

## Численное моделирование горения в камере модельного ракетного двигателя малой тяги на газообразных компонентах кислород – метан

© К.В. Федотова, К.Е. Ковалёв, О.А. Ворожеева

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Численно исследован рабочий процесс в модельном ракетном двигателе малой тяги на газообразных компонентах кислород — метан, основанный на результатах предварительного расчетного анализа эффективности системы подачи компонентов. Проведено численное моделирование горения предварительно не подготовленной кислород-метановой смеси с применением подходов быстрой химии, а именно моделей диссипации вихря (EDM), химического равновесия и тонкого фронта пламени (flamelet). Для описания протекающих при горении химических процессов использован квазиглобальный двухстадийный механизм Вестбрука и Драйера, редуцированный кинетический механизм Джонса — Линдштедта с поправками Фрасольдати и механизм GRI Mech 3.0. Проведены расчеты в двухмерной и трехмерной постановках диффузионного горения газообразного кислорода и метана. Представлены результаты параметрического исследования при коэффициентах избытка окислителя  $\alpha$ , равного 0,7; 1,0; 1,2 полей концентраций и температуры соответственно. Показано, что применение математической модели на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, замкнутых моделью турбулентности типа  $k-\omega$  SST, дополненной моделью flamelet на основе механизма GRI Mech 3.0 с учетом теплообмена излучением, позволяет получить удовлетворительную сходимость с результатами экспериментального исследования и проводить качественную оценку рабочего процесса в двигателях данного типа.*

**Ключевые слова:** *диффузионное горение, предварительно не подготовленная смесь, метан, кислород, газообразные компоненты, модель тонкого фронта пламени, ракетный двигатель малой тяги*

**Введение.** Принятое в настоящее время требование по унификации компонентов топлива для всех двигательных установок (ДУ) ракеты-носителя, включая вспомогательные ракетные двигатели малой тяги (РДМТ), приводит к необходимости разработать альтернативные схемы организации рабочего процесса в камерах сгорания (КС) на газообразной топливной паре кислород — метан [1]. Для того чтобы проанализировать влияние значительного количества параметров на надежность и эффективность РДМТ на компонентах кислород — метан, целесообразно использовать методы численного моделирования, сокращающие затраты на экспериментальное исследование [2].

Применение в РДМТ топливной композиции на основе метана обуславливает необходимость проведения теоретического исследования

характеристик рабочего процесса в зависимости от способа подачи компонентов и основных режимных параметров, в частности, коэффициента избытка воздуха. Для того чтобы реализовать максимальные преимущества топливной пары кислород — метан, должны быть известны особенности влияния вышеприведенных факторов на качество рабочего процесса, выраженное, например, коэффициентом расходного комплекса.

В камере сгорания РДМТ на газообразных компонентах время их смешения значительно превышает время протекания химических реакций. Это свидетельствует о преимущественно диффузионном механизме горения, для которого можно применять модели быстрой, а также конечно-скоростной химии [3], основанные на базе детальных кинетических механизмов. Это затруднительно для КС РДМТ из-за сравнительно высоких требований к качеству и детализации расчетной сетки, существенно увеличивающих затрачиваемые вычислительные ресурсы [4]. Альтернативные модели быстрой химии, в частности, модели диссипации вихря (EDM — Eddy Dissipation Model), химического равновесия и тонкого фронта пламени (flamelet), позволяют проводить качественный и количественный анализ характеристик горения [5].

В литературе широко представлены подходы к моделированию горения в предварительно не подготовленных смесях метана с воздухом [6–10]. Однако смесь метана с кислородом имеет существенно более высокую температуру адиабатного пламени, в связи с чем требуется учитывать диссоциацию и разрабатывать новые подходы к моделированию.

Цель данной работы — разработка теоретических основ и практических рекомендаций по выбору наиболее оптимального подхода к численному моделированию горения в КС модельного РДМТ на газообразных компонентах кислород — метан.

**Выбор модели горения.** Предварительный этап формирования математической модели внутрикамерных процессов в РДМТ на газообразных компонентах кислород — метан заключается в выборе подхода к описанию процесса горения.

В работе рассматриваются модели быстрой химии в осесимметричном канале с отдельной подачей компонентов. В модели диссипации вихря EDM, предложенной Сполдингом [11] и скорректированной затем Магнуссеном и Хьёртагером [12], процесс горения лимитируется турбулентной диффузией, химические реакции описываются квази-глобальными механизмами (одна-три реакции), а их скорость определяется масштабом времени смешения крупных вихрей. Следует отметить, что данный подход наименее требователен к вычислительным ресурсам, однако он не позволяет учесть имеющую место в КС РДМТ диссоциацию продуктов сгорания. Для учета реакций диссоциации и рекомбинации можно использовать модель локального термо-

динамического равновесия рабочего тела [13], в которой состав продуктов сгорания представляется как функция состояния.

Модель тонкого фронта пламени (flamelet), разработанная Питерсом [14], представляет процесс горения как совокупность растянутых ламинарных диффузионных микропламен — флеймлетов, деформированных турбулентным потоком, т. е. реализуется разделение вычислений газодинамических характеристик турбулентного течения и химических реакций. Температура и состав смеси определяются по заранее составленным библиотекам взаимодействия компонентов. Эта модель позволяет частично учесть градиенты концентраций компонентов и температуры поперек фронта пламени, диффузию теплоты, а также время достижения химического равновесия. Взаимодействие неравновесной химии и турбулентности описывается статистически (с использованием функции плотности вероятности) через переменную смещения и мгновенную скорость скалярной диссипации, которые статистически независимы.

