную турбулентностью [1].

В данной работе решается задача о численном моделировании развития течения в высокоскоростной камере сгорания ЦАГИ с учетом ВТХ.

Постановка задачи

Рассматривали камеру сгорания прямоугольного сечения с расширением сечения в виде уступа, которая исследовалась экспериментально в ЦАГИ [2, 3] (рис. 1). Слева через изолятор в камеру втекает сверхзвуковой поток воздуха с числом Маха $M \approx 2,5$ и статической температурой $T \approx 530$ К. Втекающий поток подогрет огненным подогревателем и содержит продукты сгорания, но массовая доля молекулярного кислорода близка к стандартной для воздуха. В конце изолятора (перед уступом камеры) расположены три пилона с восемью отверстиями каждый, из которых в поток подается жидкое углеводородное горючее.

Интегральный коэффициент избытка окислителя, рассчитанный по расходам воздуха и горючего, равен 1,34. Для инициирования горения используется пневмодроссель: в течение 5 мс через несколько отверстий в нижней стенке камеры в канал под высоким давлением подается сжатый воздух. Подача сжатого воздуха приводит к образованию псевдоскачка — области перехода к дозвуковому течению в серии скачков уплотнения, взаимодействующих с отрывными зонами. Торможение потока в псевдоскачке приводит к локальному самовоспламенению

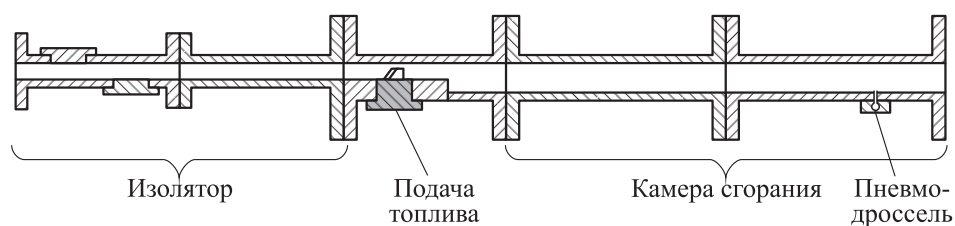


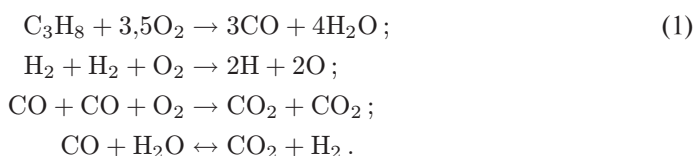
Рис. 1 Геометрия модельной камеры

топливно-воздушной смеси и распространению реакции вверх по течению вместе с псевдоскачком.

Трехмерное и двумерное численное моделирование развития течения в такой камере ранее проводилось в [4–6]. На основе двумерных расчетов в [6] показано, что после выключения пневмодресселя и некоторого переходного периода в камере устанавливался квазистационарный режим течения с периодическими продольными колебаниями зоны горения: хотя зона горения стабилизировалась за уступом канала, она периодически проскакивала к пилонам, вызывая сильные продольные смещения псевдоскачка, расположенного в изоляторе. Анализ расчетов в [6] показывает, что интенсивность турбулентности в камере сгорания на разных стадиях развития течения очень велика и достигает 15%–20%. В таких условиях можно ожидать существенного влияния турбулентности на среднюю скорость химических превращений в высокотемпературном потоке, однако расчеты [6] выполнены без учета этого эффекта.

В данной работе решалась задача о численном моделировании развития течения в рассматриваемой камере сгорания с учетом влияния турбулентных пульсаций температуры на среднюю скорость химических превращений. Как и в [6], расчеты проводились в двумерной постановке на базе нестационарных осредненных уравнений Рейнольдса для неравновесно реагирующего газа (предполагалось, что жидкое горючее мгновенно испарялось, попадая в канал).

В расчетах использовали глобальный кинетический механизм многостадийного окисления пропана в воздухе, предложенный в [7]:



Скорость первой (лимитирующей) реакции рассчитывалась по соотношению для скорости бимолекулярной реакции:

$$w_I = -A_I[\text{C}_3\text{H}_8][\text{O}_2] \exp\left(-\frac{E_I}{RT}\right), \quad (2)$$

где A_I и E_I — предэкспонент и энергия активации реакции (1); R — газовая постоянная; T — температура; $[\text{C}_3\text{H}_8]$ и $[\text{O}_2]$ — мольные концентрации пропана и кислорода. Скорости остальных реакций рассчитывались по стандартным формулам химической кинетики.

