УДК 621.45:66.011:532.517.4 EDN WFCCTT

Обзор моделей горения, применяемых для исследования физико-химических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей

© М.А. Савин

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
Пермь, 614990, Российская Федерация

Приведен обзор основных моделей горения, доступных как в коммерческих инженерных пакетах, так и пакетах с открытым исходным кодом, которые применяются для численного анализа различных процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. Дана краткая теоретическая информация о двух основных подходах (перенос реагирующих веществ и модель флеймлетов) и о включенных в них моделях, а именно модели распада вихря, модели комплексной химии, модель утолщенного пламени, модель ламинарного флеймлета и др. Для каждой модели горения указаны главные особенности и области применимости, а также изложены их основные преимущества и недостатки. Поскольку горение топлива в авиационных камерах сгорания неразрывно связано с газодинамикой потока, продемонстрировано влияние моделей турбулентности на общее качество решения. Анализ доступных литературных источников позволил составить главные направления моделирования для камер сгорания газотурбинных двигателей, среди которых исследование: эмиссии вредных веществ (NOx, COx, UHC, сажа и дым); температурной неравномерности; качества распыла топлива и охлаждения стенок жаровой трубы камеры сгорания. Путем обобщения информации для каждого направления исследований получены наиболее часто используемые комбинации моделей горения и моделей турбулентности. Вполне ожидаемо, что чаще всего применяются простые модели горения типа распада вихря с известными полуэпмирическими RANS-моделями турбулентности (k—ω SST, RNG k—ε и др.). Это обычно обусловлено требованиями к высокой скорости проведения расчетов и низкой вычислительной затратности. Вся полученная в ходе подготовки обзора информация позволила сформулировать общие выводы и рекомендации по проблеме моделирования горения жидких и газообразных топлив в камерах сгорания газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: *модели горения, Eddy Break-Up, Finite Rate Chemistry, Flamelet, модели турбулентности, LES, RANS, камеры сгорания, газотурбинные двигатели*

Введение. Цель данной работы — отыскание оптимального сочетания моделей горения и турбулентности для расчета процессов сгорания топлива в камерах сгорания (КС) газотурбинных двигателей (ГТД) на основе анализа и систематизации доступных литературных данных и рекомендаций инженерных вычислительных приложений.

Процесс сгорания топлива в КС ГТД все еще остается одним из наиболее сложных в плане компьютерного моделирования, так как объединяет в себе проблемы турбулентного и химического взаимодействия веществ, которые с трудом поддаются численному анализу из-за отсутствия точных аналитических моделей. И если для турбулентного

взаимодействия есть возможность получить точное решение, хотя и с большими вычислительными затратами (прямая модель, Direct Numerical Simulation (DNS), с точностью до масштаба Колмогорова) [1, 2], то модели горения топлив строго полуэмпирические. Изменение типа горения топлива в КС в зависимости от режима работы ГТД еще сильнее усложняет задачу.

В идеале полагают, что горение в КС газотурбинных двигателей должно быть кинетическим, гомогенным и турбулентным [3]. Это объясняют тем, что идеальная форсунка должна распылять топливо до мельчайших капель, моментально испаряющихся при попадании в зону горения. В результате турбулентного перемешивания с окислителем горючая смесь быстро достигает стехиометрического состава, поджигается и сгорает со скоростью, определяемой химической кинетикой.

На практике горение часто оказывается гетерогенным [3, 4] — нагрев с последующим испарением капель занимает существенное время, что не дает возможности сжигать топливо и окислитель при одинаковом агрегатном состоянии. Длительное испарение капли приводит к диффузному механизму горения. Таким образом, скорость процесса сгорания топлива в КС начинает определяться скоростями следующих процессов:

1) нагрев капли и испарение топлива с ее поверхности;

2) взаимная диффузия паров топлива, окислителя и продуктов сгорания;

3) реакции горения топливной смеси у поверхности капли (химическая кинетика).

Иными словами, скорость сгорания топлива будет равна скорости протекания самого медленного процесса из указанных. В основе протекания первых двух процессов лежит теория конвективного тепломассообмена и газодинамики потока. Интенсивность турбулентности напрямую влияет на скорость процесса испарения, изменяя коэффициент теплоотдачи на поверхности капли горючего [3], и на скорость диффузии за счет масштаба турбулентности и количества вовлекаемого в процесс вещества. Третий процесс полностью определяется химической термодинамикой и химической кинетикой. Это позволяет выделить два основных подхода к моделированию задач горения [5–7]:

- перенос реагирующих веществ — при существенном влиянии гидрогазодинамики потока на химическое взаимодействие компонентов;
- исследование простых тонких ламинарных пламен (флеймлетов) — при сложной химической кинетике.

В то же время глобально выбор подхода к моделированию основывается на критерии подобия химических процессов — числе

Дамкёлера $\left(\mathrm{Da} = \tau_{turb}/\tau_{chem}\right)$, являющимся безразмерным отношением временных масштабов турбулентности τ_{turb} и химического взаимодействия τ_{chem}. Так, при числах Дамкёлера менее 1 начинает увеличиваться время протекания химических реакций, а смешивание компонентов осуществляется крайне быстро. Это свидетельствует об интенсивной турбулентности и необходимости использования первого подхода [8].

Основные подходы и их модели. Модели переноса реагирующих веществ предполагают прямое совместное разрешение уравнений химической кинетики, термодинамики и переноса в каждом контрольном объеме расчетной области для всех взаимодействующих компонентов [6]. Неравномерность температур, турбулентного взаимодействия, скоростей реакций внутри контрольного объема обычно осредняется с поправками. Причем, поправки получают дополнительными подсеточными моделями, оценивают по турбулентной диффузии веществ между контрольными объемами либо заменяют критериями временных масштабов процессов (например, числом Da). В случае использования LES-модели турбулентности (Large Eddy Simulation) ошибка от неравномерности температур, ведущая к некорректному вычислению скоростей химических реакций, стремится к минимуму с измельчением сетки. Иначе говоря, все меньше вихрей оказывается меньше масштаба сетки, все меньше долей компонентов осредняется, и прямые расчеты ведутся для большего объема исследуемой области. При использовании RANS-моделей (Reynolds-Averaged Navier–Stokes) такого никогда не произойдет из-за осреднения пульсационных величин, что является сутью этих моделей [6, 9].

Модели флеймлетов (flamelets) строятся на предположении возможности описания любого турбулентного пламени набором простых, элементарных ламинарных пламен [10]. Для таких моделей требуются заранее подготовленныех параметризованные данные по заданному количеству реакций. Эти данные — таблицы флеймлетов — содержат информацию о температурах, энтальпиях, вязкостях, долях компонентов и т. п., полученные в ходе нульмерного или одномерного моделирования с указанными исходными веществами. Связь между таблицами флеймлетов и газодинамическим моделированием формируется с помощью специального вектора параметризации, количество параметров в котором зависит от конкретной модели флеймлета [6]. Моделям флеймлетов требуется меньше вычислительных ресурсов, так как они используют меньше уравнений переноса из-за предварительного расчета химической кинетики. Сам расчет термохимического состояния рабочего тела может быть проведен и вовсе отдельно — в специализированных программных средах.

Для расчета горения топлива в КС газотурбинных двигателей применимы оба подхода, но при детальном анализе моделей каждого

из них оказывается, что не все из них допустимы и (или) удобны для использования в инженерной практике.