Расчетные область и сетка, использованные для численного моделирования с целью выбора оптимального подхода к расчету горения диффузионного пламени кислорода с метаном, представлены на рис. 1. Размер расчетной сетки определен в результате серии предварительных расчетов из условий обеспечения сеточной сходимости по максимальной температуре пламени, он составляет приблизительно  $75 \cdot 10^3$  ячеек.

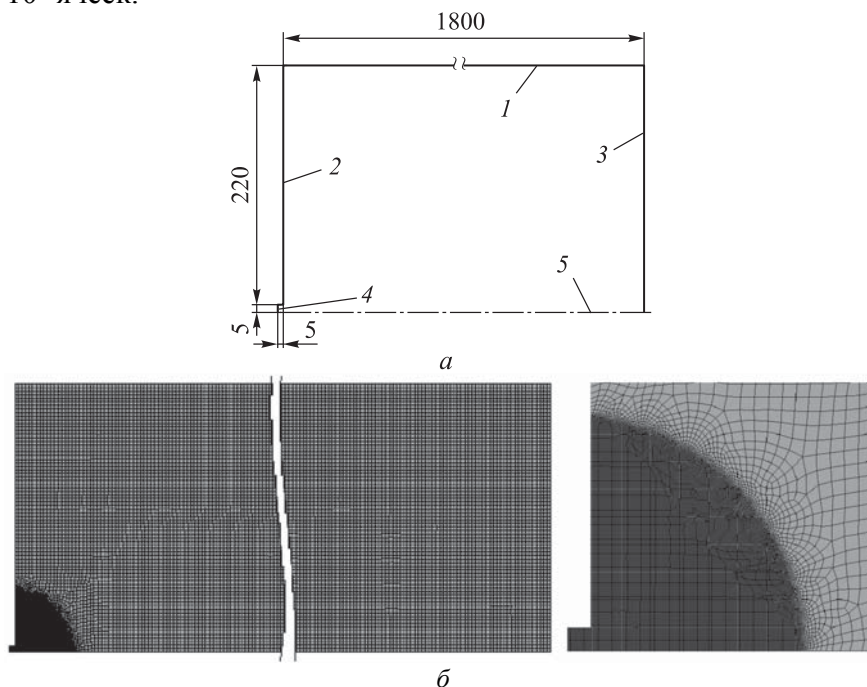


Рис. 1. Расчетные область (а) и сетка (б) для предварительного численного моделирования горения кислород-метановой смеси

Оценка качества расчетной сетки также выполнена по параметру перекошенности ячеек (skewness), максимальное значение которого составило 0,344, и по ортогональности (orthogonal quality), минимальное значение которой равно 0,757. Указанные значения параметров качества сетки демонстрируют значения, удовлетворительные для проводимого численного анализа.

Численное моделирование газовой динамики и тепломассообмена при течении двух заранее не подготовленных газовых потоков с последующими химическими реакциями основано на решении системы стационарных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнений переноса компонентов потока в двумерной осесимметричной постановке. Система уравнений в векторной форме имеет вид

$$\begin{cases} \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0; \\ \rho \vec{u} \nabla \vec{u} = -\nabla p + \Delta \tau; \\ \rho C_p \vec{u} \nabla T = \nabla (\lambda \nabla T) + \vec{u} \nabla p + \tau : \nabla \vec{u} - \sum_{k=1}^N h_k \omega_k; \\ \rho \vec{u} \nabla Y_k = \nabla (-\rho \vec{V}_k Y_k) + \omega_k, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность смеси;  $u$  — скорость;  $p$  — давление;  $\Delta \tau$  — тензор вязких напряжений;  $C_p$  — удельная теплоемкость смеси;  $T$  — температура;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $h_k$  — энтальпия  $k$ -го компонента;  $\omega_k$  — скорость образования  $k$ -го компонента;  $k$  — порядковый номер компонента смеси;  $Y_k$  — массовая доля  $k$ -го компонента смеси;  $V_k$  — скорость диффузии  $k$ -го компонента.

После осреднения произвольных параметров потока (температура, скорость и т. д.) система (1) оказывается незамкнутой. Для ее замыкания применяются уравнение состояния идеального газа и модель турбулентности типа  $k - \omega$  SST.

Удельная теплоемкость смеси определяется по формуле

$$C_p = \sum_{k=1}^N Y_k C_{p,k}, \quad (2)$$

где  $C_{p,k}$  — теплоемкость  $k$ -го компонента газовой смеси, которая задается аппроксимирующим многочленом на основе базы термодинамических параметров.

Коэффициенты молекулярного переноса количества движения, энергии и массы определяются по кинетической теории в приближении идеального газа.

При моделировании процесса диффузионного горения, когда кислород и метан подаются в расчетную область отдельно, а скорости химических реакций зависят от процесса смешения компонентов, важной задачей является определение характеристик взаимодействия между полем течения и протекающими химическими превращениями. С одной стороны, наличие турбулентности приводит к изменению структуры пламени за счет флуктуаций поля температур и интенсификации смешения, с другой — пламя влияет на турбулентность вследствие изменения вязкости и скорости потока.