Для описания многостадийного самовоспламенения в [7] использован следующий прием: предэкспонент A_I и энергия активации E_I реакции (1) в высоко- и низкотемпературной областях определялись независимо на основе сравнения с экспериментальными данными. Чтобы отделить «низкотемпературную» область

реакции от «высокотемпературной», вводили некоторую температуру переключения T^* (для пропана 775 К) и считали, что при $T < T^*$ параметры A_I и E_I равны их низкотемпературным значениям, а при $T \geq T^*$ — высокотемпературным значениям. При этом для остальных реакций значения предэкспонентов и энергий активации при переходе через T^* не изменялись. Аррениусовские параметры для всех реакций этого механизма приведены в [7].

Покажем на примере реакции (1), как определялись средние скорости всех реакций используемого кинетического механизма в турбулентном потоке. Для средней скорости реакции (1), входящей в осредненные уравнения энергии и неразрывности химических компонентов, на основе соотношения (2) можно приближенно записать:

$$\overline{w_T} = \overline{A_I [C_3H_8][O_2] \exp\left(-\frac{E_I}{RT}\right)} \approx A_I \overline{[C_3H_8]} \cdot \overline{[O_2]} \cdot \overline{\exp\left(-\frac{E_I}{RT}\right)},$$

где черта сверху относится к среднему значению и считается, что нелинейность по температуре существенно более сильная, чем по концентрациям компонентов. Средние концентрации $\overline{[C_3H_8]}$ и $\overline{[O_2]}$ определялись из решения осредненных уравнений неразрывности для химических компонентов смеси, а для расчета функции $\overline{\exp(-E_I/(RT))}$ использовали аналитический метод [1].

В методе [1] предполагается, что в турбулентном потоке температура T — случайная переменная, удовлетворяющая распределению Гаусса, т. е., $T = \overline{T} + \eta \sqrt{T'T'}$, где \overline{T} — средняя температура; T' — турбулентная пульсация температуры; $\sqrt{T'T'}$ — дисперсия пульсаций температуры и η — стандартная Гауссова переменная, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 1 и удовлетворяющая функции плотности распределения вероятности

$$p(\eta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\eta^2}{2}\right).$$

Среднее значение нелинейной функции от температуры $f(T) = \exp(-E_I/(RT))$ равно:

$$\overline{f(T)} = \int_{-\infty}^{+\infty} f\left(\overline{T} + \eta \sqrt{T'T'}\right) p(\eta) d\eta.$$

Чтобы найти интеграл в правой части, используется формула для Гауссовых квадратур

$$\overline{f(T)} \approx \sum_{k=1}^n f\left(\overline{T} + \eta_k \sqrt{T'T'}\right) c_k, \quad (3)$$

где, например, для $n = 5$ узлы η_k и коэффициенты c_k определяются соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \eta_1 &= -\sqrt{5 + \sqrt{10}}; & \eta_2 &= -\sqrt{5 - \sqrt{10}}; & \eta_3 &= 0; \\ \eta_4 &= \sqrt{5 - \sqrt{10}}; & \eta_5 &= \sqrt{5 + \sqrt{10}}; \\ c_1 &= \frac{1}{60} (7 - 2\sqrt{10}); & c_2 &= \frac{1}{60} (7 + 2\sqrt{10}); & c_3 &= \frac{8}{15}; \\ c_4 &= \frac{1}{60} (7 + 2\sqrt{10}); & c_5 &= \frac{1}{60} (7 - 2\sqrt{10}), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

причем

$$c_1 + c_2 + c_3 + c_4 + c_5 = 1.$$

Из (3) и (4) видно, что $\overline{f(T)} \neq f(\overline{T})$ и $\overline{f(T)} = f(\overline{T})$ только при $\sqrt{\overline{T'T'}} = 0$ (в расчетах [6] принималось, что $\overline{f(T)} = f(\overline{T})$).

