

## Численное исследование влияния коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентного числа Прандтля на результаты моделирования внутрикамерных процессов в тепловых двигателях

**В.П. ЖУКОВ**,  
канд. техн. наук  
(Институт космических двигателей (Германский центр авиации и космонавтики), Хартхаузен, Германия),  
**И.Н. БОРОВИК**,  
канд. техн. наук,  
**Е.А. СТРОКАЧ**,  
канд. техн. наук  
(МАИ, Москва)  
borovikin@mai.ru

*Рассмотрены результаты численного исследования влияния параметров  $k$ - $\epsilon$ -RNG-модели турбулентности на результаты моделирования рабочих процессов в камере сгорания теплового двигателя на газообразном кислороде и метане с учетом сопряженного теплообмена со стенкой. Показано существенное влияние выбора эмпирических коэффициентов в модели турбулентности на результат моделирования химически реагирующего течения. Приведены рекомендации по величине коэффициентов турбулентной диффузии и турбулентного числа Прандтля.*

**Камера сгорания, турбулентное горение, кислород, метан, турбулентное число Прандтля, сопряженный теплообмен, численное моделирование**

Методология моделирования турбулентного горения в условиях, характерных для камер сгорания (КС) тепловых двигателей и энергоустановок все еще находится в стадии разработки. В математических моделях, используемых для расчета турбулентных течений, присутствует широкий перечень эмпирических коэффициентов, которые откалиброваны по результатам простых течений – предмета широкого круга задач машиностроения. Применимость использования данных моделей для течений, осложненных химическими реакциями, неочевидна. В данной статье проведено исследование влияния коэффициентов турбулентной диффузии на результаты моделирования горения метана и кислорода с учетом сопряженного теплообмена со стенкой. Результаты моделирования показывают, что коэффициенты турбулентной диффузии влияют на давление в КС и температуру стенки. Коэффициенты турбулентной диффузии, воздействуя на процессы турбулентного переноса энергии, импульса и массовой доли, изменяют качество смешения горючего, окислителя и продуктов сгорания и тем самым оказывают влияние на процессы горения и теплообмена.

Современные методы численного моделирования позволяют прогнозировать значения характеристик отдельных узлов и всей двигательной установки от проектирования до изготовления. К настоящему времени было проведено множество исследований по численному моделированию процессов в КС тепловых двигателей. Эти исследования в основном охватывают частные случаи турбулентного горения, составляющие общую методологическую основу.

Особенности моделирования рабочего процесса в основном связаны с использованием тех или иных моделей частных физических процессов, таких, как турбулентность, смешение, теплообмен, горение компонентов топлива. В КС тепловых двигателей и энергоустановок процесс сгорания топлива определяется полнотой смешения компонентов, поэтому изучаются модели турбулентности, их параметры [1–3]. Особое внимание уделяется вопросам применения различных моделей горения, основанных на разных подходах к моделированию – бесконечно высокой скорости реакций, модели с конечными скоростями реакций, модели на основе функции плотности вероятности и модели тонкого фронта пламени (Flamelet) [4–8]. Также требуется определение степени влияния теплового излучения и необходимость его учета в каждом конкретном случае из-за сложностей расчета [9].

В работе [10] рассматривают процессы в горелке с пропаном и воздухом. Изучается влияние моделей EDM, PDF, Flamelet, используется модель турбулентности RSM. Дополнительно проводится исследование зависимости поля течения, распределения температур стенок от турбулентных чисел Прандтля и Шмидта. Эти параметры изменяются в диапазоне 0,25...0,85. Результаты показали незначительное влияние этих параметров на поле скоростей. Напротив, их изменение сильно воздействует на температуру, в частности, на температуру ниже по потоку в КС, что характерно и для профиля температуры вдоль стенок КС. Для изучаемой конфигурации и условий эксперимента оптимальное значение этих параметров равно 0,5 при расчете температур с помощью всех трех моделей сгорания.

Несмотря на основную цель – получение рекомендаций по моделированию эмиссии вредных веществ в КС газотурбинных установок, в работе [11] даются важные рекомендации по выбору моделей некоторых процессов. По результатам можно отметить следующее: структура закрученного турбулентного потока наиболее точно отображается  $k$ - $\epsilon$ -RNG- и  $k$ - $\omega$ -RSM-моделями; для получения верного уровня температур предлагается пользоваться моделями горения Flamefront и Flamelet. С учетом того что результаты моделирования имеют достаточную сходимость с результатами тестов, можно считать рекомендацией задаваемое значение турбулентного числа Шмидта – 0,2.