RST-подход. Для подхода, предполагающего перенос реагирующих веществ (RST — Reacting Species Transport), существует три основных модели горения: модель распада вихря, комплексная химия и модель утолщенного пламени.

Модель распада вихря (Eddy Break-Up (EBU), или Eddy dissipation model (EDM)) — одна из самых простых, не требовательных к ресурсам моделей горения, основанная на разрешении уравнения переноса с учетом энергии химического источника, но без его детальной химической кинетики [11, 12]. Ее целесообразно применять для камер сгорания ГТД, если в них реализуются Da > 1 для предварительно смешанных топлив. Иначе говоря, полагают, что топливо сразу же сгорает, как только достигается стехиометрическое соотношение между горючим и окислителем в контрольном объеме. Набор реактантов и продуктов реакций, а также стехиометрические коэффициенты для них в EDM задаются явно, что позволяет избежать работы с различными термохимическими таблицами. Масштаб реакций горения τ_F, в химической кинетике определяемый скоростями прямых и обратных реакций, здесь полностью зависит от масштаба турбулентности τ_{turb}, массовых долей горючего Y_F и окислителя Y_{o}, а также от функции источника окислителя s_{o}, например, так [6, 13, 14]:

$$\tau_F = -\frac{\rho}{M_{wF}}\left(\frac{1}{\tau_{turb}}\right) A_{ebu} \min\left(Y_F, \frac{Y_{\text{o}}}{s_{\text{o}}}\right),$$

где A_{ebu} — константа скорости реакции.

Масштаб τ_F определяется среди прочего и природой самого топлива через плотность ρ и молярную массу M_{wF}. Таким образом, выбор модели турбулентности напрямую влияет на горение через масштаб турбулентности. Различные уточнения модели позволяют изменять скорость реакций горения, что обычно недоступно для классической EBU, использующей явную константу скорости A_{ebu}.

Одной из таких моделей является ***модель ограниченной химии*** (Finite Rate Chemistry (FRC)), в которой масштаб химической кинетики корректируется в соответствии с уравнением Аррениуса. Другими словами, химический источник становится не функцией массовых долей компонентов, а функцией скоростей химических реакций. Модель оказывается сложнее стандартной диссипации вихря, требуется больше информации о компонентах (константы Аррениуса, энергия активации и др.), но при этом оказывается гораздо точнее.

Комплексная химия (Complex Chemistry, CC) — это целый класс наиболее сложных моделей горения, позволяющих рассчитывать как стационарное, установившееся горение, так и переходные процессы (затухание, воспламенение). Последнее на практике является следствием смены режима работы камеры сгорания, в том числе выхода на нерасчетный режим. CC-модели производят совместное решение уравнений переноса энергии (Y_i — массовая доля компонента; t — время; x_i — координата пространства; ρ — плотность; F_{kj} — диффузионный поток; u_j — компонента скорости среды):

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho u_j Y_i + F_{kj}\right) = \omega_i \qquad (1)$$

и уравнений химической кинетики для скоростей реакций ω_i каждого компонента горючей смеси. Для решателя химической кинетики используется подробная информация о комплексной химии (реакции и их механизмы, термодинамика, свойства и т. д.). Она обычно предоставляется в виде Chemkin-библиотек [15–17].

Основная сложность заключается в том, что указанные библиотеки могут содержать тысячи реакций для взаимодействия выбранного горючего и окислителя, а сами CC-модели, как правило, используются вместе с LES, DES (Detached Eddy Simulation) или даже DNS-моделями турбулентности для точного определения скоростей потока, концентраций компонентов и их диффузии. С этой сложностью, являющейся основным недостатком модели, связано и ее главное преимущество — возможность использования многокомпонентного, в том числе многофазного горючего. Связь между турбулентным переносом и химической кинетикой в CC-моделях обеспечивается дополнительными моделями: концепцией распада вихря, концепцией ламинарного пламени или химическим равновесием. Все они по-своему изменяют скорость реакции ω_i в (1). Например, концепция распада вихря по аналогии с EBU-моделью вводит зависимость скорости ω_i от турбулентной вязкости и масштаба турбулентности [6].

Для прецизионных расчетов, связанных с ГТД, наибольшее значение имеет модель комплексной химии, прогнозирующая скорость распространения фронта турбулентного пламени (Burning Velocity Model (BVM) или Turbulent Flame Closure (TFC)). Модель предполагает взаимодействие перемешанных как полностью, так и частично горючих смесей, причем до фронта пламени существуют два компонента: горючее и окислитель, а после фронта — только продукты сгорания. Положение фронта и его распространение, т. е. решение основной задачи моделирования, проводится с помощью уравнения

переноса для переменной прогресса реакции c. Эта переменная определяет состояние топливной смеси; если все топливо прореагировало с окислителем, $c = 1$, а если реакции не начались, $c = 0$. В результате вид уравнения может быть, например, таким [6, 14, 18]:

$$\frac{\partial \rho Y_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \mathbf{v} Y_i\right) - \nabla \cdot \left(\rho D \nabla Y_i\right) = F_{tfc} \rho \dot{\omega}_i, \tag{2}$$

$$\dot{\omega}_{Y_c} = -\rho_u \mathbf{S}_t \cdot \nabla Y_c + \left(1 - c\right) \rho_u \mathbf{S}_t \cdot \nabla Y_c^u + c \rho_u \mathbf{S}_t \cdot \nabla Y_c^{eq},$$

где $\mathbf{v}$ — вектор скорости потока; D — диффузионный член, определяемый турбулентной вязкостью; F_{tfc} — поправка к скорости реакции относительно модели комплексной химии; $\dot{\omega}_i$ — член источника реакции для i-й компоненты смеси; Y_i — массовая доля компонента; t — время; ρ — плотность.

Различия в записях данной математической постановки между популярными инженерными пакетами минимальны и сводятся к описанию коэффициента диффузии либо всей правой части уравнения (2) [13, 14, 19].

Химический источник $\dot{\omega}$ в TFC, помимо равновесной Y_c^{eq}, начальной Y_c^u и текущей Y_c массовых долей продуктов сгорания, определяется плотностью несгоревших продуктов ρ_u и вектором скорости турбулентного пламени $\mathbf{S}_t$, что приводит к дополнительным моделям, позволяющим оценить его распределение [19]. Основными, наиболее часто применяемыми, являются вероятностная модель Зимонта, предполагающая логнормальное распределение скоростей в турбулентном пламени [20], и эмпирическая модель Петерса [21]. Наряду с ними существуют аппроксимационные модели, предложенные М. Метгльчи (M. Metghalchi) и Дж.К. Кек (J.C. Keck), а также эмпирические модели, построенные на данных физических экспериментов, например, модель Гюльдера (Ö.L. Gülder).

Таким образом, модели комплексной химии хотя и позволяют наиболее точно спрогнозировать горение, из-за своей сложности и высоких требований к вычислительным ресурсам оправданы лишь в расчетах горения топлива в КС ГТД в исследовательских целях.

Модель утолщенного пламени (TFM — Thickened Flame Model) также доступна для исследования процессов горения в ГТД в рамках RST-подхода. Основная идея модели заключается в прогнозировании местоположения фронта пламени с помощью физической расчетной сетки, для чего сам фронт искусственно утолщают до сеточного масштаба. Для системы уравнений модели меняется описание химического источника (правые части уравнений (1) и (2)) и диффузионного

члена — появляется зависимость от величины утолщения фронта пламени [22].