Дисперсию пульсаций температуры $\sqrt{\overline{T'T'}}$ в турбулентном потоке определяли из решения дополнительного уравнения, которое выводится по аналогии с [8]:

$$\frac{\partial \rho \overline{T'T'}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_j \rho \overline{T'T'}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \overline{T'T'}}{\partial x_j} + C_g \mu_t \left(\frac{\partial \overline{T}}{\partial x_j} \right)^2 - C_d \rho \frac{\varepsilon}{k} \overline{T'T'},$$

где t — время; x_j — координата; ρ — плотность; \bar{u}_j — компонента вектора скорости; μ_t — турбулентная вязкость; k — турбулентная кинетическая энергия; ε — диссипация турбулентной энергии; $\sigma_t = 0,85$; $C_g = 2,86$ и $C_d = 2,0$.

Как и в [6], в расчетах использовали конечно-объемный численный метод типа SIMPLE (semiimplicit method for pressure linked equations) 1-го порядка аппроксимации по времени и по пространству. На стенках с прилипанием использовали метод пристеночных функций. Для моделирования турбулентности использовали $k-\varepsilon$ -модель.

Результаты расчетов

На рис. 2 показаны мгновенные поля статической температуры на начальной стадии развития процесса воспламенения в высокоскоростной камере сгорания без учета (рис. 2, а) и с учетом ВТХ (рис. 2, б) в период времени с 0,5 до 2,3 мс после включения пневмодресселя¹ (струя воздуха показана справа на всех кадрах). Видно, что учет ВТХ приводит к изменению динамики процессов в камере: зона горения значительно быстрее достигает уступа (через 2 мс) и проскакивает к пилонам. Причина такого изменения динамики процессов анализируется на рис. 3–5.

На рис. 3 показан фрагмент зоны горения в момент времени 0,8 мс после включения пневмодресселя в виде мгновенного поля средней статической температуры, а на рис. 4 и 5 показаны распределения средней статической температуры (кривые 1) и пульсационной составляющей температуры (кривые 2) вдоль горизонтальных линий 1–6, изображенных на рис. 3. В указанный момент времени статическая температура в потоке, набегающем на зону горения (начало линий 1–6

¹Пневмодрессель включался в момент времени 15 мс после начала расчета.

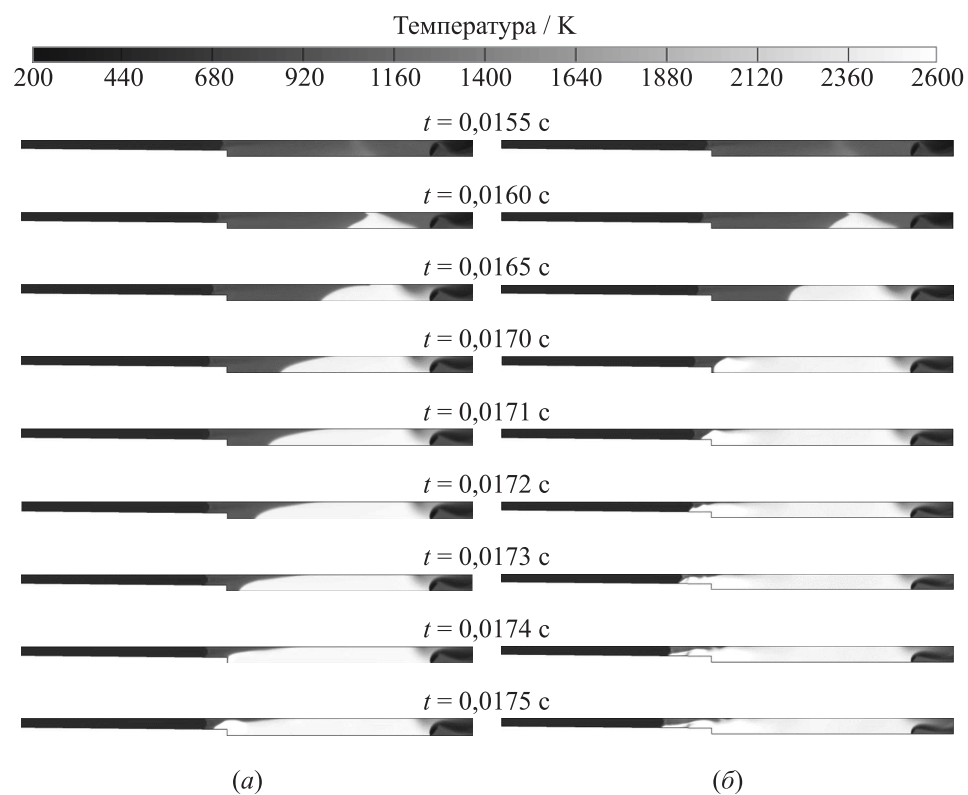


Рис. 2 Сравнение мгновенных полей статической температуры на начальном этапе развития процесса в расчетах без учета (а) и с учетом ВТХ (б)