В работе [12] рассматривается вопрос моделирования течения продуктов сгорания – кислорода и метана. Используется значение турбулентного числа Прандтля 0,9, молекулярно-кинетического числа Прандтля 0,7. Турбулентное число Шмидта задается равным 0,7 в соответствии с работой [12], где показывается, что этот параметр должен принимать такое значение при параллельном слое смешения.

В работе [13] рассматриваются различные модели турбулентности, значения турбулентных чисел Прандтля и Шмидта. При моделировании с использованием  $k$ - $\epsilon$ -модели наблюдается большее влияние сужающейся части КС на тепловыделение и смешение по сравнению с результатами на основе  $k$ - $\omega$ -SST-модели. Кроме того,  $k$ - $\omega$ -SST-модель дает слабую интенсивность общего смешивания и тепловыделения, что приводит к снижению давления в КС. Обнаружено, что эти тенденции и явления происходят из-за формы полей турбулентной вязкости. Области высокой турбулентной вязкости существуют в сужающейся части КС для  $k$ - $\epsilon$ -моделей. При использовании  $k$ - $\omega$ -SST-модели эти области слабее или даже не существуют.

В работе [14] исследуется рабочий процесс в двигателе с метаном и кислородом. Давление в модельной КС – 2 МПа. Рассматривается зависимость рабочего процесса как от моделей турбулентности ( $q$ - $\omega$ ,  $k$ - $\omega$ -SST), так и от турбулентных чисел Шмидта и Прандтля. Однако влияние моделей турбулентности изучается только на примере 2D-постановки задачи. В рамках этого исследования выбрать более подходящую модель турбулентности не удалось. С увеличением турбулентного числа Прандтля тепловой поток в стенку уменьшается. Для возрастающего турбулентного числа Шмидта тепловой поток в стенку увеличивается немного в первой трети КС и уменьшается в остальной части. Изменение турбулентного числа Шмидта изменяет форму кривой распределения теплового потока, а влияние турбулентного числа Прандтля состоит в определении коэффициента пропорциональности. Давление в КС также существенно зависит от турбулентных чисел Прандтля и Шмидта.

Ранее выполненные работы по моделированию горения позволяют сделать следующие выводы.

1. Удовлетворительные результаты по распределению теплового потока в стенку КС можно получить, только применяя сетку с высоким пространственным разрешением вблизи стенки КС.
2. Рекомендуемая модель теплообмена излучением – P1. Остальные модели либо дают неточные результаты, либо в значительной степени ресурсоемки.
3. Практически все примеры моделирования процессов в КС реализованы без учета сопряженного теплообмена. Это связано с тем, что эксперименты по верификации моделирования осуществляются одним и тем же способом. КС имеет охлаждаемую стенку, разделенную на участки, в которых производится замер теплового потока по изменению параметров потока охладителя – воды [6–8]. Экспериментального исследования и численного моделирования КС без внешнего охлаждения в сопряженной постановке, тем более с внутренним завесным охлаждением, в открытой печати нет.
4. Корректное численное моделирование рабочих процессов в КС тепловых двигателей и энергоустановок должно проводиться с учетом неидеальности смешения продуктов сгорания топлива и с учетом зависимости свойств и коэффициентов переноса от температуры, давления и локального состава смеси.
5. Значения турбулентных чисел Прандтля и Шмидта, необходимые для моделирования, требуется находить эмпирически, сравнивая давление и температуру (или тепловой поток) с измеренными в ядре потока или на стенке в схожих по параметрам экспериментах.
6. Исследований, связанных с влиянием модельных коэффициентов в диффузионном члене моделей турбулентности, проведено не было.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что существует необходимость в проведении исследования влияния выбора значений модельных коэффициентов в диффузионном члене в моделях турбулентности и турбулентного числа Прандтля в уравнении энергии на результаты моделирования рабочих

процессов в КС. Особенно важно это при моделировании работы КС в сопряженной постановке в условиях, когда стенка КС не имеет внутренних каналов принудительного охлаждения и находится в тепловом балансе между входящим и выходящим тепловыми потоками. Решение задачи исследования влияния коэффициентов в модели турбулентности на результат моделирования внутрикамерного процесса в сопряженной постановке и проведено в данной статье.

