

УДК 662.612.3
DOI: 10.15372/PMTF202215096

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ И ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА В МОДЕЛЬНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

К. Е. Веселов, О. А. Евдокимов

Рыбинский государственный авиационный технический университет
им. П. А. Соловьева, Рыбинск, Россия
E-mails: kirill.veselov98@inbox.ru, yevdokimov_oleg@mail.ru

Приведены результаты исследований газодинамики и горения жидкого топлива в модельной камере сгорания, работающей на жидком топливе, с использованием различных численных подходов, направленных на создание верифицированного метода моделирования работы устройств сжигания топлива. Исследования выполнены в стационарной и нестационарной постановках с использованием моделей турбулентности RANS и гибридного вихреразрешающего подхода DES. Проведено сравнение полученных результатов с данными бесконтактного оптического эксперимента. Показано, что наибольшие различия экспериментальных и расчетных данных имеют место в приосевой области камеры сгорания, где формируется возвратное рециркуляционное течение. Указанная вихревая структура адекватно разрешается в рамках подхода DES, а также нестационарной модели турбулентности SAS SST. Использование указанных подходов наряду с моделью горения Flamelet позволило обеспечить максимальную точность прогнозирования характеристик закрученного реагирующего течения, в частности распределений скорости и температуры в камере сгорания.

Ключевые слова: закрученное течение, горение, керосин, модели турбулентности, камера сгорания, численное моделирование

Введение. Камера сгорания (КС) является одним из наиболее сложных узлов газотурбинного двигателя (ГТД), в котором реализуется комплекс теплофизических процессов: изменение термодинамических параметров рабочего тела, эндо- и экзотермические химические реакции, фазовые превращения, нестационарное турбулентное течение с зонами рециркуляции, сложный высокоградиентный теплообмен с существенным вкладом всех механизмов, в том числе излучения. Этим обусловлена сложность проектирования КС. Кроме того, к характеристикам КС ГТД применяется ряд требований, заключающихся в минимизации потерь полного давления, обеспечении максимальной полноты сгорания топлива, снижении эмиссии загрязняющих веществ (NO_x , CO), сокращении массогабаритных параметров, повышении устойчивости горения, увеличении ресурсных показателей и т. д. [1, 2].

Экспериментальные исследования газодинамики и горения жидкого топлива в КС ГТД сопряжены с трудностями обеспечения режимных параметров, сложной геометрией устройств, вследствие чего часто выполняются лишь точечные измерения интегральных параметров, что не позволяет в полной мере оценивать особенности структуры течения и

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение фундаментальных научных исследований на 2022 г. (научная тема 0774-2020-0004).

динамики фронта пламени. Поэтому большинство экспериментальных исследований в КС проводится на упрощенных моделях [3, 4]. Это также расширяет возможности использования современных бесконтактных методов изучения процесса горения [5]. К числу таких методов относятся методы цифровой трассерной визуализации потока (particle image velocimetry (PIV)), лазерной доплеровской анемометрии (laser-Doppler anemometry (LDA)), CH^* — хемилюминесцентный метод для анализа химических реакций, спектроскопия когерентного антистоксова рассеяния (coherent anti-Stokes Raman spectroscopy (CARS)) для измерения температуры и др. В работах [6, 7] указанные методы использовались для исследования горения в модельной КС, имеющей двухуровневое закручивающее устройство для обеспечения стабилизации пламени и интенсификации смесеобразования в условиях низкоэмиссионной концепции горения (lean premixed prevaporized (LPP)).

Эффективным способом исследования рабочего процесса в КС ГТД является численное моделирование [8], с учетом адекватной верификации по данным бесконтактного эксперимента обеспечивающее надежное прогнозирование характеристик устройства. Тем не менее в настоящее время не существует универсального подхода к численному моделированию газодинамики и горения в энергетических установках, вследствие чего в большинстве исследований используются индивидуальные методы, верифицированные в рамках отдельных теплофизических экспериментов. В частности, в работе [9] для моделирования горения в вихревой камере также используется стационарная RANS-постановка (Reynolds averaged Navier — Stokes equations — решение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье — Стокса) на основе $(k-\varepsilon)$ -модели турбулентности. При таком подходе используется поправка на кривизну линий тока, позволяющая повысить точность прогнозирования окружной составляющей скорости за счет уменьшения рассчитываемых значений вихревой вязкости [10, 11], а также механизм окисления топлива в рамках модели турбулентного горения (burning velocity model (BVM)). Предложенный в [9] подход позволяет значительно повысить точность численных расчетов по сравнению со случаями использования стандартной $(k-\varepsilon)$ -модели и упрощенной химической кинетики.

В работе [12] приведены результаты численного моделирования горения смесей аммиака и водорода в закрученном потоке, полученные с использованием $(k-\varepsilon)$ -RNG-модели турбулентности (RNG — renormalization group) и упрощенного механизма химической кинетики, а также модели горения при распаде вихрей EDM (eddy dissipation model). Авторы [12] отмечают, что полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными [13], в частности распределение компонент скоростей в различных сечениях горелочного устройства. Кроме того, предложенный расчетный подход позволяет качественно прогнозировать скорость ламинарного горения. Указанные результаты позволяют выполнять анализ процесса образования оксидов азота NO при изменении соотношения концентраций топлива и окислителя, а следовательно, скорости протекания химических реакций.

Применение подхода RANS оправданно также в случае решения ряда задач о горении в двухфазной постановке. Примером таких задач является трехмерное численное моделирование горения угольной пыли в закрученном потоке, рассмотренное в работе [14], авторы которой указывают на целесообразность применения RANS-подхода совместно с реализуемой $(k-\varepsilon)$ -моделью турбулентности с сеточной адаптацией вблизи стенок устройства. Кроме того, моделирование горения реализовано в рамках упрощенной гетерогенной химической кинетики, что, по мнению авторов [14], является целесообразным в прикладных исследованиях и разработках. Рассмотренная в [14] расчетная постановка позволяет обеспечить точность предсказания распределений скорости и температуры в области горения на уровне 95 % и более по сравнению с результатами экспериментальных исследований [15].

Моделирование процесса горения угольной пыли с использованием постановки Эйлера — Лагранжа выполнено в работе [16], в которой для описания турбулентности применяется ряд RANS-моделей: стандартная $(k-\varepsilon)$ -модель, реализуемая $(k-\varepsilon)$ -модель, $(k-\varepsilon)$ -RNG-модель, SST-модель (shear stress transport — перенос касательных напряжений), а также модель переноса рейнольдсовых напряжений (Reynolds stress model (RSM)). Результаты сравнения расчетных данных с экспериментальными, полученными на установке с тепловой мощностью 60 кВт, показывают, что отклонение средних значений составляет $20 \div 40$ %. При этом наиболее точные расчетные результаты получены с использованием RSM-модели, позволяющей определить более корректные распределения скорости закрученного потока и как следствие концентрации химических веществ.