Для описания квазистационарного режима горения используется модель тонкого фронта пламени. В этом случае скорость химических реакций значительно превышает скорость диффузии компонент газовой смеси. Модель тонкого фронта пламени основана на том, что, согласно модели Бурке — Шумана, при числах Дамкелера  $Da \rightarrow \infty$  горение происходит в бесконечно тонком слое со стехиометрическим соотношением компонентов. Химические реакции в пределах ламинарных локальных фронтов пламени рассматриваются в одномерной постановке и зависят только от параметра  $\xi$ , который выражается через массовые доли:

$$\xi = \frac{z_k - z_{k,O}}{z_{k,F} - z_{k,O}}, \quad (3)$$

где  $z_k$  — массовая доля  $k$ -го элемента; индексы  $O$  и  $F$  — окислитель и горючее соответственно.

Для учета влияния турбулентности на локальные ламинарные фронты пламени, вызванное флуктуациями параметров потока, в используемой модели вводится понятие мгновенной скорости скалярной диссипации  $\chi$  как меры скорости перемешивания. При допущении о равенстве коэффициентов диффузии  $D_k = D$ , которое справедливо для турбулентных потоков, значение  $\chi$  определяется по формуле

$$\chi = 2D \left( \frac{\partial z}{\partial x_i} \frac{\partial z}{\partial x_i} \right). \quad (4)$$

Согласно (4), мгновенная скорость скалярной диссипации может быть интерпретирована как характерная скорость диффузии. Если  $\chi \rightarrow 0$ , то система стремится к химическому равновесию, а с увеличением  $\chi$  степень неравновесности возрастает.

В системе уравнений (1) законы сохранения энергии и переноса компонентов смеси могут быть преобразованы из пространственной системы координат (в рассматриваемой постановке — из цилиндрической) в систему координат параметра  $\xi$  следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} - \frac{1}{C_p} \sum_k h_k \omega_k + \frac{1}{2C_p} \rho \chi \left[ \frac{\partial C_p}{\partial \xi} + \sum_k C_{p,k} \frac{\partial Y_k}{\partial \xi} \right] \frac{\partial T}{\partial \xi} = 0; \\ \frac{1}{2} \rho \chi \frac{\partial^2 Y_k}{\partial \xi^2} + S_k = 0. \end{cases} \quad (5)$$

При известной  $\chi$  уравнения переноса химических компонент и энергии могут быть решены, и следовательно, определена структура пламени, т. е. получены зависимости  $T = T(\xi, t)$  и  $Y_k = Y_k(\xi, t)$ . Обычно эти зависимости представляются в виде массивов данных, называемых также «библиотеками ламинарных локальных фронтов пламени», которые затем встраиваются в модель турбулентного горения с помощью функций плотности вероятности [15]. Для построения библиотек необходимо располагать данными о термодинамических свойствах компонент смеси и механизме горения. В данной работе использованы три подхода.

Первый подход определения параметров продуктов сгорания основан на двухстадийном квазиглобальном механизме Вестбрука и Драйера [16], представленном в табл. 1.

Таблица 1

Квазиглобальный механизм Вестбрука и Драйера

Химическая реакция	Скорость реакции
$\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$	$r_1 = 5 \cdot 10^{11} \exp\left[-\frac{47\,800}{RT}\right] [\text{CH}_4]^{0,7} [\text{O}_2]^{0,8}$
$\text{CO} + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2$	$r_2 = 2,24 \cdot 10^{12} \exp\left[-\frac{40\,700}{RT}\right] [\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]$
$\text{CO}_2 \rightarrow \text{CO} + 0,5\text{O}_2$	$r_3 = 5 \cdot 10^8 \exp\left[-\frac{40\,700}{RT}\right] [\text{CO}_2]$

Второй подход базируется на редуцированном механизме Джонса и Линштедта для горения метана с воздухом с правками Фрассольтати для кислород-метановых пламен [17], который представлен в табл. 2.

Третий подход основан на использовании кинетического механизма горения GRI Mech 3.0 [18], состоящего из 53 компонентов, участвующих в 325 элементарных реакциях. Этот механизм применим для оценки распределения температурных полей и промежуточных продуктов реакций горения метана с кислородом.

Для сравнения адиабатная температура пламени метана с кислородом при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1$ , полученная в результате расчета в программном комплексе (ПК) Terra, и температура продуктов сгорания по оси расчетной области, полученная в результате численного моделирования горения с использованием вышеприведенных подходов, представлены на рис. 2.

Редуцированный механизм Джонса и Линдштедта с правками Фрассольдати

Химическая реакция	Скорость реакции
$\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	$r_1 = 3,06 \cdot 10^{11} \exp\left[-\frac{30\,000}{RT}\right] [\text{CH}_4]^{0,5} [\text{O}_2]^{1,3}$
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	$r_2 = 3,84 \cdot 10^9 \exp\left[-\frac{30\,000}{RT}\right] [\text{CH}_4][\text{H}_2\text{O}]$
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$	$r_3 = 2,01 \cdot 10^9 \exp\left[-\frac{20\,000}{RT}\right] [\text{CO}][\text{H}_2\text{O}]$
$\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 \rightleftharpoons \text{H}_2\text{O}$	$r_4 = 8,03 \cdot 10^{16} T^{-1} \exp\left[-\frac{40\,000}{RT}\right] [\text{H}_2]^{0,3} [\text{O}_2]^{1,55}$
$\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{O}$	$r_5 = 1,5 \cdot 10^9 \exp\left[-\frac{113\,000}{RT}\right] [\text{O}_2]$
$\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{H} + \text{OH}$	$r_6 = 2,3 \cdot 10^{22} T^{-3} \exp\left[-\frac{120\,000}{RT}\right] [\text{H}_2\text{O}]$