Для численного исследования был выбран экспериментальный ракетный двигатель ДМТ-МАИ-200М на компонентах топлива – газообразных метане и кислороде [15].

На рис. 1, *а* представлена экспериментальная КС, на рис. 1, *б* – ее основные геометрические размеры.

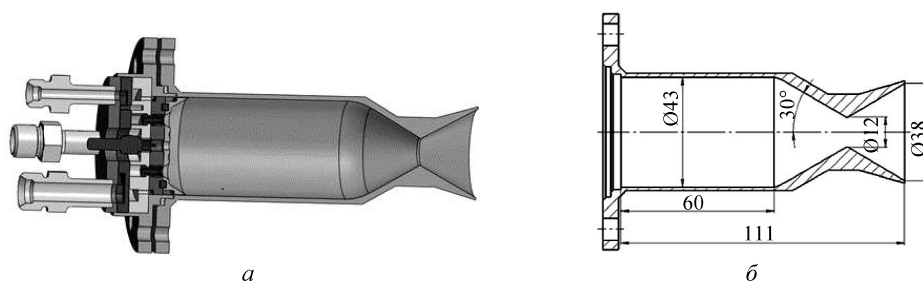


Рис. 1

Особенностью (см. рис. 1) данного двигателя является то, что в конструкции его смесительной головки предусмотрен отдельный подвод компонента для завесного охлаждения стенок КС.

Экспериментальное исследование характеристик рабочего процесса в двигателе произведено на огневом атмосферном стенде кафедры «Ракетные двигатели» МАИ (Москва). Достаточно подробное описание данного экспериментального стенда представлено в работе [16].

По результатам экспериментов [15], максимальное время работы двигателя с составило 16 с (эксперимент № 24). В ходе эксперимента расход газообразного метана был равен 3,07 г/с, расход газообразного кислорода – 61,7 г/с, давление в КС – на уровне  $6,4 \cdot 10^5$  Па, тяга двигателя – 84 Н. Максимальная температура стенки с внешней стороны КС, по данным термопары, составила 1286 К, что приближается к максимальной рабочей температуре материала стенок.

Расчетная область представляет собой одну шестую часть внутренней области КС исследуемого двигателя, стенки и воздушной области вокруг стенки. Такое приближение использовалось с целью экономии вычислительных и временных ресурсов. Расчетная сетка, по результатам оценки сеточной сходимости имеющая 305000 гексаэдральных ячеек, представлена на рис. 2. Здесь: 1 – массовый расход форсунки (метан); 2 – массовый расход завесного охлаждения (кислород); 3 – циклические граничные условия; 4 – выходное граничное условие типа «Opening» с заданием давления окружающей среды; 5 – стенка КС; 6 – окружающая среда.

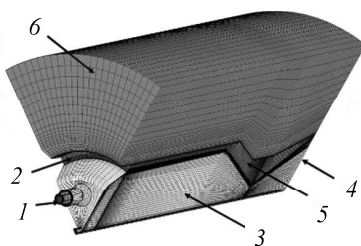


Рис. 2

В расчетном исследовании газообразные компоненты (метан и кислород) топлива аппроксимировались идеальными газами. В данной работе в качестве модели горения для всех частных исследований процессов в КС использовалась модель горения тонкого фронта пламени Flamelet. Материал стенки КС – нержавеющая сталь. Сопряжение доменов внешней атмосферы, стенки и проточной части КС задавалось с помощью стандартных интерфейсов «твердое тело – жидкость».

В общем виде модель турбулентности определяет, каким образом будут смешиваться горючее и окислитель, продукты сгорания и как они будут взаимодействовать со стенкой КС. Следовательно, для

моделирования рабочего процесса в КС, возможно, потребуется специальная настройка параметров модели турбулентности для условий реагирующего течения. Как показал обзор литературных источников, существующие исследования влияния параметров модели турбулентности в основном сосредоточены на значениях общих коэффициентов в моделях турбулентности или коэффициентов турбулентного переноса скаляров, таких, как турбулентные числа Шмидта и Прандтля [10, 14, 17–19]. В имеющейся в открытом доступе литературе, по-видимому, нет никаких специальных исследований влияния коэффициентов турбулентной диффузии в уравнениях модели турбулентности на результаты численного моделирования реагирующих течений.

В данной работе было изучено влияние турбулентного числа Прандтля и коэффициентов турбулентной диффузии в  $k$ - $\varepsilon$ -RNG-модели турбулентности на результаты моделирования течения и горения газообразных кислорода и метана.