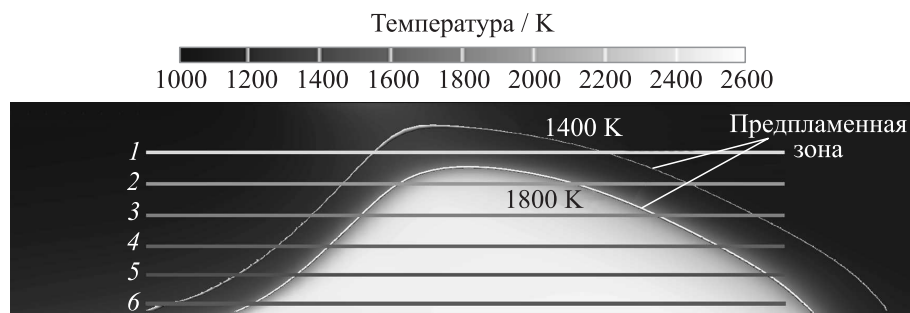


Рис. 3 Фрагмент зоны горения в момент времени 15,8 мс в виде мгновенного поля средней статической температуры. Линии 1–6 — сечения, в которых построены графики на рис. 4 и 5

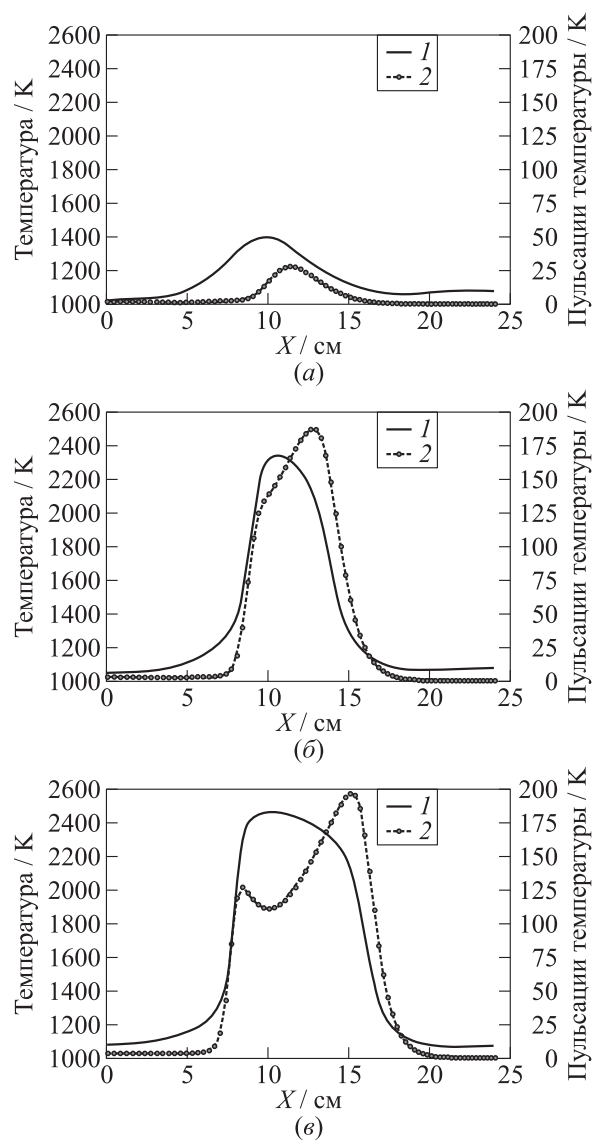


Рис. 4 Расчетные распределения средней статической температуры (1) и пульсационной составляющей температуры (2) вдоль горизонтальных линий, изображенных на рис. 3: (а) вдоль линии 1; (б) 2 и (в) вдоль линии 3