Детальное сопоставление экспериментальных и расчетных результатов для случая горения газообразного топлива в вихревом горелочном модуле проведено в работах [17, 18]. При численном решении задачи применяется RANS-подход, замыкаемый тремя моделями турбулентности: $k-\varepsilon$, $k-\omega$ и SST. В экспериментах использовался PIV-метод измерения скорости потока. Результаты исследований показывают, что при использовании SST-модели турбулентности они наиболее хорошо качественно и количественно согласуются с данными эксперимента. Однако в расчетной области имеются зоны, в которых численное моделирование предсказывает противоположные по знаку значения скорости, что тем не менее не оказывает существенного влияния на распределения температуры, когда количественное различие не превышает 16 %. Вместе с тем это свидетельствует о сложности выбора корректных настроек RANS-подхода при моделировании турбулентного реагирующего потока, вследствие чего все большее распространение при решении прикладных и фундаментальных задач о горении получают вихреразрешающие методы.

В работе [7] для моделирования горения распыленного жидкого топлива в закрученном течении применяется подход LES (large eddy simulation — моделирование крупных вихрей) с подсеточной моделью WALE (wall-adapting local eddy-viscosity — модель локальной вихревой вязкости с адаптацией вблизи стенки) с последующим сопоставлением полученных результатов и экспериментальных данных [6]. В этом случае химические превращения описываются с помощью модели конечной скорости реакции (finite rate chemistry (FRC)), а пульсации турбулентности на подсеточном масштабе — с помощью функции плотности вероятности (probability density function (PDF)). Процесс окисления включает 80 соединений и 464 химические реакции, а процесс испарения описывается моделью равномерной температуры Абрамзона — Сирийяно [19]. Полученные в [7] результаты свидетельствуют о том, что наиболее значительные различия профилей температуры наблюдаются в зонах смесеобразования и возвратного приосевого течения, в то время как распределение капель топлива и положение формирующегося фронта пламени определяются достаточно точно. Результаты количественного сравнения размеров и скорости капель также свидетельствуют об их удовлетворительном согласовании.

В работе [20] проведено моделирование турбулентного горения во фронтном модуле кольцевой камеры сгорания с использованием подхода LES. Расчет горения частично перемешанной смеси метана и воздуха выполнен с помощью модели динамического утолщения фронта пламени (dynamically thickened flame (DTF)), основанной на его искусственном сгущении (artificially thickened flame (ATF)). Результаты расчета показывают, что такой численный подход позволяет достаточно точно моделировать поведение частично перемешанной реагирующей смеси, а также воспламенение и распространение пламени в кольцевой КС. При этом учет теплотерь через стенки значительно увеличивает точность моделирования поля температуры, а также массовой доли промежуточных компонентов.

Таким образом, анализ существующих работ показывает целесообразность применения метода вихреразрешающего моделирования при решении прикладных задач. Наряду

с учетом химической кинетики такой подход, как правило, позволяет получать результаты, которые можно использовать на практике. Однако вихреразрешающее моделирование является затратным с точки зрения вычислительных ресурсов и времени. Компромиссным может быть подход на основе гибридных методов, заключающихся в использовании LES-моделирования ядра течения и RANS-постановки вблизи стенок. Примером является подход DES (detached eddy simulation — моделирование отсоединенных вихрей), реализованный при моделировании работы вихревых противоточных камер и горелочных устройств [21].

Существует достаточно большое количество экспериментальных результатов, полученных в рамках исследований горения различных видов топлива в закрученном потоке [22, 23]. Данные результаты также могут быть использованы для верификационных расчетов в КС различного назначения с целью обоснования наиболее адекватной математической постановки. Это позволит найти решение проблемы корректного моделирования процесса горения в КС ГТД, экспериментальные исследования которых, как правило, направлены на определение ряда интегральных параметров, таких как полнота сгорания топлива, гидравлические потери, эмиссия загрязняющих веществ. При этом детальная картина течения в рамках экспериментальных исследований практически не рассматривается, а используемые для ее идентификации расчетные методики недостаточно обоснованы. Следовательно, большое значение имеет выбор расчетного метода, позволяющего наиболее точно описать протекающие в КС процессы газодинамики, теплообмена и горения жидкого топлива с одновременной минимизацией вычислительных и временных затрат.

Целью настоящей работы является поиск обоснованного верифицированного подхода к моделированию теплофизических процессов в КС, позволяющего повысить точность получаемых результатов в приемлемые на практике сроки. Для этого рассматриваются различные стационарные и нестационарные подходы (RANS и URANS) с замыканием на основе распространенных моделей турбулентности, а также гибридный вихреразрешающий подход DES, результаты применения которых сравниваются с экспериментальными данными, полученными с помощью бесконтактных оптических методов.

Расчетные исследования. Численное моделирование горения жидкого топлива в КС должно сочетаться с обоснованным сопоставлением получаемых результатов и надежных экспериментальных данных. Работы [6, 7] удовлетворяют всем требованиям для проведения сопоставления: данные в них получены с использованием бесконтактных оптических методов с указанием максимальной погрешности и воспроизводимы с точки зрения геометрии модельной КС и ее режимных параметров. Кроме того, в [6, 7] приведены результаты LES-моделирования, которые также целесообразно использовать для проведения сравнительного анализа.

Трехмерная модель проточной части КС представлена на рис. 1. Камера состоит из двухуровневого лопаточного закручивающего устройства для подачи воздушных потоков, струйной топливной форсунки, расположенной на оси устройства, и жаровой трубы в форме прямоугольного параллелепипеда с размерами $85 \times 85 \times 169$ мм и выходным цилиндрическим соплом диаметром 40 мм. В [6] приведены результаты экспериментальных исследований процесса горения в рассматриваемой камере с использованием методов PIV и СН*-хемилюминесценции, в [7] — результаты вихреразрешающего моделирования LES, полученные на тетраэдрической сетке со сгущением вблизи стенок, а также в областях лопаточного завихрителя, в зонах смешения и фронта пламени, что требует порядка $80 \cdot 10^6$ элементарных ячеек в проточной части.

Численное моделирование проводилось на нескольких тетрагональных сеточных моделях, построенных для полной модели КС, показанной на рис. 1. Сетка для DES-расчетов состояла из $71 \cdot 10^6$ элементов с увеличением их плотности в пристенных областях, а так-

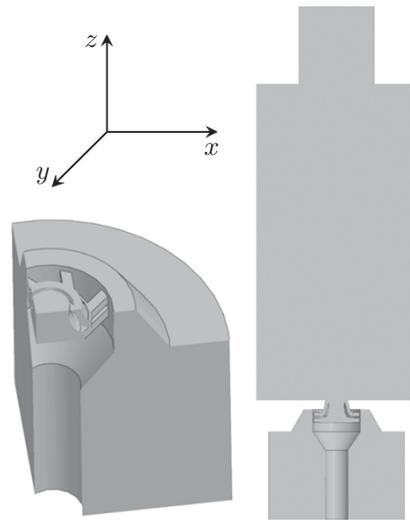


Рис. 1. Модель проточной части КС

же в областях завихрителя, зоны смешения и фронта пламени. В указанных областях дискретизация расчетной области выполнялась с учетом турбулентного микромасштаба Тейлора, равного 220 мкм.

Для реализации подхода RANS/URANS была построена сетка с меньшей степенью дискретизации (порядка 10^7 элементов). Это обусловлено тем, что RANS-приближение основано на применении статистических моделей для описания мелко- и среднемасштабной турбулентности и требует меньшего количества ячеек в генерируемой сеточной модели [24].