Таким образом, сетка должна быть довольно густой в области фронта, в том числе и по причине частого использования LES-, DES-моделей, а реже и DNS-моделей турбулентности [22, 23]. При искусственном утолщении пламени уменьшается число Дамкёлера, поэтому для сохранения масштабов времени химических процессов вводится коррекция с помощью вероятностных или аппроксимационных моделей [6, 24]. В результате TFM-модель является компромиссом между EBU-моделью и моделями комплексной химии. Она может дать приемлемые результаты на значительно более грубых сетках, чем у классических CC-моделей, особенно в случае адаптивных сеток, и при этом допускает использование упрощенной химической кинетики, по аналогии с EBU- и FRC-моделями.

Тонкие пламена (Flamelet-подход). При обычном моделировании горения участвующие в реакциях компоненты редко оказываются в том же состоянии, данные для которого имеются в таблицах флеймлетов. Поэтому еще одной особенностью моделей флеймлетов (помимо таблиц и вектора параметризации) является применение функции плотности вероятности (Probability Density Function — PDF) для параметров состояния (скоростей, температур, концентраций) [10, 25], позволяющей моментально получить необходимую информацию для конкретной реакции в моделируемом турбулентном потоке. Иначе говоря, PDF позволяет уточнить данные вектора параметризации, связывающего газодинамику с химической кинетикой, включив в рассмотрение статистические колебания долей компонентов и дисперсию функции прогресса реакций. Таким образом, все модели флеймлетов оказываются вероятностными моделями горения. Обычно в коммерческих инженерных пакетах доступно три основных модели: Flamelet Generated Manifold, модель химического равновесия и модель ламинарного пламени.

Flamelet Generated Manifold (FGM) — стандартная наиболее точная модель ламинарных пламен, допустимая при расчете горения в ГТД. Изначально была создана для исследования горения предварительно перемешанной либо частично перемешанной горючей смеси при больших и малых числах Дамкёлера $(\mathrm{Da} > 1,\ \mathrm{Da} < 1)$ [10]. Основу модели составляет стандартное уравнение переноса энергии, разрешаемое относительно массовой доли топливных компонентов, корректируемой PDF. Для оценки хода реакций горения и параметров состояния компонентов используется энтальпийный вектор параметризации таблицы флеймлетов [26]. Как и BVM-модель комплексной химии, FGM-модель учитывает функцию прогресса реакций, поэтому в ней доступно исследование процессов затухания

и воспламенения, чего нет в других, более простых моделях флеймлетов [6, 13, 14].

Модель химического равновесия (Chemical Equilibrium (CE)), используемая для неперемешанного горючего, является наименее точной из всех моделей флеймлетов. Она предполагает, что горючая смесь находится в химическом равновесии, все реакции протекают практически моментально ($Da >> 1$), а скорость турбулентной диффузии всех компонентов одинакова [27]. Таким образом, модель может быть ограниченно использована при исследовании горения лишь в бункерных КС ГТУ. Для современных КС авиационных ГТД CE-модель не применима из-за малого времени пребывания продуктов в зоне горения. Иначе говоря, смесь не может достичь химического равновесия. Кроме того, в КС авиационных двигателей присутствует развитая турбулентность с разными скоростями диффузии компонентов, чего модель попросту не учитывает. Обычно CE-модель используют при отсутствии информации о механизме взаимодействия горючего и окислителя, считая, что все химические процессы протекают мгновенно [6].

Модель квазистационарного ламинарного пламени (Steady Laminar Flamelet (SLF) или Laminar Flamelet (LFM)) действует в предположении сжатия фронта пламени до размеров, меньших колмогоровского масштаба турбулентности. В этом случае мгновенная структура зоны реакции может считаться близкой к ламинарной. Данная модель справедлива для встречной подачи горючего и окислителя, когда фронт горения сжимается динамическими напорами каждой из сред [14, 28]. Естественно, в такой постановке горючая смесь не должна быть предварительно перемешанной.

Формирование фронта горения, оценка его протяженности, а также максимальная температура пламени полностью зависят от скорости диссипации, определяемой масштабом турбулентности и функцией PDF. Поскольку даже в противоточных авиационных КС горение организуется в зонах обратных токов, представляющих собой торообразные или более сложные циркуляционные течения [3], применение такой модели должно приводить к существенным погрешностям из-за отсутствия постоянного равномерного сжатия фронта пламени.

Направления моделирования. Исходя из опубликованных исследований, сегодня рассмотренные модели в газодинамических расчетах (Computational Fluid Dynamics — CFD) горения КС газотурбинных двигателей используются для решения следующих проблем:

- оценка эмиссии оксидов азота и углерода, дыма, несгоревших углеводородов и прочих примесей. Это направление исследования КС наиболее часто встречается в публикациях по причине регулярного ужесточения требований по выбросам со стороны Международной

организации гражданской авиации (ICAO) и Агентства по охране окружающей среды США (EPA);

- исследование окружной и радиальной температурных неравномерностей как на входе в сопловой аппарат турбины, так и в характерных сечениях КС ГТД. В основном решение таких задач необходимо на этапе проектирования для обеспечения требуемого температурного напряженно-деформированного состояния лопаток турбины;
- проектирование, исследование форсунок и оптимизация распыла топлива с расчетом зон обратных токов в объеме КС; оптимизационные расчеты в этом направлении обычно связаны с режимами работы КС и предполагают минимизацию как физического, так и удельного расхода топлива;
- исследование процессов сажеобразования с учетом отложения сажи и ее излучения как в факеле, так и в продуктах сгорания в зоне разбавления;
- оптимизация и проектирование охлаждения стенки жаровой трубы для микро-ГТД и для полноразмерных камер сгорания ГТД и газотурбинных установок (ГТУ). Часто такие расчеты проводятся вместе с оценкой температурной неравномерности на выходе из газосборника КС;
- ряд специальных задач, направленных на исследование топлив (теплотворная способность, температуры горения, состав продуктов сгорания), исследование работы ГТД в опасных условиях [29], изучение аэроакустики КС, автоколебательных процессов в пламени [30, 31] и др.

При изучении эмиссии камер сгорания газодинамика потока уходит на второй план, так как в соответствии с механизмами образования вредных веществ решающую роль играет температура в основных зонах КС [3]. Например, повышенный выход оксидов азота (NO_x) при работе ГТД определяется в основном механизмом Зельдовича, согласно которому решение кинетического уравнения для реакции образования монооксида азота (NO) часто представляют в упрощенном инженерном виде:

$$\mathrm{NO} = 3{,}84 \cdot 10^{14} \cdot \tau e^{-\frac{65\,000}{T_\text{г}}} \sqrt{\frac{p_\text{к}}{T_\text{г}}} \left(\frac{1{,}1}{\alpha_\Sigma} \right)^{1{,}7}.$$

Следовательно, чем точнее оказывается спрогнозирован максимум температуры перед турбиной $T_\text{г}$ при известных времени сгорания топлива τ, суммарном избытке воздуха α_Σ и давлении за компрессором $p_\text{к}$, тем достовернее результаты моделирования. Поэтому, в частности, в [32–35] авторы не прибегают к сложным моделям

турбулентности типа LES и прочих комбинированных или синтетических, ограничиваясь стандартными двухпараметрическими RANS-моделями вроде классической k—ε, RNG k—ε (Renormalization Group) или SST-модели Ментера (Shear Stress Transport). Поскольку задачи в данном случае носят больше прикладной характер, чем исследовательский, все результаты верифицируются натурными испытаниями. Использование FGM вместо диссипации вихря для расчета горения, а значит, и для прогнозирования поля температур, несколько повышает точность численного решения, сниженную RANS-моделями. Это, в частности, было продемонстрировано в [36], где с помощью FGM-модели удалось спрогнозировать компонентный состав продуктов даже точнее, чем с BVM для стандартной k—ε модели турбулентности. Необходимо отметить, что более простые концептуальные расчеты в инженерной практике, а также расчеты горения в стационарной либо квазистационарной постановке и вовсе ограничиваются моделями диссипации вихря [37–39].