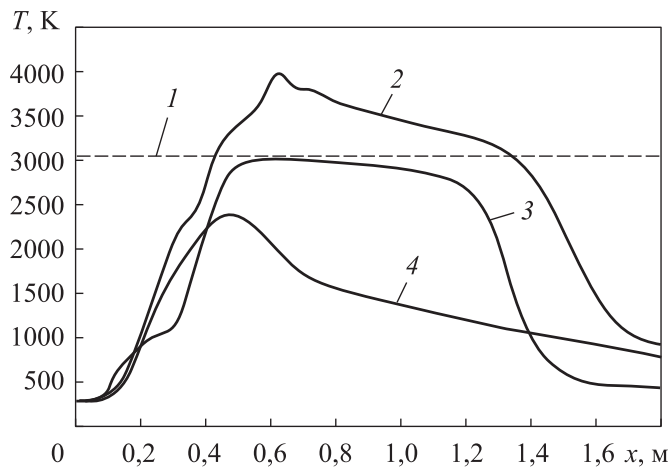


Рис. 2. Температура по оси модельного канала, полученная с помощью:

1 — расчета в ПК Terra (адиабатная); 2 — модели диссипации вихря EDM с двухстадийным редуцированным механизмом Вестбрука и Драйера; 3 — модели химического равновесия с редуцированным механизмом Джонса и Линдштедта с правками Фрассольдати; 4 — модели тонкого фронта пламени с механизмом GRI-Mech 3.0

Как видно по представленным на рис. 2 графикам, температура продуктов сгорания, получаемая методом EDM, дает ожидаемо завышенное значение температуры, так как при данном подходе не учитывается возникающая в процессе горения диссоциация, приводящая к эндотермическим реакциям распада крупных молекул на более мелкие и снижению температуры. Таким образом, этот подход можно рекомендовать для проведения только качественного анализа в многопараметрических исследованиях рабочего процесса в РДМТ на компонентах кислород — метан.

Максимальная температура продуктов сгорания, полученная с использованием подхода, основанного на химическом равновесии с редуцированным механизмом Джонса и Линдштедта с правками Фрассольдати, совпадает с адиабатной температурой, определенной в ПК Terra, однако она позволяет оценить распределение равновесной температуры по проточному тракту, в отличие от расчетов в последней. При таком подходе, так же как и при предыдущем, невозможно проводить количественную оценку параметров рабочего процесса, он подходит лишь для качественной оценки, для его проведения требуется несколько большие затрат вычислительных ресурсов.

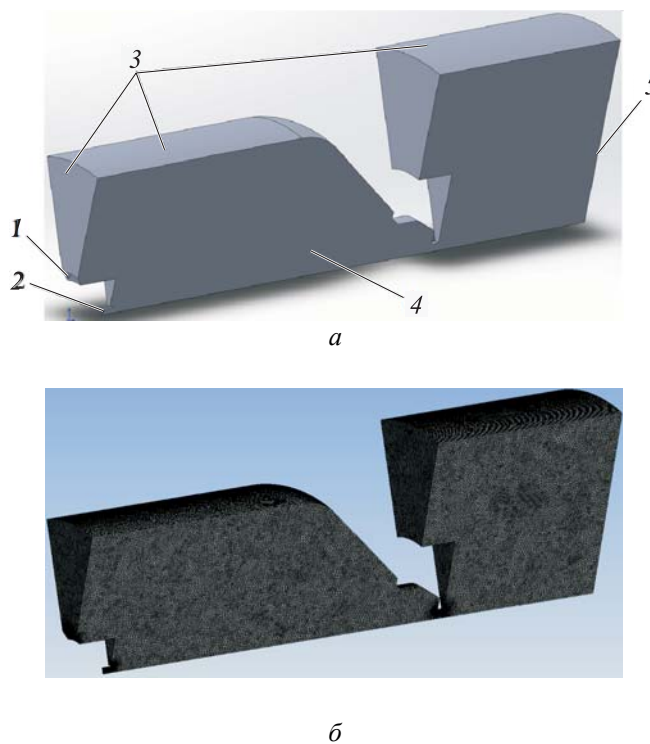
Численное моделирование с использованием метода flamelet с механизмом GRI-Mech 3.0 позволяет не только определить распределение температуры по проточному тракту с учетом взаимодействия фронта пламени с осредненным турбулентным потоком, но и оценить градиенты концентраций. Для последующего численного исследования выбран именно этот подход, поскольку он дает возможность проводить не только качественную, но и количественную оценку параметров продуктов сгорания (температуры, концентраций компонент смеси и т. п.).