Для описания газодинамики в рамках подхода RANS/URANS рассматривалось несколько наиболее часто применяемых в прикладных исследованиях моделей турбулентности: SST, RSM SSG (Speziale — Sarkar — Gatski), SAS SST (scale adaptive simulation SST — модель SST с использованием адаптивных масштабов). В расчетах на основе моделей SST и SAS SST также применялась поправка на кривизну линий тока (curvature correction option), позволяющая повысить чувствительность источникового слагаемого уравнений изотропных RANS-моделей к вращению системы и криволинейности течения [11]. Величина поправки принималась равной 1,1. Наряду с этим использовался ограничитель генерации турбулентной кинетической энергии Като — Лаундера, представляющий собой модифицированное источниковое слагаемое в моделях турбулентности на основе вихревой вязкости и позволяющий решить проблему чрезмерного накопления турбулентной кинетической энергии в зонах застоя. Это достигается путем замены одного из тензоров касательных напряжений в источниковом слагаемом на тензор скорости завихренности.

Использование модели турбулентности RSM SSG обусловлено тем, что в отличие от большинства других распространенных моделей данная модель основана не на гипотезе Буссинеска, а на решении уравнений переноса для каждой компоненты тензора напряжений Рейнольдса и переноса скорости диссипации кинетической энергии турбулентности, что позволяет учесть анизотропию турбулентных пульсаций [25].

Результаты исследований показывают, что при изучении процессов с крупномасштабной турбулентностью нестационарный RANS-подход имеет преимущество по сравнению со стационарной постановкой [21, 26]. Используемая при этом модель адаптируемых масштабов (SAS SST) согласно данным ряда исследований позволяет прогнозировать результаты на уровне вихреразрешающей постановки LES [26, 27]. Поэтому использование указанной модели является перспективным и обоснованным с точки зрения возможности получения

корректных данных о турбулентной структуре закрученного течения в условиях ограниченных вычислительных и временных ресурсов.

Применяемый в настоящей работе подход DES является гибридным вихреразрешающим методом, суть которого заключается в активации RANS-модели в пристенной области, а LES-подхода — в ядре потока. Используемая модель DES основана на подсеточной модели Смагоринского, а также на изотропной модели турбулентности Ментера (SST) с учетом поправки на кривизну линий тока. В этом подходе скорость диссипации кинетической энергии турбулентности связана с пространственными масштабами элементарной ячейки. Уравнения RANS активируются в областях, где масштаб энергонесущих вихрей меньше характерного размера сетки, что обусловлено достаточно большими временными и вычислительными затратами LES и неспособностью RANS-моделей обеспечить приемлемую точность.

Расчет процесса горения топлива проводился с использованием Flamelet-PDF-модели горения. Концепция Flamelet описывает химические процессы в турбулентном течении в рамках модели быстрых реакций при больших значениях числа Дамкелера ($Da \gg 1$). Предполагается, что при таком процессе горения возникают тонкие пламена (flamelet), имеющие внутреннюю структуру. При использовании этой модели можно указать произвольное число промежуточных соединений, если известна их ламинарная химическая кинетика. Данные о ламинарной модели пламени предварительно вычисляются и хранятся в библиотеке для сокращения времени вычисления. Следует отметить, что модель имеет ряд ограничений, таких как предположение о “быстрой химии” или о пренебрежении изменением числа Льюиса — Семенова Le . Главный недостаток данной модели заключается в том, что на границе между топливом и окислителем существует пламя, вследствие чего оно возникает в областях подачи топливной смеси [28, 29]. В рамках описанного подхода решались уравнения для переноса функции плотности вероятности PDF в соответствии с подходом, предложенным в [30].

Моделирование процесса горения проводилось с использованием жидкого керосина марки Jet A и атмосферного воздуха в качестве окислителя. В рамках Flamelet-модели керосин рассматривался как жидкий суррогат следующего состава со стехиометрическими коэффициентами: для $NC_{10}H_{22}$ — 0,56, для ТМВ (trimethylbenzene) C_9H_{12} — 0,44, для O_2 — 13,96.

В кинетической схеме химических реакций учитывались 112 соединений и 883 реакции без образования NO_x . Траектории жидких частиц топлива моделировались в рамках подхода Лагранжа. Для описания испарения жидких капель и определения взаимосвязи между их температурой и давлением насыщения использовалось уравнение Антуана.

Взаимодействие частиц со стенками и между собой не моделировалось. В качестве диаметра капель использовалось дискретное распределение по массовой доле f : $d = 42$ мкм при $f = 0,5$; $d = 27$ мкм при $f = 0,3$; $d = 18$ мкм при $f = 0,2$.

Следует отметить, что при моделировании процесса горения возникающие радиационные тепловые потоки не учитывались по следующим причинам. Во-первых, среднетемпературная температура в зоне горения не превышает 1500 К [7], что свидетельствует об умеренном уровне возникающих радиационных потоков. Во-вторых, использование моделей лучистого теплообмена значительно усложняет расчетную постановку и приводит к необходимости применения дополнительных вычислительных ресурсов, что не всегда приемлемо в инженерных расчетах. В-третьих, известные расчетные исследования рассматриваемой модельной КС также проводились без учета возникающей радиации, а следовательно, наиболее корректным является потенциальное сопоставление результатов исследований в близкой постановке.

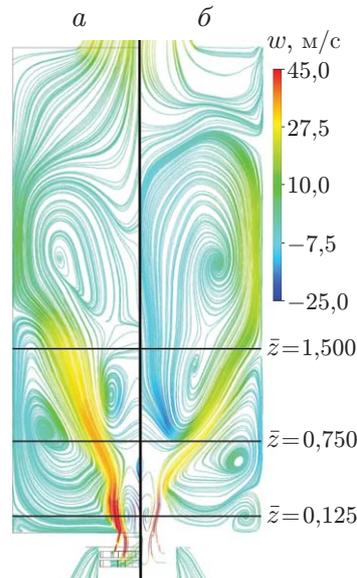


Рис. 2. Распределения осевой составляющей скорости на линиях тока, построенных в продольном сечении КС с использованием (RSM SSG)-модели (а) и SST-модели (б) турбулентности

При проведении численного моделирования в расчетной области задавались следующие граничные условия. Температура и массовый расход поступающего в КС воздуха составляли $T_{air} = 323$ К, $M_{air} = 4,31$ г/с соответственно, температура и массовый расход подаваемого топлива — $T_f = 303$ К, $M_f = 0,236$ г/с. На срезе выходного сечения задавалось атмосферное давление $p_{out} = 101\,325$ Па. Температура боковых стенок КС устанавливалась изотермической и равной $T_{side} = 1205$ К, температура нижней стенки также принималась постоянной: $T_{bot} = 815$ К. Остальные границы расчетной области полагались адиабатическими. Приведенные граничные условия полностью соответствовали условиям в работе [7].