Того же подхода часто придерживаются при оценке температурной неравномерности на выходе из камеры сгорания. Поскольку в условиях данной задачи эмиссия оценивается редко, то не требуется точное вычисление адиабатических температур в зонах со стехиометрическим составом горючей смеси. В результате вместо моделей флеймлетов используются модели диссипации вихря [40–42]. Причем, например, в [41] авторы отмечают устойчивое занижение получаемых результатов относительно эксперимента и других, более точных моделей. В то же время в [42] наоборот — используемая авторами FRC-модель одноступенчатой реакции горения керосина с k—ε турбулентностью показывает расхождение с экспериментом в пределах 2 %. Это может свидетельствовать как об удачном выборе констант для модели турбулентности в совокупности с высоким качеством расчетной сетки, так и об особенностях эксперимента, не указанных в публикации. Таким образом, самые простые, стандартные модели можно использовать с большой осторожностью, верифицируя их на каждом этапе решения.

Инженерное исследование распыла топлива форсунками и получаемого факела (в том числе с оптимизацией) в большинстве изученных работ проводится с помощью классической связки моделей: FGM и k—ω SST [43, 44]. Однако для горелок газотурбинных установок при исследовании эмиссии на переходных режимах работы чаще применяются CE-модели флеймлетов вместе с RANS-моделью турбулентности [45].

Выбор моделей турбулентности и моделей горения также не меняется в расчетах сажеобразования внутри жаровой трубы КС [46, 47] и в оптимизационных расчетах КС [48, 49]. Единственной особенностью при моделировании эмиссии сажи и ее отложений является

использование сложных моделей радиационного теплообмена для коррекции температур в различных зонах КС. Для повышения точности прогнозирования зон сажеобразования прибегают к BVM-модели горения [46], что обычно не встречается в других CFD-задачах для КС. Поскольку стандартные модели горения не могут напрямую указать количество твердых частиц, получаемых в ходе реакций, все они подвергаются изменениям: либо в расчет включают дополнительные полуэмпирические модели дисперсных частиц, либо модифицируют функцию прогресса реакции для учета времени конденсации сажи [50–53].

Наиболее интересными и сложными в плане использования моделей и математических постановок являются задачи исследования пламен [54] и сравнения как самих КС между собой, так и моделей горения для конкретной КС [55]. В таких задачах в принципе не рассматривают моделирование турбулентности через RANS-модели из-за значительного уровня погрешностей. Различные типы моделей комплексной химии либо FGM-моделей связывают с LES-, а также с DES-турбулентностью [56]. При этом схожие задачи, требующие достоверного поля скоростей и давлений — задачи акустики — для КС в подавляющем большинстве случаев разрешают упрощенными моделями. Следует отметить, что стандартные RANS-модели в этих случаях модифицируются, как, например, в [30]. Вводится дополнительная обработка данных стандартного решения либо подключаются аналитические подсеточные модели для уменьшения расхождения с LES.

Выводы и существующие рекомендации по использованию моделей.

1. С учетом математического описания указанных моделей горения для инженерных расчетов КС авиационных двигателей предпочтительнее использовать уточненные модели распада вихря, позволяющие учесть скорость реакций горения (например FRC-модель) или FGM-модель флеймлетов. Модели комплексной химии необходимы лишь для фундаментальных исследований горения в новых, проектируемых КС, не имеющих прототипов [6, 13, 14, 57].

2. Наиболее точные результаты моделирования горения при приемлемых затратах (время и вычислительные мощности) могут быть достигнуты лишь с FGM- и LES-моделями [58]. Для RANS-моделей течение и горение должны быть идеальными, без пульсаций давления, мелкомасштабной турбулентности, затухания и воспламенения. Тот же вывод подтверждается в [59], где авторами приведено значительное количество исследований, опирающихся именно на RANS-модели турбулентности, разрешаемые вместе с моделями диссипации вихря или FGM-моделями. В результате получено два значимых вывода:

- на качественном уровне при использовании RANS-моделей можно получить правдоподобные данные;
- для получения количественно верных данных требуется кропотливая настройка RANS-модели турбулентности.

Необходимость длительной настройки и калибровки RANS-модели для любой модели горения, подчеркивается и в [60], где авторами приведено сравнение процесса горения аммиака в КС ГТУ с использованием FGM-модели для целого ряда моделей турбулентности.

В большинстве публикаций в качестве главного недостатка RANS-модели часто отмечается занижение турбулентной кинетической энергии, сдвиговых напряжений и, следовательно, температуры потока.

3. Упрощенные модели горения как в RST-подходе, так и для моделирования горения флеймлетами оказываются малопригодны при исследовании явно нестационарного горения в авиационных КС.

Заключение. Обобщая изложенное, необходимо отметить следующее. Несмотря на строгие рекомендации, описанные в популярных программных средах для моделирования типа Simcenter-CCM+, ANSYS, OpenFOAM и др., окончательный выбор математической постановки для задач горения должен проводиться с учетом физических, экспериментальных данных в силу высокой доли эмпирики во всех без исключения моделях горения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дубень А.П. *Численное моделирование сложных пристеночных турбулентных течений на неструктурированных сетках. Дис. ... канд. физ.-мат. наук.* Москва, 2014, 112 с.

[2] Юн А.А. *Теория и практика моделирования турбулентных течений*. Москва, URSS, 2009, 272 с.

[3] Lefebvre A.H. *Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions*. CRC Press, 2010, 560 p.

[4] Mengzhe L., Zhikai W., Rongguang X., Xiaoliang Zh., et al. Advances in plasma-assisted ignition and combustion for combustors of aerospace engines. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 117, 27 p. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106952

[5] Buckmaster J., Clavin P., Liñán A., Matalon M. et al. Combustion theory and modeling. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, iss. 1, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.280

[6] *Simcenter STAR-CCM+ 19.06.008-R8*. User Guide. Siemens, 2024.

[7] *Ansys CFX-Solver Modeling Guide. Release 2025 R2*. ANSYS, Inc., 2025, 756 p.

[8] 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. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-65-84

[9] *Resolving turbulence-chemistry interactions in mixing-controlled combustion with LES and detailed chemistry.* Converge CFD Software. Convergent Science, 2018, 16 p.