Турбулентное число Прандтля используется в записи члена, ответственного за турбулентную диффузию в уравнении переноса энергии

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{e})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{U}_j e) = -\frac{\partial}{\partial x_j}(\tilde{U}_j \bar{p}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{\mu C_p}{Pr} + \frac{\mu_t C_p}{Pr_t} \right) \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} - \sum_i h_i J_i + (\tilde{\tau}_{\text{eff}} \tilde{U}_j) \right], \quad (1)$$

где  $\bar{\rho}$  – плотность;  $\tilde{e}$  – энергия;  $\tilde{U}$  – скорость;  $\mu$  – молекулярная (динамическая) вязкость;  $C_p$  – удельная теплоемкость;  $\mu_t$  – турбулентная вязкость;  $Pr$  – молекулярное число Прандтля;  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля;  $\tilde{T}$  – температура;  $h_i$  – массовая доля компонента смеси;  $J_i$  – диффузионный поток компонента смеси.

Теплообмен излучением моделировался с помощью P1-модели с использованием модели «серого» газа с изотропным спектром абсорбции и рассеяния. Данная модель применяется ввиду относительной точности и малой вычислительной ресурсоемкости.

В осредненных по Фавру уравнениях переноса исследуемые коэффициенты турбулентной диффузии используются в следующих уравнениях  $k$ - $\varepsilon$ -RNG-модели турбулентности:

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{k})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{U}_j \tilde{k}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k\varepsilon1}} \right) \frac{\partial \tilde{k}}{\partial x_j} \right] + \bar{P}_k - \bar{\rho}\varepsilon + \bar{S}_k; \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\bar{\rho}\tilde{\varepsilon})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{U}_j \tilde{\varepsilon}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k\varepsilon2}} \right) \frac{\partial \tilde{\varepsilon}}{\partial x_j} \right] + \frac{\bar{\varepsilon}}{k} (\bar{C}_{\varepsilon1} \bar{P}_k - \bar{C}_{\varepsilon2} \bar{\rho}\varepsilon) + \bar{S}_\varepsilon, \quad (3)$$

где  $C_{\varepsilon1}$ ,  $C_{\varepsilon2}$ ,  $\sigma_{k\varepsilon1}$ ,  $\sigma_{k\varepsilon2}$  – модельные константы;  $\bar{P}_k$  – член, отвечающий за генерацию турбулентной кинетической энергии;  $\bar{S}_\varepsilon$ ,  $\bar{S}_k$  – члены, отвечающие за дополнительные источники.

Для того чтобы сделать влияние коэффициентов турбулентной диффузии единообразным, предполагалось, что  $\sigma_{k\varepsilon2} = \sigma_{k\varepsilon1} = \sigma$ . Эти параметры варьировались таким образом для того, чтобы увидеть их влияние на процессы в КС двигателя. Все остальные коэффициенты были взяты по умолчанию из описания моделей турбулентности, приведенного в руководстве к программе ANSYS CFX.

Всего было промоделировано 42 случая варьирования модельных коэффициентов, шесть вариантов коэффициентов турбулентной диффузии в диапазоне 0,25...1 и семь вариантов турбулентных чисел Прандтля в пределах 0,1...1 (таблица).

Параметры модели турбулентности	Значение по умолчанию	Расчет						
		1	2	3	4	5	6	7
$\sigma_{k\varepsilon1}, \sigma_{k\varepsilon2}$	0,7179	-	0,25	0,4	0,55	0,7	0,85	1
$Pr_t$	0,9	0,1						

Приведем зависимости давления в КС  $p_k$  (рис. 3, а) и максимальной температуры на стенке КС  $T_k$  (рис. 3, б) при варьировании коэффициентов турбулентной диффузии.