Результаты численного моделирования. Результаты численного моделирования с использованием вихреразрешающего метода LES, приведенные в работе [7], свидетельствуют о том, что в закрученном потоке тороидальные вихри формируются как вблизи основания камеры, так и в ее средней части. Основная масса воздушного потока в КС движется таким образом, что, разделяясь на два тороидальных вихря, создает криволинейную коническую поверхность между ними, причем внутри этой поверхности возникает возвратное приосевое течение. Эти особенности структуры течения использовались для сопоставления с результатами численного моделирования в RANS-постановке.

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования, полученные с использованием моделей турбулентности SST и RSM SSG в стационарной постановке. При сравнении картин течения как между собой, так и с результатами PIV-эксперимента [6] можно отметить ряд существенных различий. Распределение в случае (RSM SSG)-модели турбулентности (см. рис. 2, а) показывает, что величина угла раскрытия закрученного потока существенно отличается от наблюдаемой в эксперименте, а высота формирующегося при моделировании конуса на 70 % превышает реальное значение. При этом внешний тороидальный вихрь незначительно поднимается над основанием камеры, а внутренняя (верхняя) вихревая структура вследствие более высокой пространственной локализации имеет существенно меньшую протяженность в осевом направлении. Это сопровождается возникновением приосевого течения, имеющего форму спирали. При использовании SST-мо-

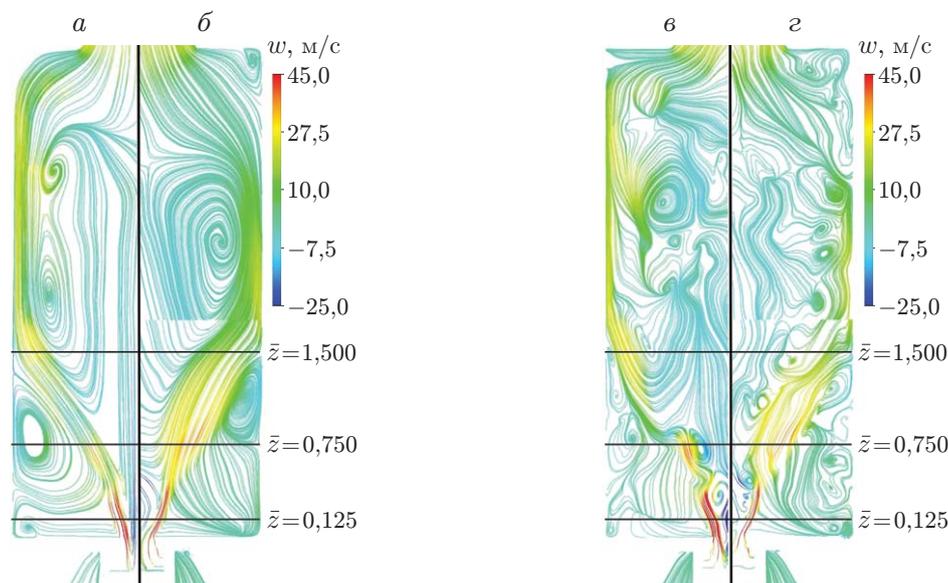


Рис. 3. Распределения осевой составляющей скорости на линиях тока, полученных в нестационарной постановке с использованием модели турбулентности SAS SST (*а, в*) и подхода DES (*б, г*):

а, б — осредненное распределение, *в, г* — мгновенная реализация

дели турбулентности (см. рис. 2, *б*) картина меняется: наблюдается некоторая неравномерность и несимметричность структуры потока. При этом угол раскрытия основного потока несколько уменьшается, что более соответствует экспериментальным данным. В этом случае относительная высота конуса имеет значение $\bar{z} = z/x_0 = 1,5 \div 1,9$ (x_0 — половина ширины камеры). Это определяет перераспределение обоих вихрей, несмотря на то что форма нижнего из них (внешнего) выражена неявно. Тем не менее применение модели турбулентности SST обеспечивает большее по сравнению с моделью RSM SSG качественное соответствие экспериментальным результатам [6], а также позволяет описать деформацию обоих вихрей вдоль оси симметрии устройства с сохранением их пространственного масштаба. Таким образом, можно сделать вывод, что в случае стационарного решения SST-модель турбулентности позволяет более точно моделировать осредненную структуру течения в камере по сравнению с результатами (RSM SSG)-моделирования. Вследствие этого результаты моделирования структуры потока с использованием (RSM SSG)-модели турбулентности в нестационарной постановке далее не рассматриваются.

С целью определения мгновенных реализаций термогазодинамических параметров, а также их изменения во времени выполнены нестационарные расчеты процесса горения в модельной КС. Моделирование проводилось в интервале времени $\tau = 0,1$ с соответствующим шагом интегрирования 200 мкс. В качестве начального условия для всех нестационарных расчетов использовались распределения физических величин, определенные в рамках стационарного расчета по модели SST. Мгновенные реализации и осредненные распределения линий тока, полученные с использованием различных подходов, представлены на рис. 3.

Переход к нестационарной постановке и осреднение результатов в случае использования SST-модели турбулентности обеспечивает более симметричную и гладкую картину течения, что соответствует результатам эксперимента. Высота расширяющегося конуса закрученного течения составляет $\bar{z} = z/x_0 = 1,5$, причем нестационарное решение предсказывает некоторую кривизну его поверхности. Осреднение также приводит к тому, что

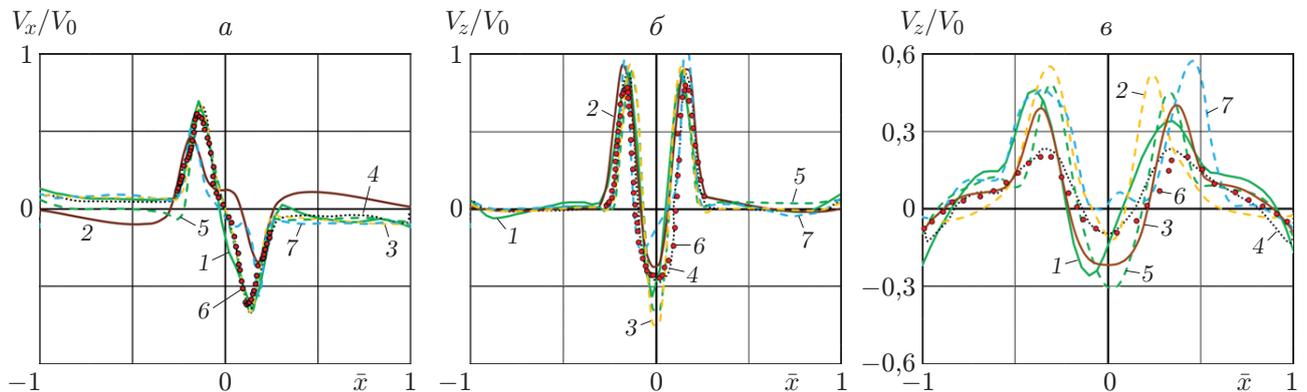


Рис. 4. Распределения компонент скорости V_x (а) и V_z (б, в) по ширине КС, полученные с использованием различных моделей для различных сечений: а, б — $\bar{z} = z/x_0 = 0,125$, в — $\bar{z} = z/x_0 = 0,750$; линии — расчет, точки — эксперимент; 1 — SST-модель (стационарный расчет), 2 — (RSM SSG)-модель, 3 — (SAS SST)-модель, 4 — LES-метод [7], 5 — SST-модель (нестационарный расчет), 6 — PIV-метод [6], 7 — DES-метод

вихревые структуры в приосевой области вблизи сопла не наблюдаются, а внутренний тороидальный вихрь несколько растянут вдоль оси камеры. Применение (SAS SST)-модели турбулентности также позволяет получить близкую к исходной картину линий тока (см. рис. 3, а). В целом данная модель предсказывает осредненную структуру закрученного потока, сопоставимую с нестационарным расчетом на стандартной модели SST, однако в проточной части камеры также наблюдаются вихревые структуры среднего масштаба, что обеспечивается применением концепции адаптируемых масштабов.