**Численное моделирование горения в камере РДМТ.** Численное моделирование квазистационарного горения, газовой динамики и теплообмена двух заранее не подготовленных потоков кислорода и метана в 1/12 части КС модельного РДМТ [19] основано на решении системы уравнений сохранения массы, количества движения и энергии, а также уравнений переноса компонентов потока в трехмерной постановке. Система уравнений в векторной форме имеет вид (1). При проведении численного исследования были приняты следующие допущения:

- рабочее тело рассматривается в приближении идеального газа;
- стенки камеры сгорания адиабатные, не учитывается теплоотвод, также на них не происходят химические реакции;
- процесс воспламенения не моделируется;
- при задании граничных условий параметры на входе и выходе считаются равномерными.



Система уравнений (1) с учетом принятых допущений замыкается уравнением состояния идеального газа и двумя уравнениями модели турбулентности типа  $k - \omega$  SST. Термодинамические свойства исходных компонентов и их продуктов сгорания зависят от температуры по стандартным полиномиальным зависимостям. Поскольку продукты сгорания кислорода и метана обладают высокой температурой, а также содержат значительное количество молекул  $H_2O$  и  $CO_2$ , необходимо учесть лучистый тепловой поток, который в данной работе моделируется с использованием модели P1. Горение моделируется с применением двух подходов — равновесной химии и тонкого фронта пламени. Расчетная область и сетка показаны на рис. 3.



**Рис. 3.** Расчетные область и сетка для моделирования горения кислорода с метаном:

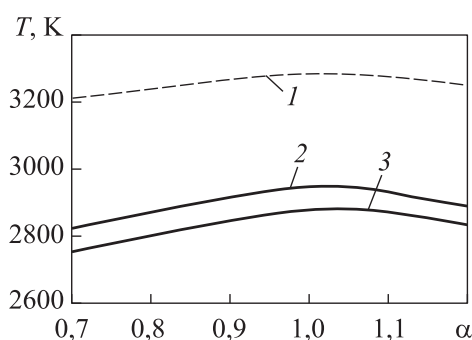
1 — вход кислорода; 2 — вход метана; 3 — адиабатные стенки;  
4 — плоскость симметрии; 5 — выход из расчетной области

Наибольшие градиенты параметров ожидаются в районе подачи компонентов топлива, поэтому в соответствующих местах предусмотрено наибольшее количество узлов сетки. На предварительном этапе выбран размер расчетной сетки из условий обеспечения сеточной сходимости по максимальной температуре пламени. За критерий

установления численного решения приняты равенство суммарного расхода компонентов топлива на входе и выходе из КС, а также неизменность максимальной температуры пламени на значительном количестве итераций.

**Результаты расчета.** Численное моделирование горения в 1/12 части КС модельного РДМТ выполнено для трех значений коэффициента избытка окислителя:  $\alpha_1 = 0,7$ ,  $\alpha_2 = 1$ ,  $\alpha_3 = 1,2$ . Секундный массовый расход горючего постоянный, равный 0,3 г/с, расход кислорода составил соответственно  $m_{к_1} = 0,838$  г/с,  $m_{к_2} = 1,197$  г/с,  $m_{к_3} = 1,436$  г/с.

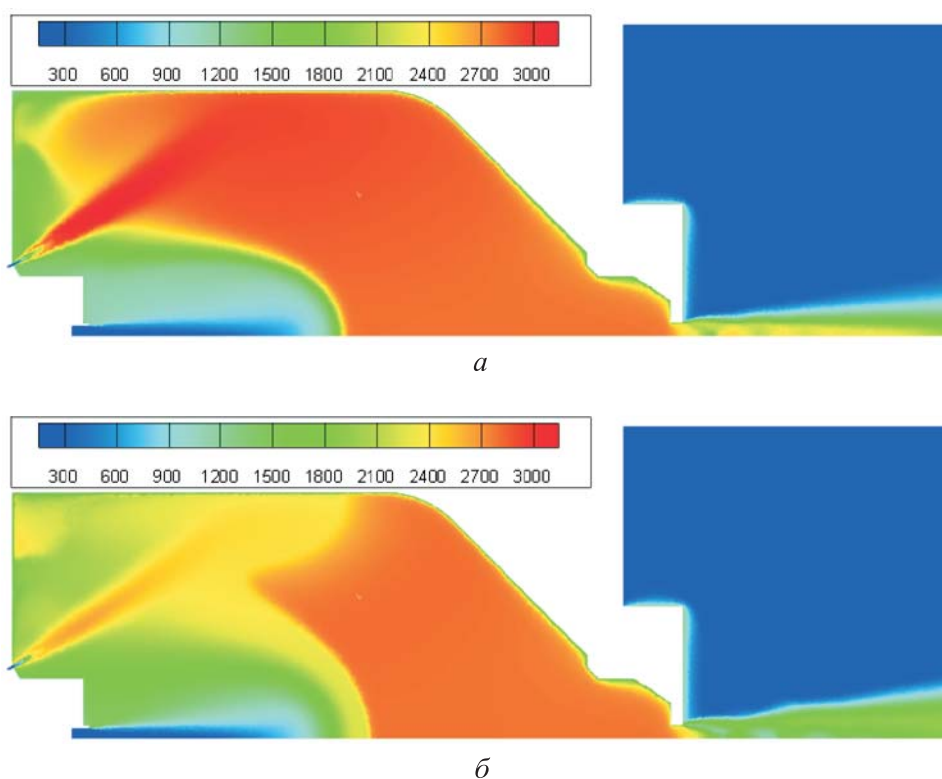
Графики зависимости максимальной температуры пламени от коэффициента избытка окислителя при использовании различных подходов в сравнении с адиабатной температурой, рассчитанной в ПК Тетра, приведены на рис. 4. Характер изменения кривых в зависимости температуры продуктов сгорания от коэффициента избытка окислителя сохраняется при различных расчетных моделях. Следовательно, можно сделать вывод о том, что допустимо использовать рассматриваемые подходы для качественного анализа рабочего процесса в РДМТ на газообразной паре кислород — метан.