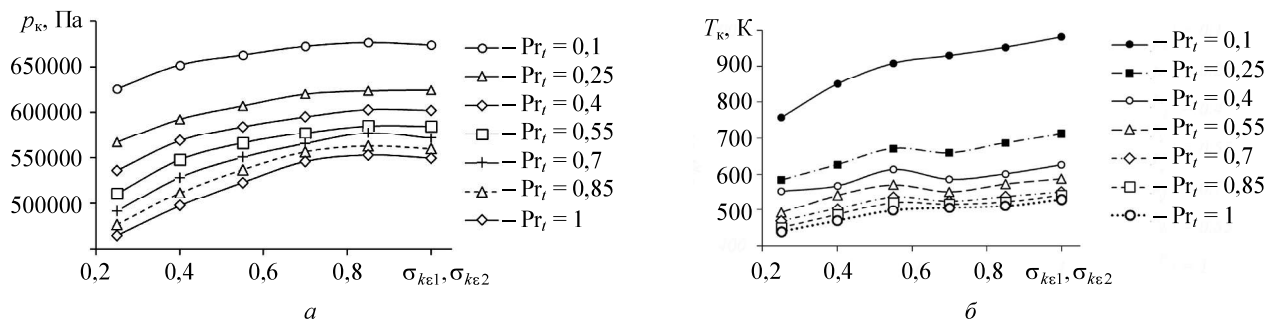


Рис. 3

Приведем распределение массовой доли метана  $\omega_{\text{CH}_4}$  (рис. 4), массовой доли диоксида углерода  $\omega_{\text{CO}_2}$  (рис. 5) и температуры  $T_k$  (рис. 6) по сечению КС, полученное в результате численного моделирования горения метана и кислорода с использованием  $Pr_t = 1$ ,  $\sigma_{ke1}, \sigma_{ke2} = 0,25$  (рис. 4–6, *a*) и  $Pr_t = 0,1$ ,  $\sigma_{ke1}, \sigma_{ke2} = 0,85$  (рис. 4–6, *б*).

Как видим (см. рис. 4–6), при уменьшении величины коэффициентов турбулентной диффузии большое количество метана не реагирует вблизи форсунки, а сгорает дальше по потоку в сужающейся части КС. Это объясняется тем, что уменьшение коэффициентов турбулентной диффузии снижает турбулентный перенос массовых долей веществ смеси газов, уменьшает степень их перемешивания, что в результате приводит к уменьшению полноты сгорания и, как следствие, уменьшению температуры стенки и давления в КС.