Результаты гибридного вихреразрешающего моделирования DES представлены на рис. 3, б, в. Видно, что внешний тороидальный вихрь незначительно поднимается по потоку и смещается к стенкам камеры, а внутренний имеет форму, наиболее соответствующую экспериментальным результатам [6]. Указанные особенности динамики внешнего вихря наблюдались в случае LES-моделирования [7]. Также наблюдается корреляция распределений полной скорости, полученной методами DES и LES. Это свидетельствует о том, что вихреразрешающая модель является более предпочтительной по сравнению с RANS-моделями турбулентности и позволяет получить результаты, близкие к экспериментальным. В целом можно сделать вывод, что нестационарная расчетная постановка позволяет описать общие закономерности газодинамики закрученного потока с существенно меньшими отклонениями значений скорости.

С целью проведения количественного анализа структуры потока в декартовой системе координат построены эпюры компонент скорости для значений относительной высоты $\bar{z} = z/x_0 = 0,125; 0,750$ (рис. 4). Представленные на рис. 4 зависимости подтверждают приведенные выше результаты качественного анализа структуры потока, полученные с помощью различных численных подходов. Видно, что при стационарной постановке результаты расчетов отличаются от экспериментальных данных более существенно, чем при нестационарной постановке. Также следует отметить, что применение SST-модели турбулентности как в стационарной, так и в нестационарной постановке приводит к увеличению значений осевой скорости возвратного течения (см. рис. 4, б, в). Кроме того, вследствие ограниченности экспериментальных данных, в частности отсутствия PIV-измерений поля скорости в условиях горения, расчетные распределения скорости на рис. 4 сравниваются с результатами эксперимента в изотермической нереагирующей постановке. В сечении

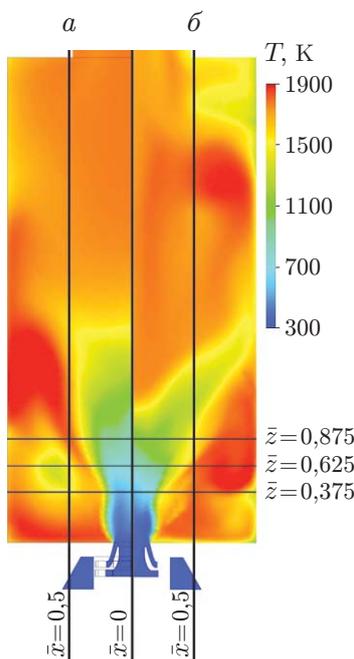


Рис. 5. Распределения температуры в КС, полученные при моделировании в стационарной RANS-постановке с использованием (RSM SSG)-модели (а) и SST-модели (б) турбулентности

$\bar{z} = z/x_0 = 0,125$ вследствие того, что воспламенение смеси в основном происходит ниже по потоку, такой подход является оправданным и позволяет продемонстрировать преимущества вихреразрешающего моделирования по сравнению с RANS-постановкой. Однако в сечении $\bar{z} = z/x_0 = 0,75$ различия изотермического и реагирующего потоков значительны, что приводит к увеличению максимальной скорости закрученного течения приблизительно в два раза. При этом, несмотря на допущения, принятые при сопоставлении зависимостей, подход, основанный на осреднении мгновенных реализаций, позволяет более точно предсказывать форму эпюр скорости, а также радиальное положение ее максимумов и минимумов.

С целью более детального анализа процесса горения в модельной КС проанализированы распределения температуры, полученные с помощью различных расчетных методов. На рис. 5 показаны распределения температуры, полученные в стационарной постановке с использованием RANS-моделей турбулентности SST и RSM SSG. Видно, что в ядре потока распределение температуры является достаточно равномерным, а в области внешнего тороидального вихря наблюдаются значительные неоднородности. По мере раскрытия закрученного течения поле температуры выравнивается, достигая максимальной равномерности вблизи выходного сечения КС, что свидетельствует об эффективности данной схемы горения топлива.

Анализ результатов, полученных с использованием (RSM SSG)- и SST-моделей турбулентности, позволяет сделать следующие выводы. Структура реагирующего течения в КС, представленная ранее в виде линий тока, оказывает существенное влияние на формирующееся поле температуры. При этом геометрическая форма закрученного течения непосредственно определяет локализацию зон повышенной температуры, а следовательно, интенсивность протекания химических реакций. На рис. 5, а показано, что для (RSM SSG)-модели максимальная температура ($T = 1900$ К) наблюдается в области, ограниченной координатами $1,1 < \bar{z} < 2,0$ и $0,5 < \bar{r} < 1,0$, что обусловлено вытянутой формой внешнего

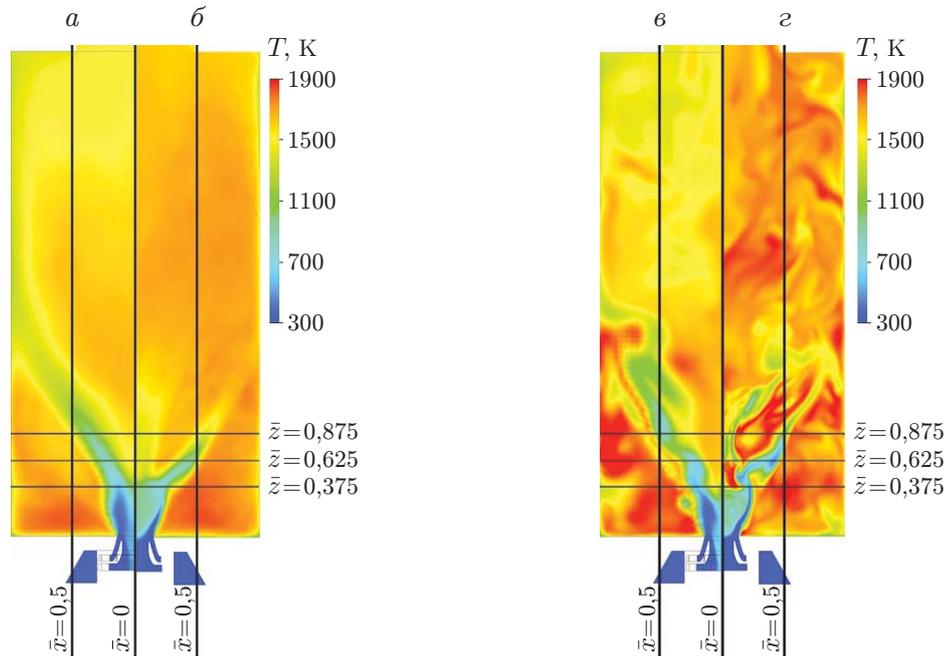


Рис. 6. Распределения температуры в продольном сечении КС, полученные в нестационарной постановке с использованием модели турбулентности SAS SST (*а, в*) и подхода DES (*б, г*):