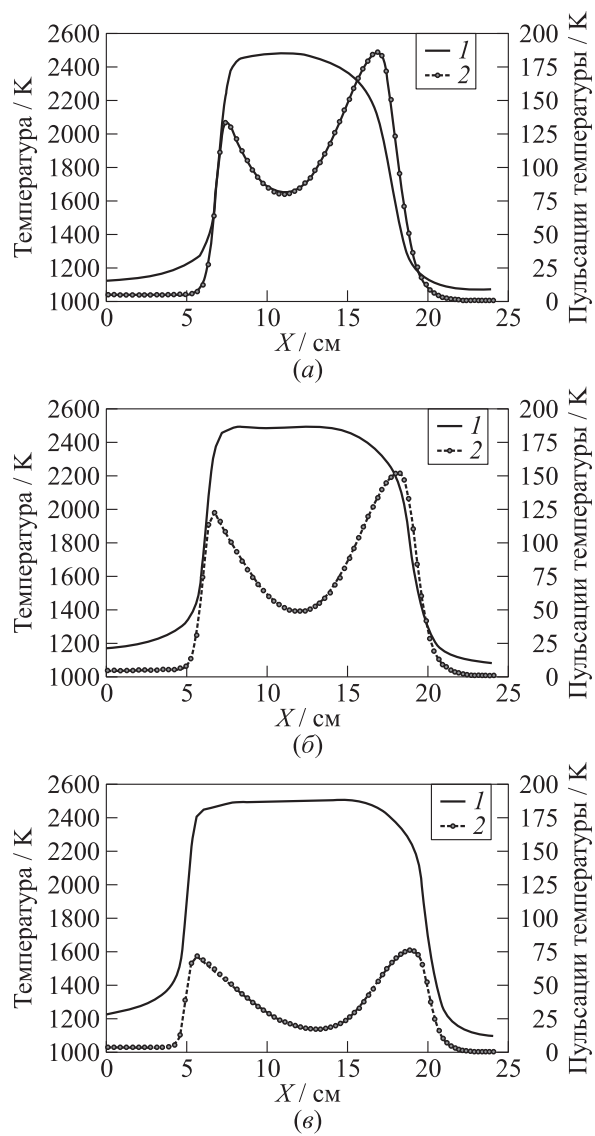


Рис. 5 Расчетные распределения средней статической температуры (1) и пульсационной составляющей температуры (2) вдоль горизонтальных линий, изображенных на рис. 3: (а) вдоль линии 4; (б) 5 и (в) вдоль линии 6

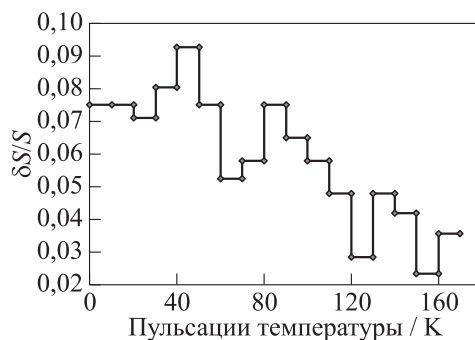


Рис. 6 Пример функции распределения пульсаций температуры в предпламенной зоне в виде зависимости доли общей площади предпламенной зоны $\delta S/S$ (ограничена белыми линиями на рис. 3), в которой имеются пульсации температуры в выбранном интервале амплитуд

на рис. 3) достигает 1050 К в верхней части канала ($X = 0$ на рис. 4, *a*) и постепенно возрастает до 1250 К в нижней части канала в окрестности стенки ($X = 0$ на рис. 5, *в*), а пульсации статической температуры вдали от границы зоны горения относительно малы: $T' = 4-5$ К при $X = 0$ на всех линиях *1-6*. Однако в области течения, близкой к границе зоны горения, амплитуда пульсаций температуры сильно возрастает. Так, вдоль линии *1*, не пересекающей зону горения, амплитуда пульсаций температуры достигает 30 К при локальной средней температуре 1350 К (см. рис. 4, *a*), а вдоль линий *2-6* она соответственно достигает 175 (линия 2), 180 (3), 180 (4), 125 (5) и 50 К (6) (см. рис. 4 и 5) при локальной средней температуре 1800 К, которую можно рассматривать как изотерму фронта горения (нижняя белая линия на рис. 3). Таким образом, интенсивность пульсаций температуры T'/\bar{T} в данном случае достигает значений в 10%. Следует отметить, что максимальная амплитуда пульсаций температуры достигается ниже по течению от рассматриваемого фрагмента зоны горения. Выше по течению максимальная интенсивность пульсаций температуры T'/\bar{T} в данный момент времени не превышает 110 К (6%).