[10] Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. *Twenty-first Symposium (International) on Combustion.* The Combustion Institute, 1986, pp. 1231–1250.
[11] Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1971, vol. 13, pp. 649–657.
[12] Brandtl A., Pfitzner M., Mooney J.D., Durst B., Kern W. Comparison of combustion models and assessment of their applicability to the simulation of premixed turbulent combustion in IC-engines. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2005, vol. 75, pp. 335–350.
[13] *Ansys Help Center.* URL: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured (дата обращения: 02.02.2026).
[14] *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation.* URL: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm (дата обращения: 07.02.2026).
[15] Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A. *The Chemkin Thermodynamic Data Base*. Sandia Report, 1990, 156 p.
[16] Kee R.J., Rupley F.M., Meeks E., Miller J.A. *Chemkin-III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-phase Chemical and Plasma Kinetics*. Sandia Report, 1996, 166 p.
[17] Pestre A. *Numerical simulations of aeronautical engine ignitions under realistic high altitude conditions*, *Ph.D. thesis*. Toulouse, 2023, 385 p.
[18] Kutkan H., Guerrero J. Turbulent premixed flame modeling using the algebraic flame surface wrinkling model: A Comparative study between OpenFOAM and Ansys Fluent. *Fluids*, 2021, vol. 6, iss. 462, 19 p. DOI: 10.3390/fluids6120462
[19] Flohr P., Pitsch H. A turbulent flame speed closure model for LES of industrial burner flows. *Center for Turbulence Research. Proceedings of the Summer Program*, 2000, pp. 169–179.
[20] Zimont V.L., Polifke W., Bettelini M., Weisenstein W. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high Reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure. *ASME J. Eng. Gas Turbines and Power*, 1998, no. 120 (3), pp. 526–532.
[21] Peters N. *Turbulent Combustion*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 302 p.
[22] Detomaso N., Hok J.-J., Dounia O., Laera D., Poinsot T. A generalization of the Thickened Flame model for stretched flames. *Combustion and Flame*, 2023, vol. 258, part 2, 56 p. DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113080
[23] Rathore O., Navarro-Martinez S. Flame dynamics modelling using artificially thickened models. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2023, vol. 111, pp. 897–927. DOI: 10.1007/s10494-023-00433-2
[24] Charlette F., Meneveau C., Veynante D. Wrinkling model for LES of premixed turbulent combustion. Part I: Non-Dynamic Formulation and Initial Tests. *Combust. Flame*, 2002, pp. 131–159.
[25] Winklinger J. F. *Implementation of a Combustion Model based on the Flamelet Concept and its Application to turbulent reactive Sprays*. *Ph.D. thesis*. Valencia, 2014, 212 p.
[26] Ramaekers W.J.S. *Development of flamelet generated manifolds for partially-premixed flame simulations. Ph.D. thesis*. Eindhoven, 2011, 162 p. DOI: 10.6100/IR716707
[27] Roth C., Perakis N., Haidn O. J. Modeling combustion and heat transfer in a single-element GCH4/GOX rocket combustor. *Proceedings of the 7th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'20). Virtual Conference.* November, 2020. 8 p. DOI: 10.11159/ffhmt20.178

[28] Mell W.E., Kosaly G., Planche O., Poinsot T., Ferziger J.H. Laminar flamelet modeling of turbulent diffusion flames. *Center for Turbulence Research. Proceeding of the Summer Program*, 1990, pp. 255–269.

[29] Абрамчук Т.В., Попова Д.Д., Попова Ю.В., Саженков А.Н. Моделирование зон генерации жидкой фазы вулканического пепла в камере сгорания газотурбинного двигателя на различных режимах полета магистрального самолета. *Теплофизика и аэромеханика*, 2024, т. 31, № 4, с. 637–646.

[30] Дробыш М.В., Дубовицкий А.Н., Лебедев А.Б., Тарасов Д.С. [и др.]. Расчет автоколебаний газа в малоэмиссионных камерах сгорания ГТУ, работающих на газообразном топливе. *Физика горения и взрыва,* 2024, т. 60, № 4, с. 76–86. DOI 10.15372/FGV2024.9448 EDN XKIFOV

[31] Birkby P., Cant R.S., Dawes W.N., Demargne A.A.J., et al. CFD analysis of a complete industrial lean premixed gas turbine combustor. *Proceedings of TURBO EXPO 2000. ASME Turbo Expo 2000: Land, Sea and Air*. Munich, 8–11 May, 2000, 8 p.

[32] Бакланов А.В. Применение многоуровневого моделирования в процессе проектирования малоэмиссионных камер сгорания газотурбинных двигателей. *Вестник Московского авиационного института*, 2020, т. 27, № 4, с. 159–172. DOI: 10.34759/vst-2020-4-159-172

[33] Александров Ю.Б., Вовк М.Ю., Мингазов Б.Г. Исследование эмиссии NOx в камерах сгорания на основе многоуровневого моделирования. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2022, № 71, с. 17–25. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.02

[34] Вятков В.В., Давыдов А.А., Давыдов А.А., Ковалева Н.Н. Особенности численного моделирования малоразмерного газотурбинного двигателя. *Вестник. РГАТА имени П.А. Соловьева,* 2024, № 2 (69), с. 25–34.

[35] Асикритов А.А. Численное исследование камеры сгорания малоразмерного газотурбинного двигателя. *XVII Всероссийская 70 научно-практическая конференция молодых ученых «РОССИЯ МОЛОДАЯ». Кемерово, 22–25 апреля 2025*. КузГТУ, 2025, 8 с.

[36] Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н., Бакланов А.В. Анализ применимости моделей горения для расчёта многофорсуночной камеры сгорания ГТД. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2011, № 5 (29), с. 208–214.

[37] Кутлумухамедов А.Р., Скиба Д.В., Гребенюк Г.П., Бакиров Ф.Г. Апробация методики расчета выбросов монооксида углерода из камер сгорания газотурбинных двигателей по реакторной модели с отслеживанием «бедных» струек топливовоздушной смеси. *Вестник УГАТУ. Авиационная и ракетно-космическая техника*, 2022, т. 26, № 2 (96), с. 82–92. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629682

[38] Agarwal A., Kalenga M.K.W., Ilunga M. CFD Simulation of fluid flow and combustion characteristics in aero-engine combustion chambers with single and double fuel inlets. *Processes,* 2025, vol. 13, no. 124, 22 p. DOI: 10.3390/pr13010124

[39] Jang J., Lee J., Choi J., Yoon Yo., Seok J., Kim D. Combustion instability analysis of a gas turbine combustor with varying hydrogen blending ratios and nozzle geometry. *Journal of Propulsion and Energy*, 2025, vol. 5, no. 2, pp. 52–66. DOI: 10.6108/JPNE.2025.5.2.052

[40] Сипатов А.М., Шилов К.А., Нугуманов А.Д., Абрамчук Т.В. Численная доводка полей температуры газов на выходе из камеры сгорания газотурбинной установки. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2016, № 46, с. 40–55. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.02

[41] Матвеев С.Г., Ланский А.М., Орлов М.Ю., Абрашкин В.Ю. [и др.]. Моделирование процессов горения пропана при переводе камеры сгорания ГТД на газообразное топливо. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2011, № 5 (29), с. 168–178.