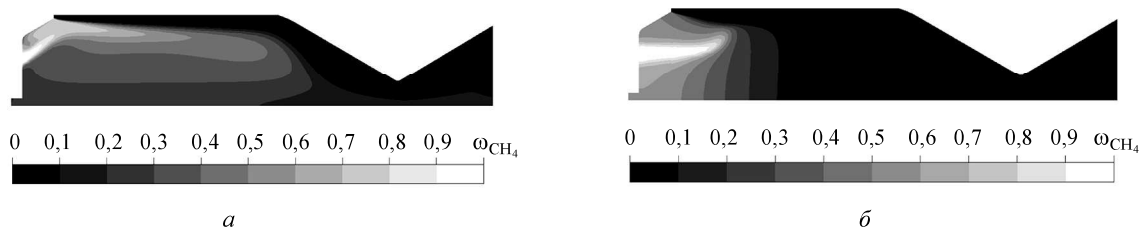


Рис. 4

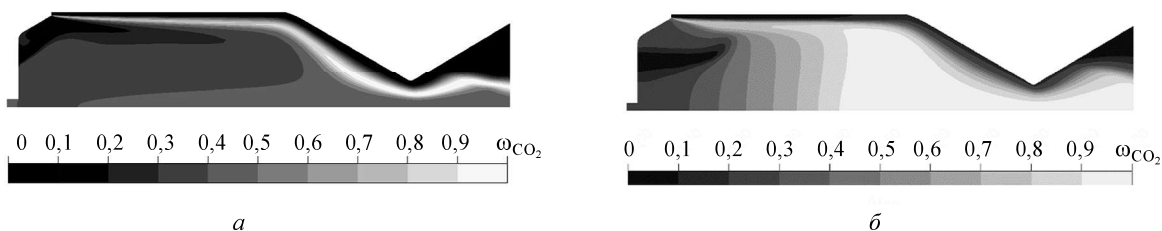


Рис. 5

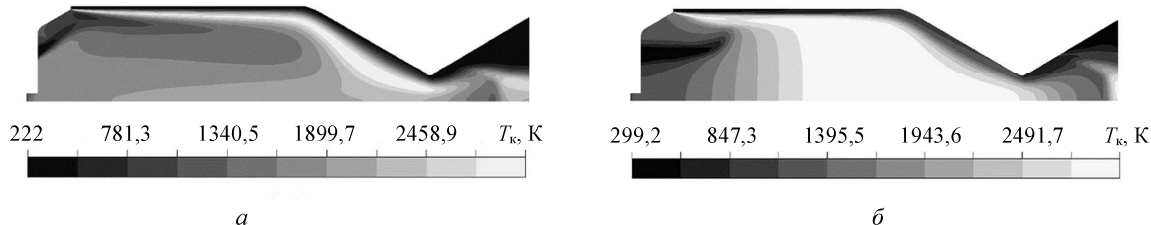


Рис. 6

Противоположная ситуация наблюдается при варьировании турбулентного числа Прандтля. Вследствие уменьшения турбулентного числа Прандтля повышается температура и давление в КС, что приводит к повышению максимальной температуры стенки. Уменьшение турбулентного числа Прандтля ведет к увеличению членов, ответственных за турбулентный теплоперенос в уравнении (1). В связи с

этим перемешивание горючего и окислителя в области форсунки, а также холодного пристеночного слоя и горячих продуктов сгорания из ядра потока становится более интенсивным.

При сравнении результатов исследования и экспериментальных данных по давлению выявлено, что для  $k$ - $\epsilon$ -RNG-модели могут быть рекомендованы значения коэффициентов турбулентной диффузии в диапазоне 0,85...1, а значение турбулентного числа Прандтля – 0,1. Несмотря на отсутствие подтверждения этих результатов расчетами на других объектах, данные значения дают хорошую сходимость с экспериментом по давлению в КС, но не приближают результаты численного моделирования к экспериментальным данным по значению максимальной температуры стенки. Такое расхождение указывает на то, что подход с использованием пристеночной функции при моделировании пристеночного течения в турбулентных реагирующих потоках нецелесообразно применять без корректировки коэффициентов моделей турбулентности или применения специальной пристеночной функции.

Таким образом, анализ статей, касающихся численного моделирования процессов горения, показал, что большое внимание уделяется уточнению турбулентного числа Прандтля в уравнении энергии и турбулентного числа Шмидта. Исследований, связанных с влиянием на результаты моделирования внутрикамерных процессов в тепловых двигателях коэффициентов в  $k$ - $\epsilon$ -RNG-модели турбулентности или в какой-либо, еще проведено не было.

Проведенное численное исследование показывает, что турбулентное число Прандтля и коэффициенты турбулентной диффузии в  $k$ - $\epsilon$ -RNG-модели турбулентности существенно влияют на результат численного моделирования рабочего процесса в КС, работающей на газообразных метане и кислороде.

В отличие от рекомендованного значения коэффициентов турбулентной диффузии для  $k$ - $\epsilon$ -RNG-модели, для других моделей турбулентности, моделей горения и геометрий расчетной области, возможно, потребуется дополнительная настройка этих коэффициентов для корректного моделирования процессов горения в КС.

Проведенный численный эксперимент показывает, что совместная настройка параметров модели турбулентности может существенно улучшить точность результатов моделирования процесса горения и обеспечить относительно точное моделирование сопряженного теплообмена даже на грубых сетках.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема № FSFF-2020-0014.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молчанов А.М., Мякочин А.С. Расчет течения в камере сгорания гиперзвукового прямооточного воздушно-реактивного двигателя с учетом неравновесных химических реакций // Изв. вузов. Авиационная техника. 2017. № 4. P. 112–119.
2. Kraev V., Myakochin A. The Unsteady Turbulent Flows Structure Study Present Status // INCAS Bulletin. 2019. Vol. 11. Iss. 2. P. 111–124.
3. Molchanov A.M., Yanyshchev D.S., Bykov L.V. Influence of Turbulent Fluctuations on Non-Equilibrium Chemical Reactions in the flow // Journal of Physics: IOP Conference Series [Electronical Resource]. 2017. Vol. 891. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/891/1/012106/pdf> (дата обращения: 1.08.2020).
4. Мосолов С.В. и др. Расчетное исследование особенностей рабочего процесса в камерах сгорания ЖРД, работающих на топливе кислород + углеводороды // Тр. МАИ [Электронный журнал]. 2012. № 58. URL: <http://www.trudymai.ru/published.php?ID=33406> (дата обращения: 1.08.2020).
5. Рубинский В.П. и др. Математическое моделирование и экспериментальные исследования горения кислородно-метанового топлива при соосно-струйной подаче в камеру сгорания ЖРД // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 1. С. 54–57.
6. Zhukov V.P. Computational Fluid Dynamics Simulations of a GO<sub>2</sub>/GH<sub>2</sub> Single Element Combustor // Journal of Propulsion and Power. 2015. Vol. 31. Iss. 6. P. 1707–1714.
7. Zhukov V.P., Suslov D.I. Measurements and Modelling of Wall Heat Fluxes in Rocket Combustion Chamber with Porous Injector Head // Aerospace Science and Technology. 2016. Vol. 48. P. 67–74.
8. Perakis N. et al. Qualitative and Quantitative Comparison of RANS Simulation Results for a 7 Element GOX/GCH<sub>4</sub> Rocket Combustor // Proc. of the Joint Propulsion Conference, July 9–11, 2018, Cincinnati, USA. AIAA 2018-4556.
9. Молчанов А.М., Быков Л.В., Янышев Д.С. Расчет теплового излучения колебательно-неравновесного потока газа методом  $k$ -распределения // Теплофизика и аэромеханика. 2017. № 3. С. 411–432.