Обработка результатов расчета для фрагмента поля течения, изображенного на рис. 3, позволяет получить функцию распределения пульсаций температуры в предпламенной зоне — области на рис. 3, ограниченной двумя белыми линиями: изотермами 1800 и 1400 К. Такая функция распределения изображена на рис. 6 в виде зависимости доли общей площади предпламенной зоны, в которой имеются пульсации температуры в выбранном интервале амплитуд. Например, пульсации температуры с амплитудой от 40 до 50 К занимают долю площади предпламенной зоны, равную 9,3%, а пульсации температуры с амплитудой от 150 до 160 К занимают долю площади, равную 2,3%.

Возрастание амплитуды пульсаций температуры в предпламенной зоне связано с генерацией турбулентности в этой зоне (рис. 7) вследствие больших градиентов

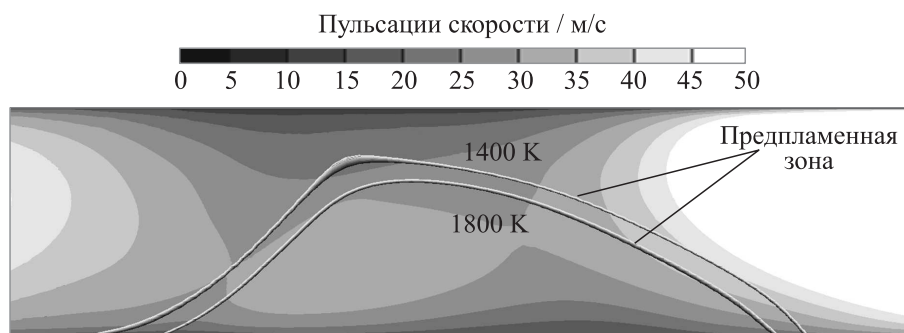


Рис. 7 Фрагмент мгновенного поля пульсаций скорости в зоне горения в момент времени 15,8 мс (область между двумя изотермами 1800 и 1400 К соответствует предпламенной зоне)



Рис. 8 Пример функции распределения пульсаций скорости в предпламенной зоне в виде зависимости доли общей площади предпламенной зоны $\delta S/S$ (ограничена белыми линиями на рис. 7), в которой имеются пульсации скорости в выбранном интервале амплитуд

скорости на границе зоны горения. Из рис. 7 следует, что в предпламенной зоне пульсации скорости достигают значений 40 м/с, а интенсивность турбулентности u'/\bar{u} здесь достигает 15%–20%. За пределами предпламенной зоны пульсации скорости достигают еще больших значений (50 м/с): выше по течению они вызваны зоной обратных токов за уступом камеры сгорания, а ниже по течению — торможением газа перед воздушной струей пневмодросселя.

Обработка результатов расчета для фрагмента поля течения, изображенного на рис. 7, позволяет получить функцию распределения пульсаций скорости в предпламенной зоне. Такая функция распределения изображена на рис. 8 в виде зависимости доли общей площади предпламенной зоны, в которой имеются пульсации скорости в выбранном интервале амплитуд. Видно, что пульсации скорости с амплитудой от 10 до 20 м/с занимают долю площади предпламенной зоны, равную 2%, а пульсации скорости с амплитудой от 30 до 40 м/с — равную 48%.

Заключение

Проведено двумерное численное моделирование развития течения в высокоскоростной камере сгорания ЦАГИ с учетом ВТХ — влияния турбулентных пульсаций температуры на среднюю скорость химических превращений. Показано, что учет ВТХ приводит к изменению динамики процессов в камере, имеющей пилоны подачи горючего и уступ для стабилизации горения. После воспламенения топливно-воздушной смеси, вызванного дросселированием потока в конце камеры сгорания, возникающая в канале зона горения значительно быстрее достигает уступа и проскакивает к пилонам, чем в расчете без учета ВТХ. Исследованы причины такого изменения динамики процессов. Оказалось, что интенсивность турбулентных пульсаций температуры в предпламенной зоне с большими градиентами скорости может достигать 6%–10% (110–180 К), что вызвано генерацией турбулентности в этой зоне с интенсивностью до 15%–20%. Такие пульсации температуры оказывают существенное влияние на среднюю скорость реакции, приводя к ускорению процессов.