а, б — осредненное распределение; *в, г* — мгновенная реализация

тороидального вихря. В то же время результаты стационарного расчета по SST-модели турбулентности (см. рис. 5,б) показывают, что максимальная температура наблюдается в области с координатами $0,50 < \bar{z} < 1,25$ и $0,6 < \bar{x} < 1,0$, что совпадает с положением внешнего тороидального вихря, показанного на рис. 2,б. При этом наличие более выраженного возвратного течения приводит к увеличению температуры в центре КС, что обусловлено интенсивным теплообменом между зоной рециркуляции и внутренним вихрем. Качественный анализ распределений температуры на рис. 5 также свидетельствует о том, что процессы, происходящие в модельной КС, являются существенно нестационарными и требуется изучение их динамики во времени. Соответствующие мгновенные реализации и осредненные распределения температуры, полученные в рамках нестационарного моделирования с использованием различных численных подходов, показаны на рис. 6.

Форма мгновенных реализаций позволяет получить представление о значительных изменениях масштаба моделируемых вихрей и пульсаций. Сравнение полей температуры показывает, что в случае нестационарного моделирования максимальная температура в области горения незначительно уменьшается. Этот результат подтверждается экспериментальными данными [6]. Анализ осредненных полей температуры, полученных с помощью моделей SST и SAS SST, позволяет сделать вывод, что эти поля близки, незначительные различия наблюдаются лишь в области низких температур, где реакции горения практически не протекают. Расчет по (SAS SST)-модели турбулентности прогнозирует проникание возвратного приосевого течения в ядро закрученного потока на большую глубину (см. рис. 6,в). При DES-моделировании (см. рис. 6,б,г) течение наиболее нестабильно, что проявляется в его несимметричности, возникающей вследствие более раннего распада закрутки потока. Это приводит к тому, что умеренные ($T < 700$ K) температуры вблизи сопла занимают существенно меньшую область по сравнению с полученной в расчетах в RANS-постановке. Результаты расчетов, полученные на основе реализации различных численных подходов, а также данные бесконтактного эксперимента приведены на рис. 7, 8.

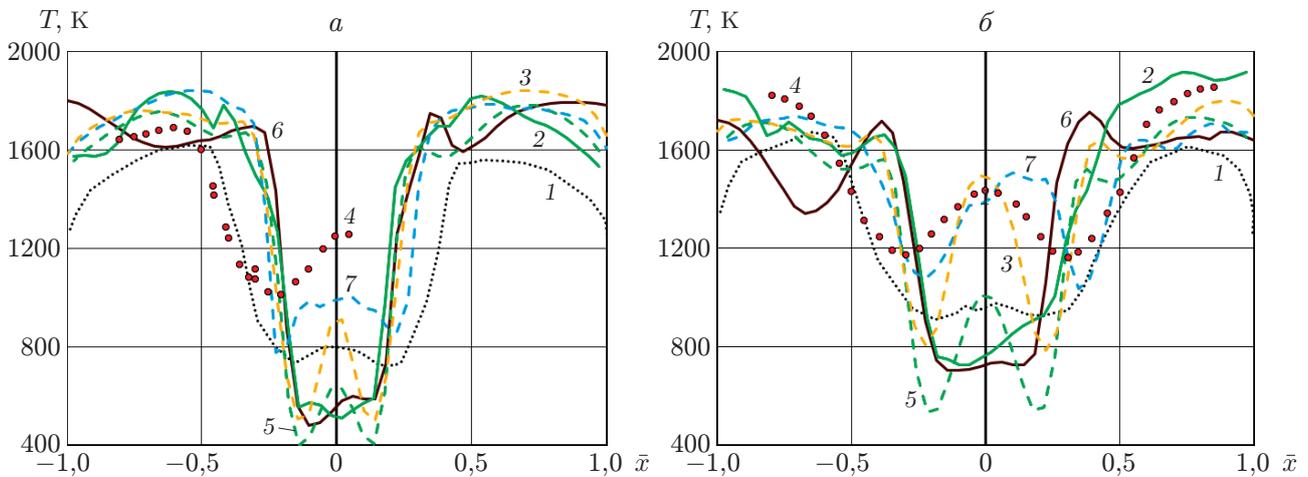


Рис. 7. Распределения температуры в сечениях КС $\bar{z} = 0,375$ (а) и $\bar{z} = 0,625$ (б), полученные с использованием различных методов: линии — расчет, точки — эксперимент; 1 — LES-метод [7], 2 — SST-модель (стационарный расчет), 3 — (SAS SST)-модель, 4 — CH*-метод [6], 5 — SST-модель (нестационарный расчет), 6 — (RSM SSG)-модель, 7 — DES-метод

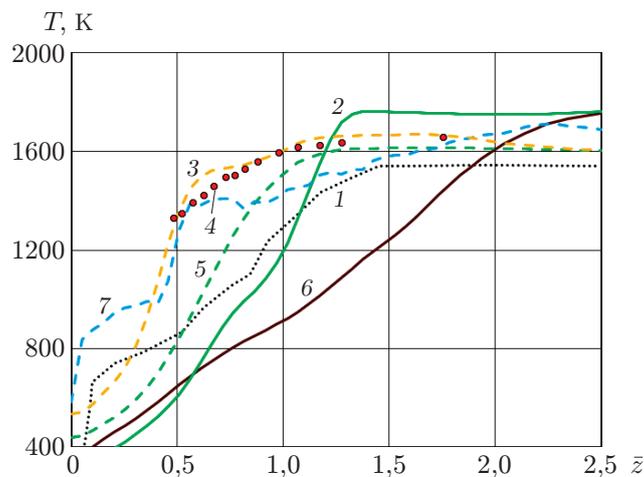


Рис. 8. Распределения температуры по высоте КС в сечении $\bar{x} = 0$, полученные с использованием различных методов: линии — расчет, точки — эксперимент; 1 — LES-метод [7], 2 — SST-модель (стационарный расчет), 3 — (SAS SST)-модель, 4 — CH*-метод [6], 5 — SST-модель (нестационарный расчет), 6 — (RSM SSG)-модель, 7 — DES-метод

Анализ распределений температуры показывает, что в периферийной части КС ($\bar{x} > 0,5$) наблюдается качественное и удовлетворительное количественное согласование экспериментальных и расчетных данных. Среднеквадратичное отклонение результатов расчета с использованием различных численных подходов от экспериментальных данных в указанной области не превышает 10 %. При этом конкретный вид эпюр температуры, как указывалось выше, обеспечивается формой и положением тороидальных вихревых структур, а также величиной угла раскрытия основного закрученного течения. Наиболее существенные различия распределений температуры имеют место в приосевой области КС. Результаты эксперимента [6] свидетельствуют о том, что вблизи оси камеры наблюдается локальный максимум температуры, абсолютные значения которого увеличиваются