10. Jiang Lei-Yong, Campbell I. Prandtl/Schmidt Number Effect on Temperature Distribution in a Generic Combustor // International Journal of Thermal Sciences. 2009. Vol. 48. Iss. 2. P. 322–330.
11. Куценко Ю.Г. Методология проектирования малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей на основе математических моделей физико-химических процессов: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 2010. 33 с.
12. Betti B. Flow Field and Heat Transfer Analysis of Oxygen/Methane Liquid Rocket Engine Thrust Chambers. Rome: University of Rome «La Sapienza», 2012. 139 p.
13. Chemnitz A.T. et al. Numerical Modeling of Flow and Combustion in a Single-Element GCH<sub>4</sub>/GOX Rocket Combustor: Aspects of Turbulence Modeling // Proc. of the 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, July 25–27, 2016, Salt Lake City, USA. AIAA 2016-4998.
14. Keller R., Gerlinger P.M. Numerical Simulations of a Single Injector Gaseous Methane Rocket Combustion Chamber // Proc. of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting, Jan. 4–8, 2016, San Diego, USA. AIAA 2016-2148.
15. Чудина Ю.С., Боровик И.Н., Козлов А.А. Конструкция и огневые испытания кислородно-метанового двигателя тягой 200 Н // Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 26–38.
16. Воробьев А.Г. и др. Модернизация испытательного огневого стенда для исследования рабочих процессов в жидкостных ракетных двигателях малых тяг на экологически чистых компонентах топлива // Вестник МАИ [Электронный журнал]. 2010. № 17 (1). URL: <http://vestnikmai.ru/publications.php?ID=13362> (дата обращения: 6.08.2020).
17. Longo R. et al. A New Turbulent Schmidt Number Formulation Based on the Local Turbulence Level // Proc. of the 12th International ERCOFTAC Symposium on Engineering Turbulence Modelling and Measurements, Sept. 26–28, 2018, Montpellier, France. 5 p.
18. Ehrhard J., Moussiopoulos N. On a New Nonlinear Turbulence Model for Simulating Flows around Building Shaped Structures // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2000. Vol. 88. Iss. 1. P. 91–99.
19. Poschner M., Pfitzner M. Real Gas CFD Simulation of Supercritical H<sub>2</sub>-LOX in the MASCOTTE Single Injector Combustor Using a Commercial CFD Code // Proc. of the 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Jan. 7–10, 2008, Reno, US. AIAA 2008-952.

Поступила в редакцию 6.08.20

После доработки 3.10.20

Принята к публикации 7.10.20

## Numerical Study of the Influence of Turbulent Diffusion Coefficients and Turbulent Prandtl Number on the Reactive Flow Simulation in a Combustor

V.P. ZHUKOV<sup>1</sup>, I.N. BOROVIK<sup>2</sup>, AND E.A. STROKACH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Space Propulsion, German Aerospace Center (DLR), Hardthausen, Germany

<sup>2</sup> Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow

*The influence of the  $k$ - $\epsilon$ -RNG model parameters is studied in terms of simulation of processes in the combustor with the gas oxygen and methane inside including the conjugate heat transfer with the wall. A sufficient influence of the empirical diffusion coefficients of turbulence model on the reactive flow simulation is observed. Recommendations for the choice of the turbulent diffusion coefficients and the turbulent Prandtl number are provided.*

**Combustion chamber, turbulent combustion, oxygen, methane, turbulent Prandtl number, conjugate heat transfer, numerical simulation**