Литература

1. *Фролов С. М.* Влияние турбулентности на среднюю скорость химических превращений: обзор // *Горение и взрыв*, 2016. Т. 9. № 1. С. 43–58.
2. *Волощенко О. В., Зосимов С. А., Николаев А. А.* Экспериментальное исследование процесса горения жидкого углеводородного топлива в плоском канале при сверхзвуковой скорости потока на входе // *Модели и методы аэродинамики*, 2002. — М.: МНЦМО. С. 75.
3. *Пиотрович Е. В., Серманов В. Н., Острась В. Н., Волощенко О. В., Зосимов С. А., Чевагин А. Ф., Власенко В. В., Мещеряков Е. А.* Исследование проблем горения жидкого углеводородного топлива в каналах // *Модели и методы аэродинамики*, 2002. — М.: МНЦМО. С. 102.
4. *Власенко В. В.* Численное исследование нестационарного распространения горения по каналу со сверхзвуковым течением вязкого газа // *Хим. физика*, 2011. Т. 30. № 9. С. 42–54.
5. *Власенко В. В.* SOLVER3: двадцатилетний опыт развития и использования научной программы для моделирования двумерных течений с горением // *Труды ЦАГИ*, 2015. № 2735.
6. *Фролов С. М., Зангиев А. Э., Семенов И. В., Власенко В. В., Волощенко О. В., Николаев А. А., Ширяева А. А.* Моделирование течения в высокоскоростной камере сгорания в трехмерной и двумерной постановке // *Горение и взрыв*, 2015. Т. 8. № 1. С. 126–135.
7. *Басевич В. Я., Фролов С. М.* Глобальные кинетические механизмы для моделирования многостадийного самовоспламенения углеводородов в реагирующих течениях // *Хим. физика*, 2006. Т. 25. № 6. С. 54–62.
8. *Spalding D. B.* Concentration fluctuations in a round turbulent free jet // *Chem. Eng. Sci.*, 1971. Vol. 26. P. 95–107.

Поступила в редакцию 18.12.15

THE EFFECT OF TURBULENCE OF FLOW DEVELOPMENT IN SCAMJET COMBUSTOR

A. E. Zangiev^{1,2}, V. S. Ivanov¹, S. N. Medvedev¹, S. M. Frolov^{1,2}, F. S. Frolov^{1,2},
I. V. Semenov^{2,3}, and V. V. Vlasenko²

¹N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation

²Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovsky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation

³Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation

Abstract: A two-dimensional numerical simulation of flow in the scramjet combustor of TsAGI with due regard for turbulence–chemistry interaction has been performed. It is shown that the inclusion of the turbulence–chemistry interaction model into the simulation leads to a change in the dynamics of processes in the combustor channel with fuel supply pylons and a backfacing step for combustion stabilization. After ignition of the fuel–air mixture triggered by flow throttling at the end of the combustor, the arising combustion zone reaches the backfacing step and the pylons much faster than in the calculations without regard for turbulence–chemistry interaction. The reasons for such a change in the dynamics of processes have been studied. It was found that the intensity of temperature fluctuations in the preflame zone with large velocity gradients may reach 6%–7% (100–120 K) due to turbulence generation in this zone. Such temperature fluctuations have a significant impact on the mean reaction rates of fuel oxidation, thus leading to the acceleration of processes.

Keywords: scramjet combustor; combustion; turbulent temperature fluctuations; turbulence–chemistry interaction; numerical simulation

Acknowledgments

The work was supported by the O. M. Belotserkovsky Center of Computer Modeling TsAGI–RAS.