[42] Ghahramani Z., Zareh M., Pourfarzaneh H., Pazooki F. Optimization the TIT profile in an annular combustion of a turbojet engine based on smart modeling and CFD simulation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023, vol. 148, iss. 104812, 12 p. DOI: 10.1016/j.jtice.2023.104812

[43] Гураков Н.И., Зубрилин И.А., Коломзаров О.В., Идрисов Д.В. [и др.]. Моделирование эмиссии монооксида углерода при горении жидкого топлива, распыляемого центробежной форсункой в камере сгорания. *Физика горения и взрыва*, 2023, т. 59, № 2, с. 63–68. DOI: 10.15372/FGV20230208

[44] Торба Ю.И., Планковский С.И., Трифонов О.В. и др. Моделирование процесса горения в факельных воспламенителях ГТД. *Авиационно-космическая техника и технология*, 2019, № 7 (159), с. 39–49. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.05

[45] Chen M., Wang L., Huang X., Zhao M., et al. Study on the flame transition characteristics of a gas turbine combustor. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 719, 17 p. DOI: 10.3390/jmse12050719

[46] Абрамчук Т.В., Сипатов А.М., Сухорук М.И. Численное моделирование эмиссии дисперсных частиц с использованием феноменологической модели сажеобразования. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2023, № 72, с. 125–136. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.10

[47] Ajmani K., Guzman F.J., Miki K. CFD evaluation of soot formation in a gas turbine combustor using a flamelet progress variable approach. *GT2025 Proceedings of ASME Turbo Expo 2025 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Memphis, June 16–20, 2025, 14 p.

[48] Фуников В.Н., Недошивина Т.А. Моделирование рабочего процесса горения метана в камере сгорания ГТД ДГ-90. *Труды второй научно-технической конференции молодых ученых Уральского энергетического института*. Екатеринбург, УрФУ, 2017, с. 71–75.

[49] Mangra A.C. Micro gas turbine combustion chamber CFD modeling. *ModTech 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 916, iss. 012064, 9 p. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012064

[50] Johnson P., Chakrabarty R.K., Kumfer B.M. Evaluation of semi-empirical soot models for nonpremixed flames with increased stoichiometric mixture fraction and strain. *Combustion and Flame,* 2020, vol. 2019, pp. 70–85.

[51] Johnson P., Chakrabarty R.K., Kumfer B.M. A modeling approach for soot formation in non-premixed flames with elevated stoichiometric mixture formation. *Combustion and flame,* 2021, vol. 229, 12 p.

[52] Wen Z., Yun S., Thomson M.J., Lightstone M.F. Modelling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 135, pp. 323–340. DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00179-2

[53] Maffina A., Candel S., Franzelli B. Validation of State-of-the-Art LES Modelling for Soot Prediction in Rich Premixed Turbulent Flames: a Focus on Oxidation Processes. *ECM 2023: 11th European Combustion Meeting*, Rouen, April 2023, 7 p.

[54] Rezchikova A. *Large-Eddy Simulation of combustion in gas turbines*. *Ph.D. thesis*. Paris-Saclay, 2022, 213 p.

[55] Åkerblom A., Pignatelli F., Fureby C. Numerical simulations of spray combustion in jet engines. *Aerospace*, 2022, vol. 9, no. 838, 24 p. DOI: 10.3390/aerospace9120838

[56] Liu Sh., Wang H., Ren J. et al. High-resolution reconstruction and a-priori modeling of turbulent flames in the context of large eddy simulation using the convolutional neural network. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, vol. 39, iss. 4, pp. 5187–5197. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.128

[57] Muli M. M. *Implementation of the Thickened Flame Model for turbulent premixed and nonpremixed combustion in OpenFOAM*. *Master thesis*. Milano, 2024, 110 p.

[58] Chen Zh. X., Langella I., Swaminathan N. The role of CFD in modern jet engine combustor design. *Environmental Impact of Aviation and Sustainable Solutions: IntechOpen*, 2020, 28 p. DOI: 10.5772/intechopen.88267

[59] Веселов К.Е., Евдокимов О.А. Исследование газодинамики и горения жидкого топлива в модельной камере сгорания. *Прикладная механика и техническая физика*, 2023, т. 64, № 2, с. 105–120. DOI: 10.15372/PMTF202215096

[60] Mazzotta L., Lamioni R., Agati G., Evangelisti A., et al. On the impact of CFD turbulence models for premixed NH_3/H_2 combustion on emissions and flame characteristics in a swirl-stabilized burner. *Flow, Turbulence and Combustion,* 2025, vol. 114, pp. 1043–1063. DOI: 10.1007/s10494-025-00638-7

Статья поступила в редакцию 27.04.2026

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Савин М.А. Обзор моделей горения, применяемых для исследования физико-химических процессов в камерах сгорания газотурбинных двигателей. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2026, вып. 10. EDN WFCCTT

Савин Максим Анатольевич — канд. техн. наук, доцент кафедры «Авиационные двигатели» Пермского национального исследовательского политехнического университета. e-mail: savin.ma@ya.ru

Review of Combustion Models Used for Studying Physicochemical Processes in Gas Turbine Engine Combustors

© M.A. Savin

Perm National Research Polytechnic University, Perm, 614990, Russian Federation

A review of the main combustion models available in both commercial engineering packages and open-source packages used for the numerical analysis of various processes in the combustion chambers of gas turbine engines and gas turbine units is presented. Brief theoretical information is given on two main approaches (species transport and the flamelet model) and on the models included in them, namely the eddy dissipation model, the finite rate chemistry model, the thickened flame model, the laminar flamelet model, and others. For each combustion model, the main features and areas of applicability are indicated, and their main advantages and disadvantages are outlined. Since fuel combustion in aviation combustion chambers is inextricably linked with the gas dynamics of the flow, the influence of turbulence models on the overall quality of the solution is demonstrated. An analysis of available literature sources made it possible to identify the main directions of modeling for gas turbine engine combustion chambers, among which are the study of: emissions of harmful substances (NOx, COx, UHC, soot, and smoke); temperature non-uniformity; the quality of fuel atomization and cooling of the walls of the flame tube of the combustion chamber. By summarizing the information for each research direction, the most frequently used combinations of combustion models and turbulence models are obtained. Quite expectedly, simple combustion models such as the eddy dissipation model are most often used with well-known semi-empirical RANS turbulence models (k–ω SST, RNG k–ε, etc.). This is usually due to the requirements for high computational speed and low computational cost. All the information obtained during the preparation of the review made it possible to formulate general conclusions and recommendations on the problem of modeling the combustion of liquid and gaseous fuels in gas turbine engine combustion chambers.

Keywords: *combustion models, Eddy Break-Up, Finite Rate Chemistry, Flamelet, turbulence models, LES, RANS, combustion chambers, gas turbine engines*

REFERENCES

[1] Duben A.P. *Chislennoe modelirovanie slozhnykh pristenochykh turbulentnykh techeniy na nestrukturirovannykh setkakh*:Dis. … kand. tekhn. nauk [Numerical Simulation of Complex Near-Wall Turbulent Flows on Unstructured Grids. Cand. Sc. (Phys.-Math.) dissertation]. Moscow, 2014, 112 p.

[2] Yun A.A. *Teoriya i praktika modelirovaniya turbulentnykh techeniy* [Theory and Practice of Modeling Turbulent Flows]. Moscow, URSS Publ., 2009, 272 p.