**Рис. 4.** Максимальная температура пламени при различных коэффициентах избытка окислителя с помощью модели: ПК Tetra (1); химическое равновесие на основе редуцированного механизма Джонса и Линдштедта с правками Фрасольдаты (2); тонкий фронт пламени на основе механизма GRI-Mech 3.0 (3)

Как видно на рис. 4, максимальная температура продуктов сгорания, определенная при использовании модели химического равновесия, на 11...12 % ниже теоретического значения, а в случае применения модели flamelet — на 12...14 %.

Примеры полей температуры при  $\alpha_2 = 1$ , полученные в результате численного моделирования с помощью разработанной математической модели на основе равновесного и flamelet подходов, представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Расчетные поля температуры, полученные с помощью модели равновесной химии (а) и flamelet (б)

Поле температуры, полученное с использованием модели равновесной химии на основе редуцированного механизма Джонса и Линдштедта с правками Фрассольдати (рис. 5, а), содержит зоны повышенной температуры порядка 2900К в области, близкой к форсуночной головке, в то время как по модели flamelet температура в данной области не превышает 2500К (рис. 5, б). Средняя температура в объеме КС модельного РДМТ при использовании первой модели составила 2431К, второй — 1937К. При этом температура, рассчитанная по коэффициенту расходного комплекса из ранее проведенного экспериментального исследования на данном модельном РДМТ [19] при коэффициенте избытка окислителя  $\alpha = 1$  и непрерывном режиме работы, не превышает 1650К. Таким образом, первый способ численного моделирования дает погрешность порядка 50 % по уровню температуры, а второй — 20 %. Можно заключить, что использование модели flamelet позволяет проводить не только качественную, но и количественную оценку температуры при исследовании горения в реальных КС РДМТ.

**Заключение.** В результате проведенного исследования выполнены расчеты горения предварительно не перемешанной газообразной топливной пары кислород — метан в двухмерной и трехмерной постановках с использованием различных моделей химического взаимодействия. Разработаны рекомендации по выбору модели химического взаимодействия в КС модельного РДМТ на компонентах кислород — метан, а именно модель тонкого фронта пламени (flamelet), которая позволяет получить значения температуры, не превышающие 20 % значений экспериментальных. Создана математическая модель расчета горения в КС модельного РДМТ предварительно не подготовленной смеси кислорода с метаном на основе системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса, замыкаемой моделью турбулентности типа  $k - \omega$  SST, дополненной моделью теплообмена излучением P1 и моделью горения тонкого фронта пламени с использованием механизма GRI-Mech 3.0.

*Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ МК-3410.2022.4*

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кутуев Р.Х., Лебедев И.Н., Салич В.Л. Разработка перспективных РДМТ на экологически чистых топливных композициях. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2009, № 3, с. 101–109.
- [2] Ваулин С.Д., Салич В.Л. Методика проектирования высокоэффективных ракетных двигателей малой тяги на основе численного моделирования внутрикамерных процессов. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2012, № 12, с. 43–50.
- [3] Егорычев В.С., Шаблий Л.С., Зубанов В.М. *Моделирование внутрикамерного рабочего процесса РДМТ на газообразных кислороде и водороде в ANSYS CF*. Самара, Изд-во Самарского университета, 2016, 136 с.
- [4] Микушин А.Ю., Самойлова А.А., Бивол Г.Ю., Коробов А.Е., Головастов С.В. Метод расчета нестационарного тягового усилия эжекторного насадка пульсирующего реактивного двигателя. *Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электронный журнал*, 2016, № 6, с. 130–144.
- [5] Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н., Бакланов А.В. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2011, № 5, с. 208–214.
- [6] Морозов В.В., Шилин А.А., Равина А.А., Шалынков С.А. Численное моделирование процесса горения метана и воздуха в цилиндрической камере. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2021, № 9, с. 356–262.
- [7] Арефьев К.Ю., Федотова К.В., Крикунова А.И., Панов В.А. Математическое и физическое моделирование влияния пульсаций скорости сносящего потока воздуха на структуру пламени при диффузионном режиме горения метана. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2020, № 2, с. 65–84.
- [8] Hossain A. Computational study of methane-air combustion using the species transport model. *AIAA SciTech Forum*. San Diego, 2022, 12 p.
- [9] Ershadi A., Zargarabadi R. Second-order modeling of non-premixed turbulent methane-air combustion. *J. Cent. South. Univ.*, 2021, no. 28, pp. 3545–3555.