References

1. Frolov, S. M. 2016. Vliyaniye turbulentnosti na srednyuyu skorost' khimicheskikh prevrashcheniy [Effect of turbulence on the mean rate of chemical transformations]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 9(1):43–58.
2. Voloshchenko, O. V., S. A. Zosimov, and A. A. Nikolaev. 2002. Eksperimental'noe issledovanie protsessy goreniya zhidkogo uglevodorodnogo topliva v ploskom kanale pri sverkhzvukovoy skorosti potoka na vkhode [Experimental study of the combustion process of liquid hydrocarbon fuel in a planar channel at supersonic flow velocity at the channel entrance]. *Modeli i metody aerodynamiki* [Models and methods in aerodynamics]. Moscow: MNTsMO. P. 75.

3. Piotrovich, E. V., V. N. Sermanov, V. N. Ostras', O. V. Voloschenko, S. A. Zosimov, A. F. Tchevagin, V. V. Vlasenko, and E. A. Meshcheryakov. 2002. Issledovanie problem gorenija zhidkogo uglevodorodnogo topliva v kanalakh [Investigation of combustion problems of liquid hydrocarbon fuel in channels]. *Modeli i metody aerodinamiki* [Models and methods in aerodynamics]. Moscow: MNTsMO. P. 102.
4. Vlasenko, V. V. 2011. Chislennoe issledovanie nestatsionarnogo rasprostraneniya gorenija po kanalu so sverkhzvukovym techeniem vyazkogo gaza [Numerical investigation of nonstationary propagation of combustion in a channel with supersonic flow of viscous gas]. *Khim. Fiz.* 30(9):42–54.
5. Vlasenko, V. V. 2015. SOLVER3: Dvadsatiletniy opyt razvitiya i ispol'zovaniya nauchnoy programmy dlya modelirovaniya dvumernykh techeniy s goreniem [SOLVER3: Twenty-year experience of development and utilization of the code for modeling of two-dimensional flows with combustion]. *Trudy TsAGI*. No. 2735.
6. Frolov, S. M., A. E. Zangiev, I. V. Semenov, V. V. Vlasenko, O. V. Voloschenko, A. A. Nikolaev, and A. A. Shiryayeva. 2015. Modelirovanie techeniya v vysokoskorostnoy kamere sgoraniya v trekhmernoy i dvumernoy postanovke [Modeling of the flow in high-speed combustor in 3D and 2D statement]. *Goren. Vzryv (Mosk.) — Combustion and Explosion* 8(1):126–135.
7. Basevich, V. Ya., and S. M. Frolov. 2006. Global'nye kineticheskie mekhanizmy dlya modelirovaniya mnogostadiynogo samovosplamneniya uglevodorodov v reagiruyushchikh techeniyakh [Overall kinetic mechanisms for modeling multistage self-ignition of hydrocarbons in reactive flows]. *Khim. Fiz.* 25(6):54–62.
8. Spalding, D. B. 1971. Concentration fluctuations in a round turbulent free jet. *Chem. Eng. Sci.* 26:95–107.

Received December 18, 2015

Contributors

Zangiev Alan E. (b. 1989) — research engineer, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; sydra777@gmail.com

Ivanov Vladislav S. (b. 1986) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; ivanov.vls@gmail.com

Medvedev Sergey N. (b. 1985) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; medvedevs@chph.ras.ru

Frolov Sergey M. (b. 1959) — Doctor of Science in physics and mathematics, head of department, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; Central Aerohydrodynamic Institute

named after Prof. N. E. Zhukovky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; smfrol@chph.ras.ru

Frolov Fedor S. (b. 1981) — Candidate of Science in physics and mathematics, senior research scientist, N. N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, 4 Kosygin Str., Moscow 119991, Russian Federation; Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; f.frolov@chph.ru

Semenov Ilya V. (b. 1973) — Candidate of Science in physics and mathematics, leading research scientist, Institute for Computer Aided Design, Russian Academy of Sciences, 19/18 Brestskaya 2nd Str., Moscow 123056, Russian Federation; Central Aerohydrodynamic Institute named after Prof. N. E. Zhukovky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; semenov@icad.org.ru

Vlasenko Vladimir V. (b. 1969) — Candidate of Science in physics and mathematics, head of sector, Central Aerohydrodynamic Institute named after N. E. Zhukovky (TsAGI), 1 Zhukovsky Str., Zhukovsky, Moscow Region 140180, Russian Federation; vlasenko.vv@yandex.ru