[3] Lefebvre A.H. *Gas Turbine Combustion. Alternative Fuels and Emissions*. CRC Press, 2010, 560 p.

[4] Mengzhe L., Zhikai W., Rongguang X., Xiaoliang Zh., et al. Advances in plasma-assisted ignition and combustion for combustors of aerospace engines. *Aerospace Science and Technology*, 2021, vol. 117, art. no. 106952. DOI: 10.1016/j.ast.2021.106952.

[5] Buckmaster J., Clavin P., Liñán A., Matalon M., et al. Combustion theory and modeling. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2005, vol. 30, iss. 1, pp. 1–19. DOI: 10.1016/j.proci.2004.08.280.

[6] *Simcenter STAR-CCM+ 19.06.008-R8*. User Guide. Siemens, 2024.
[7] *Ansys CFX-Solver Modeling Guide. Release 2025 R2*. ANSYS, Inc, 2025, 756 p.
[8] Arefyev K.Yu., Fedotova K.V., Krikunova A.I., Panov V.A. Matematicheskoe i fizicheskoe modelirovanie vliyaniya pulsatsiy skorosti snosyaschego 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. Estestvennye nauki — Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences*, 2020, no. 2, pp. 65–84. DOI: 10.18698/1812-3368-2020-2-65-84.
[9] *Resolving turbulence-chemistry interactions in mixing-controlled combustion with LES and detailed chemistry*. Converge CFD Software. Convergent Science, 2018, 16 p.
[10] Peters N. Laminar flamelet concepts in turbulent combustion. In: *Twenty-first Symposium (International) on Combustion*. The Combustion Institute, 1986, pp. 1231–1250.
[11] Spalding D.B. Mixing and chemical reaction in steady confined turbulent flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 1971, vol. 13, pp. 649–657.
[12] Brandtl A., Pfitzner M., Mooney J.D., Durst B., Kern W. Comparison of combustion models and assessment of their applicability to the simulation of premixed turbulent combustion in IC-engines. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2005, vol. 75, pp. 335–350.
[13] *Ansys Help Center*. Available at: https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured (accessed February 2, 2026).
[14] *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation*. Available at: https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm (accessed February 7, 2026).
[15] Kee R.J., Rupley F.M., Miller J.A. *The Chemkin Thermodynamic Data Base*. Sandia Report, 1990, 156 p.
[16] Kee R.J., Rupley F.M., Meeks E., Miller J.A. *Chemkin-III: A Fortran Chemical Kinetics Package for the Analysis of Gas-phase Chemical and Plasma Kinetics*. Sandia Report, 1996, 166 p.
[17] Pestre A. *Numerical simulations of aeronautical engine ignitions under realistic high altitude conditions. Ph.D. thesis*. Toulouse, 2023, 385 p.
[18] Kutkan H., Guerrero J. Turbulent premixed flame modeling using the algebraic flame surface wrinkling model: A Comparative study between OpenFOAM and Ansys Fluent. *Fluids*, 2021, vol. 6, iss. 462, 19 p. DOI: 10.3390/fluids6120462.
[19] Flohr P., Pitsch H. A turbulent flame speed closure model for LES of industrial burner flows. Center for Turbulence Research. *Proceedings of the Summer Program*, 2000, pp. 169–179.
[20] Zimont V.L., Polifke W., Bettelini M., Weisenstein W. An efficient computational model for premixed turbulent combustion at high Reynolds numbers based on a turbulent flame speed closure. *ASME J. Eng. Gas Turbines and Power*, 1998, no. 120 (3), pp. 526–532.
[21] Peters N. *Turbulent Combustion*. Cambridge, Cambridge University Press, 2000, 302 p.
[22] Detomaso N., Hok J.-J., Dounia O., Laera D., Poinsot T. A generalization of the Thickened Flame model for stretched flames. *Combustion and Flame*, 2023, vol. 258, part 2, art. no. 113080. DOI: 10.1016/j.combustflame.2023.113080.
[23] Rathore O., Navarro-Martinez S. Flame dynamics modelling using artificially thickened models. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2023, vol. 111, pp. 897–927. DOI: 10.1007/s10494-023-00433-2.

[24] Charlette F., Meneveau C., Veynante D. Wrinkling model for LES of premixed turbulent combustion. Part I: Non-Dynamic Formulation and Initial Tests. *Combust. Flame*, 2002, pp. 131–159.

[25] Winklinger J.F. *Implementation of a Combustion Model based on the Flamelet Concept and its Application to turbulent reactive Sprays. Ph.D. thesis*. Valencia, 2014, 212 p.

[26] Ramaekers W.J.S. *Development of flamelet generated manifolds for partially-premixed flame simulations. Ph.D. thesis*. Eindhoven, 2011, 162 p. DOI: 10.6100/IR716707.

[27] Roth C., Perakis N., Haidn O.J. Modeling combustion and heat transfer in a single-element GCH4/GOX rocket combustor. In: *Proceedings of the 7th International Conference on Fluid Flow, Heat and Mass Transfer (FFHMT'20)*. Virtual Conference, November 2020, 8 p. DOI: 10.11159/ffhmt20.178.

[28] Mell W.E., Kosaly G., Planche O., Poinsot T., Ferziger J.H. Laminar flamelet modeling of turbulent diffusion flames. *Center for Turbulence Research. Proceeding of the Summer Program*, 1990, pp. 255–269.

[29] Abramchuk T.V., Popova D.D., Popova Yu.V., Sazhenkov A.N. Modelirovanie zon generatsii zhidkoy fazy vulkanicheskogo pepla v kamere sgoraniya gazoturbinnogo dvigatelya na razlichnykh rezhimakh poleta magistral'nogo samoleta [Model for generation the liquid phase zones for volcanic ash melt in the combustion chamber of a turbojet: different flight modes for a mainline aircraft]. *Teplofizika i aeromekhanika — Thermophysics and Aeromechanics*, 2024, vol. 31, no. 4, pp. 637–646.

[30] Drobysh M.V., Dubovitskii A.N., Lebedev A.B., Tarasov D.S., et al. Raschet avtokolebaniy gaza v maloemissionnykh kamerakh sgoraniya GTU, rabotayushchikh na gazoobraznom toplive [Calculation of Gas Self-Oscillations in Low-Emission Combustion Chambers of Gas Turbine Power units Operating on Gaseous Fuel]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2024, vol. 60, no. 4, pp. 76–86. DOI: 10.15372/FGV2024.9448. EDN XKIFOV

[31] Birkby P., Cant R.S., Dawes W.N., Demargne A.A.J., et al. CFD analysis of a complete industrial lean premixed gas turbine combustor. In: *Proceedings of TURBO EXPO 2000. ASME Turbo Expo 2000: Land, Sea and Air*. Munich, May 8–11, 2000, 8 p.

[32] Baklanov A.V. Primenenie mnogourovnevogo modelirovaniya v protsesse proektirovaniya maloemissionnykh kamer sgoraniya gazoturbinnykh dvigateley [Multilevel Modeling Application in the Gas Turbine Engine Low-Emission Combustion Chamber Design Process]. *Vestnik Moskovskogo aviatsionnogo instituta — Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 27, no. 4, pp. 159–172. DOI: 10.34759/vst-2020-4-159-172.