- [10] Da Silva C.V., Centeno F.R. 3D Analysis of turbulent non-premixed combustion of natural gas in a horizontal cylindrical chamber. In: *Proceedings of 22st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Brazil, 2013, 10 p.
- [11] Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. In: *13th Symp. (Int.) Comb.* Pittsburgh, 1970, 649 p.
- [12] Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In: *Symposium (International) on Combustion*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 719–729.
- [13] Белов Г.В. Моделирование равновесных состояний многокомпонентных гетерогенных систем. *Математическое моделирование*, 2005, № 2, с. 81–91.
- [14] Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984, vol. 10, no. 3, pp. 319–339.
- [15] Юн А.А. *Теория и практика моделирования турбулентных течений*. Москва, URSS, 2009, 273 с.
- [16] Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combustion Science and Technology*, 1981, no. 27, pp. 31–43.
- [17] Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Ranzi E., Candusso C., Tolazzi D. Simplified kinetic schemes for oxy-fuel combustion. In: *Proceedings of 1<sup>st</sup> Int. Conf. on Sustainable Fossil Fuels for Future Energy*. Italy, Rome, 2009, 14 p.
- [18] Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M., Moriarty N.W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C.T., Hanson R., Song S., Gardiner W.C., Lissianski V., Qin Z. *GRI-MECH 3.0*. URL: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)
- [19] Ворожеева О.А., Федотова К.В., Ковалев К.Е. Экспериментальное исследование эффективности рабочих процессов в камере ракетного двигателя малой тяги на компонентах кислород — метан. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2022, вып. 11. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2229>.

Статья поступила в редакцию 19.06.2023

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Федотова К.В., Ковалёв К.Е., Ворожеева О.А. Численное моделирование горения в камере модельного ракетного двигателя малой тяги на газообразных компонентах кислород — метан. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2023, вып. 7. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2023-7-2292>

**Федотова Ксения Викторовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: рабочие процессы в камерах сгорания ракетных и реактивных двигателей, численное моделирование и экспериментальные исследования особенностей течения, теплообмена и горения в камерах сгорания ракетных и реактивных двигателей. e-mail: [fedotova@bmstu.ru](mailto:fedotova@bmstu.ru)

**Ковалёв Кирилл Евгеньевич** — старший преподаватель кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: ракетные двигатели на жидком и твердом топливе, численное моделирование и экспериментальное исследование тепломассообмена в камерах сгорания ракетных двигателей. e-mail: [kovalev.k@bmstu.ru](mailto:kovalev.k@bmstu.ru)

**Ворожеева Олеся Андреевна** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Ракетные двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Область деятельности и научных интересов: жидкостные ракетные двигатели малой тяги, численное моделирование и экспериментальное исследование характеристик рабочего процесса в ракетных двигателях малой тяги. e-mail: [oa-vorozheeva@bmstu.ru](mailto:oa-vorozheeva@bmstu.ru)

## Numerical simulation of combustion in the chamber of a model low-thrust rocket engine operating on the gaseous oxygen–methane components

© K.V. Fedotova, K.E. Kovalev, O.A. Vorozheeva

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The paper provides numerical study of the working process in a model low-thrust rocket engine operating on the gaseous oxygen-methane components based on results of the preliminary computational analysis of the component supply system efficiency. Combustion of the oxygen-methane unprepared preliminary mixture was numerically simulated carried using the fast chemistry approaches, including eddy dissipation models (EDM), chemical equilibrium and flamelet. To describe the chemical processes occurring during combustion, the Westbrook and Dreyer quasi-global two-stage mechanism, the reduced Jones–Lindstedt kinetic mechanism with the Frassoldati corrections and the GRI Mech 3.0 mechanism were used. Calculations were performed in the two-dimensional and three-dimensional formulations of the gaseous oxygen and methane diffusion combustion. Results of the parametric study (concentration and temperature fields) are presented for the oxidizer excess coefficients of  $\alpha = 0.7; 1; 1.2$ . It is shown that using a mathematical model based on the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations closed by the  $k-\omega$  SST turbulence model, supplemented with the flamelet model based on the GRI Mech 3.0 mechanism taking into account the radiative heat transfer makes it possible to obtain satisfactory convergence with results of the experimental study and to qualitatively assess the workflow in this type of engine.*

**Keywords:** *diffusion combustion, unprepared preliminary mixture, methane, oxygen, gaseous components, flamelet model, low-thrust rocket engine*

*This work was performed with support by the Grant from the President of the Russian Federation MK-3410.2022.4.*

### REFERENCES

- [1] Kutuev R.Kh., Lebedev I.N., Salich V.L. Razrabotka perspektivnykh RDMT na ekologicheski chistykh toplivnykh kompozitsiyakh [Development of advanced low thrust rocket engines with ecologically friendly propellants]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Herald of the Samara State Aerospace University*, 2009, no. 3–3 (19), pp. 101–109.
- [2] Vaulin S.D., Salich V.L. Metodika proyektirovaniya vysokoeffektivnykh raketnykh dvigateley maloy tyagi na osnove chislennogo modelirovaniya vnutrikamernykh protsessov [The highly effective low thrust rocket engines designing methods, based on numerical simulation of intrachamber processes]. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroyeniye — Bulletin of the South Ural State University. Series Mechanical Engineering*, 2012, no. 12, pp. 43–50.
- [3] Egorochev V.S., Shabliy L.S., Zubanov V.M. Modelirovaniye vnutrikamernogo rabocheho protsessa RDMT na gazoobraznykh kislorode i vodorode v ANSYS CFX [Simulation of the operating processes in LTRE combustion chamber on gaseous oxygen and hydrogen in ANSYS CFX]. Samara, Samara University Publ., 2016, 136 p.