по мере удаления от закручивающего аппарата в положительном направлении координаты z . При этом на некотором удалении от центральной оси ($0,2 < \bar{x} < 0,4$) отмечается уменьшение температуры до минимального значения, что соответствует области закрученного потока, имеющей коническую форму. Таким образом, поперечное распределение температуры в модельной КС имеет W-образную форму, характеризующуюся наличием локальных максимумов и минимумов в периферийной области устройства. Тем не менее приведенные на рис. 7, 8 кривые, полученные с использованием вихререзрешающего подхода LES, недостаточно точно описывают температурное поле в центре камеры. В этой области наблюдаются практически постоянные расчетные значения температуры со слабовыраженным максимумом в центре зоны горения. Поскольку экспериментальные и расчетные (LES) распределения скорости в указанной части КС достаточно хорошо согласуются, можно сделать вывод об определяющем влиянии модели горения и химической кинетики. Таким образом, наиболее вероятной причиной различия распределений температуры, полученных в расчете с помощью LES-метода и экспериментальным путем, является предположение авторов [7] о том, что скорости химических реакций лимитируют процесс горения в рассматриваемой области, а число Дамкелера $Da < 1$. В приосевой зоне закрученного течения процесс горения, очевидно, развивается по диффузионному сценарию, вследствие чего использование модели Flamelet является более целесообразным.

Рассмотренный выше подход к моделированию процесса горения реализован при численном моделировании методом DES. Из рис. 3, 4 следует, что структура течения, предсказываемая в данной расчетной постановке, практически полностью соответствует экспериментальным результатам и данным LES-моделирования. В случае использования подхода на основе моделей DES и Flamelet распределения температуры качественно и количественно согласуются с данными эксперимента. На оси камеры среднеквадратичное отклонение не превышает 20 %, или 250 К, на периферии различия не превышают 7 %, или 170 К. Наибольшее различие результатов эксперимента и DES-моделирования, имеющее место вблизи оси устройства, по-видимому, обусловлено недостаточно точным определением структуры течения в данной области. Учитывая значительную нестационарность течения в КС, а также возникающую прецессию вихревого ядра, отмеченную в работе [7], повысить точность моделирования можно путем увеличения общего времени расчета. Однако для этого требуются дополнительные вычислительные ресурсы.

Большое значение имеет анализ результатов расчетов, полученных в RANS-постановке, поскольку данный подход в настоящее время наиболее часто используется в инженерной практике при создании КС различных установок. Результаты стационарных расчетов с использованием моделей турбулентности RSM SSG и SST показывают, что последняя обеспечивает меньшее отклонение относительно экспериментальных точек. При этом в обоих случаях распределения температуры более близки к результатам LES-моделирования, чем к данным эксперимента, о чем свидетельствует отсутствие локального максимума в центральной зоне КС. Также на рис. 7 видно, что в приосевой области имеют место расчетные температуры, значения которых существенно меньше полученных в эксперименте и при LES-моделировании, а среднеквадратичные отклонения достигают 63 % в случае использования (RSM SSG)-модели и 58 % — в случае SST-модели. При $\bar{z} > 1,0$ в зоне циркуляции внутреннего вихря (RSM SSG)-модель также дает наибольшую погрешность, достигающую 30 %, в то время как другие используемые RANS-модели достаточно точно предсказывают распределение температуры, среднеквадратичное отклонение не превышает 7 % (см. рис. 8).

При переходе к нестационарной постановке для модели турбулентности SST точность определения профилей температуры увеличивается. Однако это в большей степени отно-

сится к качественному описанию процесса горения: в приосевой области КС имеет место локальный максимум, а при смещении в область конического закрученного течения, где химические реакции протекают медленно, наблюдаются минимумы температуры. Тем не менее в окрестности относительной координаты $\bar{z} < 0,375$ различие расчетных и экспериментальных данных может достигать 50 %, а в области минимума температуры — 60 %, что в абсолютных единицах соответствует $550 \div 600$ К.

Использование (SAS SST)-модели турбулентности при анализе процессов в периферийной части КС позволяет получить картину, близкую к картине в случае использования классической SST-модели в нестационарной постановке, что обеспечивает качественное описание распределений температуры в анализируемых сечениях. При этом температура в центре камеры определяется более точно, максимальные среднеквадратичные отклонения не превышают 30 %, за исключением области минимальной температуры, где различие с экспериментальными данными достигает 50 %.

Таким образом, распределения скорости и температуры в периферийной части КС с высокой степенью точности разрешаются с помощью всех рассмотренных расчетных методов. При этом результаты моделирования свидетельствуют о преимуществе нестационарной постановки. Адекватность прогнозирования распределения температуры в центральной части модельной КС в основном обеспечивается корректностью определения структуры закрученного течения. Вследствие того что RANS-модели турбулентности не обеспечивают достаточной точности разрешения возвратного приосевого течения [21], полученные значения скорости существенно отличаются от экспериментальных данных. Это приводит к формированию поля температуры, в котором занижены значения как в области приосевого течения, так и в области его взаимодействия с основным закрученным потоком. В этом случае точность расчетов можно повысить путем использования гибридного вихреразрешающего моделирования DES либо модели адаптивных масштабов SAS SST. Данные подходы более точно моделируют нестационарную структуру закрученного течения, что определяет качественное и практически полное количественное соответствие полученных с их использованием результатов данным бесконтактного эксперимента.

Заключение. Численное исследование рабочего процесса в КС с двухрядным фронтальным закручивающим устройством позволило выявить особенности использования различных моделей турбулентности, а также вихреразрешающих подходов с точки зрения корректного описания распределений скорости и температуры в зоне горения. Это позволяет сделать следующие основные выводы.

Наиболее сложной для прогнозирования теплофизических характеристик является приосевая область закрученного реагирующего потока, в которой протекают процессы смещения, воспламенения, имеют место возвратное рециркуляционное течение, а также согласно [7] прецессия вихревого ядра. Применение стационарной RANS-постановки в этом случае не является целесообразным и приводит к увеличению среднеквадратичного отклонения скорости и температуры до 60 %.

RANS-расчеты в нестационарной постановке позволяют значительно повысить точность определения теплофизических параметров в центральной части КС и уменьшить среднеквадратичное отклонение в ядре потока до 50 %. Это обусловлено тем, что большинство RANS-моделей турбулентности недостаточно точно описывают возвратное приосевое течение.

Наилучшее соответствие экспериментальных и расчетных результатов имеет место при использовании вихреразрешающей постановки, корректно моделирующей крупномасштабные вихревые структуры в центральной части КС. Адекватные результаты получены также в случае применения метода адаптивных масштабов в рамках модели SAS SST. С учетом снижения необходимых вычислительных затрат, а также приемлемых требова-

ний к сеточной дискретизации данный подход можно использовать для проведения инженерных расчетов при разработке и исследовании КС различных энергоустановок.