- [4] Mikushin A.Yu., Samoylova A.A., Bivol G.Yu., Korobov A.Ye., Golovastov S.V. Metod rascheta nestatsionarnogo tyagovogo usiliya ezhektornogo nasadka pulsiruyushego reaktivnogo dvigatelya [Method for calculating the non-stationary traction force of the ejector nozzle of a pulsating jet engine]. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana. Elektron. zhurnal — Science & Education. BMSTU. Electronic journal*, 2016, no. 6, pp. 130–144.
- [5] Mingazov B.G., Yavkin V.B., Sabirzyanov A.N., Baklanov A.V. Analiz primenimosti modeley goreniya dlya rascheta mnogoforsunochnoy kamery sgoraniya GTD [Analysis of combustion models applicability for designing combustion chamber with a large number of nozzles]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Herald of the Samara State Aerospace University*, 2011, no. 5, pp. 208–214.
- [6] Morozov V.V., Shilin A.A., Ravina A.A., Shalynkov S.A. Chislennoye modelirovaniye protsessy goreniya metana i vozdukha v tsilindricheskoy kamere [Numerical simulation of the combustion of methane and air in a cylindrical chamber burning]. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskiye nauki — Izvestiya Tula State University. Series Technical Sciences*, 2021, no. 9, pp. 356–262.
- [7] Arefyev K.Yu., Fedotova K.V., Krikunova A.I., Panov V.A. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovaniye vliyaniya pulsatsiy skorosti snosyashego potoka vozdukha na strukturu plameni pri diffuzionnom rezhime goreniya metana [Mathematical and physical simulation of the cross-flow velocity pulsation effect on the flame structure during the diffusion mode of methane combustion]. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Estestvennyye Nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2020, no. 2, pp. 65–84.
- [8] Hossain A. Computational study of methane-air combustion using the species transport model. *AIAA SciTech Forum*. San Diego, 2022, 12 p.
- [9] Ershadi A., Zargarabadi R. Second-order modeling of non-premixed turbulent methane-air combustion. *J. Cent. South. Univ.*, 2021, no. 28, pp. 3545–3555.
- [10] Da Silva C.V., Centeno F.R. 3D Analysis of turbulent non-premixed combustion of natural gas in a horizontal cylindrical chamber. In: *Proceedings of 22st Brazilian Congress of Mechanical Engineering*. Brazil, 2013, 10 p.
- [11] Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. In: *13th Symp. (Int.) Comb.* Pittsburgh, 1970, 649 p.
- [12] Magnussen B.F., Hjertager B.H. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. In: *Symposium (International) on Combustion*, 1977, vol. 16, no. 1, pp. 719–729.
- [13] Belov G.V. Modelirovaniye ravnovesnykh sostoyaniy mnogokomponentnykh geterogennykh system [Computer simulation of a thermodynamic equilibrium in complex heterogeneous systems]. *Matem. Mod.*, 2005, vol. 17, no. 2, pp. 81–91.
- [14] Peters N. Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1984, vol. 10, no. 3, pp. 319–339.
- [15] Yun A.A. *Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techeniy* [Theory and practice of simulating the turbulent flows]. Moscow, URSS, 2009, 273 p.
- [16] Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combustion Science and Technology*, 1981, no. 27, pp. 31–43.
- [17] Frassoldati A., Cuoci A., Faravelli T., Ranzi E., Candusso C., Tolazzi D. Simplified kinetic schemes for oxy-fuel combustion. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Sustainable Fossil Fuels for Future Energy*. Italy, Rome, 2009, 14 p.

- [18] Smith G.P., Golden D.M., Frenklach M., Moriarty N.W., Eiteneer B., Goldenberg M., Bowman C.T., Hanson R., Song S., Gardiner W.C., Lissianski V., Qin Z. *GRI-MECH 3.0*. Available at: [http://www.me.berkeley.edu/gri\\_mech/](http://www.me.berkeley.edu/gri_mech/)
- [19] Vorozheeva O.A., Fedotova K.V., Kovalev K.E. Eksperimentalnoe issledovanie effektivnosti rabochikh protsessov v kamere raketnogo dvigatelya maloy tyagi na komponentakh kislorod–metan [Experimental study of the workflow efficiency in the chamber of a low-thrust rocket engine operating on the oxygen — methane components]. *Inzhenerny zhurnal: nauka i innovatsii — Engineering Journal: Science and Innovation*, 2022, iss. 11. <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2022-11-2229>

**Fedotova K.V.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: working processes in combustion chambers of the rocket and jet engines, numerical simulation and experimental study of the features of flow, heat transfer and combustion in combustion chambers of the rocket and jet engines. e-mail: [fedotova@bmstu.ru](mailto:fedotova@bmstu.ru)

**Kovalev K.E.**, Senior Lecturer, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: liquid and solid propellant rocket engines, numerical simulation and experimental study of heat and mass transfer in combustion chambers of the rocket engines. e-mail: [kovalev.k@bmstu.ru](mailto:kovalev.k@bmstu.ru)

**Vorozheeva O.A.**, Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Rocket Engines, Bauman Moscow State Technical University. Scientific interests: low-thrust liquid-propellant rocket engines, numerical simulation and experimental study of the working process characteristics in the low-thrust rocket engines. e-mail: [oa-vorozheeva@bmstu.ru](mailto:oa-vorozheeva@bmstu.ru)