Сравнение результатов расчетов с использованием подходов LES-FRC и DES-Flamelet показывает, что выбор модели горения и кинетики протекания химических реакций оказывает большое влияние на распределение температуры, а следовательно, на динамику фронта пламени. Коаксиальная подача топлива и закрученного воздуха через фронтное устройство КС приводит к формированию областей $Da < 1$, вследствие чего модели конечной скорости химической реакции дают заниженные значения температуры горения по сравнению с экспериментальными данными. В то же время использование модели диффузионного горения приводит к некоторому завышению значений температуры на периферии КС ($\bar{x} > 0,3$), а также в области значений относительной высоты $\bar{z} > 1,7$. Возможным решением данной проблемы является применение комбинированных моделей, например EDM-FRC, а также моделей турбулентного горения, в частности BVM. Для этого необходимо провести дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lefebvre A. H.** Gas turbine combustion: Alternative fuels and emissions / A. H. Lefebvre, D. R. Ballal. Boca Raton: CRC Press, 2010.
2. **Khosravy el Hossaini M.** Review of the new combustion technologies in modern gas turbines // Progress in gas turbine performance / Ed. by E. Benini. L.: InTech Open, 2013.
3. **Dulin V., Chikishev L., Sharaborin D., et al.** On the flow structure and dynamics of methane and syngas lean flames in a model gas-turbine combustor // Energies. 2021. V. 14, N 24. 8267.
4. **Ruan C., Chen F., Yu T., et al.** Experimental study on flame/flow dynamics in a multi-nozzle gas turbine model combustor under thermo-acoustically unstable condition with different swirler configurations // Aerospace Sci. Technol. 2020. V. 98. 105692.
5. **Sung Y., Choi G.** Non-intrusive optical diagnostics of co- and counter-swirling flames in a dual swirl pulverized coal combustion burner // Fuel. 2016. V. 174. P. 76–88.
6. **Grohmann J., O’Loughlin W., Meier W., Ainger M.** Comparison of the combustion characteristics of liquid single-component fuels in a gas turbine model combustor // Combustion, fuels and emissions. V. 4A. Seoul: ASME, 2016. V04AT04A010.
7. **Eckel G., Grohmann J., Cantu L. M. L., et al.** LES of a swirl-stabilized kerosene spray flame with a multi-component vaporization model and detailed chemistry // Combust. Flame. 2019. V. 207. P. 134–152.
8. **Amaya J.** Unsteady coupled convection, conduction and radiation simulations on parallel architectures for combustion applications: PhD Thesis. Toulouse: Inst. Nat. Polytech. de Toulouse, 2010.
9. **Badernikov A. V., Piralishvily S. A., Guryanov A. I.** Results of numerical modeling of combustion processes in a vortex chamber // MATEC Web Conf. 2018. V. 209. 00023.
10. **Spalart P. R., Shur M.** On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature // Aerospace Sci. Technol. 1997. V. 1, N 5. P. 297–302.
11. **Smirnov P. E., Menter F. R.** Sensitization of the SST turbulence model to rotation and curvature by applying the Spalart — Shur correction term // J. Turbomachinery. 2009. V. 131, N 4. 041010.
12. **Sun Y., Cai T., Shahsavari M., et al.** RANS simulations on combustion and emission characteristics of a premixed NH_3/H_2 swirling flame with reduced chemical kinetic model // Chinese J. Aeronaut. 2021. V. 34, N 12. P. 17–27.

13. **Taamallah S., Dagan Y., Chakroun N., et al.** Helical vortex core dynamics and flame interaction in turbulent premixed swirl combustion: A combined experimental and large eddy simulation investigation // *Phys. Fluids*. 2019. V. 31, N 2. 025108.
14. **Prokhorov D. A., Piralishvili Sh. A.** Numerical simulation of pulverized coal combustion and comparison with in-furnace measurements // *AIP Conf. Proc.* 2020. V. 2211. 040008.
15. **Evdokimov O. A., Prokhorov D. A., Guryanov A. I., et al.** A study of flame and flow structures and their effect on emission properties in a bidirectional vortex pulverized peat combustor // *Fuel*. 2021. V. 291. 120120.
16. **Benim A. C., Deniz Canal C., Boke Y. E.** A validation study for RANS based modelling of swirling pulverized fuel flames // *Energies*. 2021. V. 14, N 21. 7323.
17. **Piralishvili Sh. A., Markovich D., Lobasov A., et al.** Simulation of the working process of a supersonic combustor with a vortex igniter-stabilizer // *J. Engng Phys. Thermophys.* 2016. V. 89, N 5. P. 1325–1332.
18. **Lobasov A., Sharaborin D., Dulin V., et al.** Investigation of unsteady reacting flow in a swirl burner by planar optical techniques and POD // *THMT-15: Proc. of the 8th Intern. symp. on turbulence heat and mass transfer, Sarajevo (Bosnia and Herzegovina), Sept. 15–18, 2015. S. 1.: Begellhouse, 2015. P. 459–462.*
19. **Abramzon B., Sirignano W.** Droplet vaporization model for spray combustion calculations // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 1989. V. 32, iss. 9. P. 1605–1618.
20. **Wang P., Platova N. A., Fröhlich J., Maas U.** Large Eddy Simulation of the PRECCINSTA burner // *Intern. J. Heat Mass Transfer*. 2014. V. 70. P. 486–495.
21. **Evdokimov O., Prokhorov D., Guryanov A., Veretennikov S.** Transient numerical simulations of a cold-flow bidirectional vortex chamber // *Phys. Fluids*. 2022. V. 34, N 1. 015123.
22. **Лобасов А. С., Чикишев Л. М., Дулин В. М., Маркович Д. М.** Когерентные структуры и турбулентный перенос на начальном участке струй и пламени в потоке с закруткой // *ПМТФ*. 2020. Т. 61, № 3. С. 42–51.
23. **Palkin E. V., Hrebtov M. Yu., Slastnaya D. A.** Influence of a central jet on isothermal and reacting swirling flow in a model combustion chamber // *Energies*. 2022. V. 15, N 5. 1615.
24. **Spalart P. R.** Strategies for turbulence modelling and simulations // *Intern. J. Heat Fluid Flow*. 2000. V. 21, iss. 3. P. 252–263.
25. **Speziale C. G., Sarkar S., Gatski T. B.** Modelling the pressure — strain correlation of turbulence: an invariant dynamical systems approach // *J. Fluid Mech.* 1991. V. 227. P. 245–272.
26. **Снегирев А. Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений. СПб.: С.-Петербург. гос. политехн. ун-т, 2009.
27. **Menter F., Kuntz M., Bender R.** A scale-adaptive simulation model for turbulent flow predictions. Reno, 2003. (Paper / AIAA; N 2003-0767).
28. **Peters N.** Laminar diffusion flamelet models in non-premixed turbulent combustion // *Progr. Energy Combust. Sci.* 1984. V. 10, N 3. P. 319–339.
29. **Guryanov A. I., Evdokimov O. A., Guryanova M. M., et al.** Criterion analysis and experimental study of combustion mechanisms in a bidirectional swirling flow and their relationship with pollutants emission // *Intern. J. Energy Res.* 2021. V. 45, N 4. P. 5500–5516.
30. **Pope S. B.** PDF methods for turbulent reactive flows // *Progr. Energy Combust. Sci.* 1985. V. 11, N 2. P. 119–192.

*Поступила в редакцию 22/III 2022 г.,
после доработки — 15/VI 2022 г.
Принята к публикации 27/VI 2022 г.*