[33] Aleksandrov Yu.B., Vovk M.Yu., Mingazov B.G. Issledovanie emissii NOx v kamerakh sgoraniya na osnove mnogourovnevogo modelirovaniya [Investigation of NOx Emission in Combustion Chambers on the Basis of Multilevel Modeling]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2022, no. 71, pp. 17–25. DOI: 10.15593/2224-9982/2022.70.02.

[34] Vyatkov V.V., Davydov A.A., Davydov A.A., Kovaleva N.N. Osobennosti chislennogo modelirovaniya malorazmernogo gazoturbinnogo dvigatelya [Special Features of Numerical Modeling of a Small-Size Gas Turbine Engine]. *Vestnik. RGATA imeni P.A. Solovyeva*, 2024, no. 2 (69), pp. 25–34.

[35] Asikritov A.A. Chislennoe issledovanie kamery sgoraniya malorazmernogo gazoturbinnogo dvigatelya [numerical study of the combustion chamber of a

small-size gas turbine engine]. *In: XVII Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya molodykh uchenykh «rossiya molodaya»* [XVII All-Russian scientific and practical conference of young scientists “Young Russia”]. Kemerovo, April 22–25, 2025. KuzGTU Publ., 2025, 8 p.

[36] Mingazov B.G., Yavkin V.B., Sabirzyanov A.N., Baklanov A.V. Analiz primenimosti modeley goreniya dlya rascheta mnogoforsunochnoy kamery sgoraniya gtd [Analysis of the applicability of combustion models for calculating a multi-injector combustion chamber of a gas turbine engine]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2011, no. 5 (29), pp. 208–214.

[37] Kutlumukhamedov A.R., Skiba D.V., Grebenyuk G.P., Bakirov F.G. Aprobatsiya metodiki rascheta vybrosov monooksida ugleroda iz kamer sgoraniya gazoturbinnykh dvigateley po reaktornoy modeli s otslezhivaniem «bednykh» struek toplivovozdushnoy smesi [Approbation of the Method for Estimation of Carbon Monoxide Emissions from Gas Turbine Combustors Using a Chemical Reactor Model with Tracking “Lean” Fuel-Air Mixture Jets]. *Vestnik UGATU. Aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika — Vestnik UGATU. Aviation and Rocket and Space Technology*, 2022, vol. 26, no. 2 (96), pp. 82–92. DOI: 10.54708/19926502_2022_2629682.

[38] Agarwal A., Kalenga M.K.W., Ilunga M. CFD Simulation of fluid flow and combustion characteristics in aero-engine combustion chambers with single and double fuel inlets. *Processes*, 2025, vol. 13, no. 124, 22 p. DOI: 10.3390/pr13010124.

[39] Jang J., Lee J., Choi J., Yoon Yo., Seok J., Kim D. Combustion instability analysis of a gas turbine combustor with varying hydrogen blending ratios and nozzle geometry. *Journal of Propulsion and Energy*, 2025, vol. 5, no. 2, pp. 52–66. DOI: 10.6108/JPNE.2025.5.2.052.

[40] Sipatov A.M., Shilov K.A., Nugumanov A.D., Abramchuk T.V. Chislennaya dovodka poley temperatury gazov na vykhode iz kamery sgoraniya gazoturbinnoy ustanovki [Numerical Simulation for Fine Tuning the Gas Temperature Fields at the Outlet of the Gas TurbineCombustion Chamber]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2016, no. 46, pp. 40–55. DOI: 10.15593/2224-9982/2016.46.02.

[41] Matveev S.G., Lanskiy A.M., Orlov M.Yu., Abrashkin V.Yu., et al. Modelirovanie protsessov goreniya propana pri perevode kamery sgoraniya GTD na gazoobraznoe toplivo [Modeling of Propane Combustion Processes During the Conversion of a Gas Turbine Engine Combustion Chamber to Gaseous Fuel]. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta — Vestnik of Samara State Aerospace University*, 2011, no. 5 (29), pp. 168–178.

[42] Ghahramani Z., Zareh M., Pourfarzaneh H., Pazooki F. Optimization the TIT profile in an annular combustion of a turbojet engine based on smart modeling and CFD simulation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2023, vol. 148, art. no. 104812. DOI: 10.1016/j.jtice.2023.104812.

[43] Gurakov N.I., Zubrilin I.A., Kolomzarov O.V., Idrisov D.V., et al. Modelirovanie emissii monooksida ugleroda pri gorenii zhidkogo topliva, raspylyaemogo tsentrobezhny forsunok v kamere sgoraniya [Modeling of Carbon Monoxide Emissions during Combustion of Liquid Fuel Atomized by a Centrifugal Nozzle in a Combustion Chamber]. *Fizika goreniya i vzryva — Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2023, vol. 59, no. 2, pp. 63–68. DOI: 10.15372/FGV20230208.

[44] Torba Yu.I., Plankovskiy S.I., Trifonov O.V., et al. Modelirovanie protsessa goreniya v fakel'nykh vosplamenitelyakh GTD [Modeling of the Combustion

Process in Torch Igniters of Gas Turbine Engines]. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya — Aerospace Technic and Technology*, 2019, no. 7 (159), pp. 39–49. DOI: 10.32620/aktt.2019.7.05.

[45] Chen M., Wang L., Huang X., Zhao M., et al. Study on the flame transition characteristics of a gas turbine combustor. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, vol. 12, no. 719, 17 p. DOI: 10.3390/jmse12050719.

[46] Abramchuk T.V., Sipatov A.M., Sukhoruk M.I. Chislennoe modelirovanie emissii dispersnykh chastits s ispolzovaniem fenomenologicheskoy modeli sazheobrazovaniya [Numerical Modeling of Dispersed Particle Emissions Using a Phenomenological Soot Formation Model]. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika — PNRPU Aerospace Engineering Bulletin*, 2023, no. 72, pp. 125–136. DOI: 10.15593/2224-9982/2023.72.10.

[47] Ajmani K., Guzman F.J., Miki K. CFD evaluation of soot formation in a gas turbine combustor using a flamelet progress variable approach. In: *GT2025 Proceedings of ASME Turbo Expo 2025 Turbomachinery Technical Conference and Exposition*. Memphis, June 16–20, 2025, 14 p.

[48] Funikov V.N., Nedoshivina T.A. Modelirovanie rabochego protsessa goreniya metana v kamere sgoraniya GTD DG-90 [Modeling of the Working Process of Methane Combustion in the Combustion Chamber of a Gas Turbine Engine DG-90]. In: *Trudy Vtoroy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh Ural'skogo energeticheskogo instituta* [Proceedings of the Second Scientific and Technical Conference of Young Scientists of the Ural Energy Institute]. Ekaterinburg, UrFU Publ., 2017, pp. 71–75.

[49] Mangra A.C. Micro gas turbine combustion chamber CFD modeling. In: *ModTech 2020, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 916, art. no. 012064. DOI: 10.1088/1757-899X/916/1/012064.

[50] Johnson P., Chakrabarty R.K., Kumfer B.M. Evaluation of semi-empirical soot models for nonpremixed flames with increased stoichiometric mixture fraction and strain. *Combustion and Flame*, 2020, vol. 2019, pp. 70–85.

[51] Johnson P., Chakrabarty R.K., Kumfer B.M. A modeling approach for soot formation in non-premixed flames with elevated stoichiometric mixture formation. *Combustion and Flame*, 2021, vol. 229, 12 p.

[52] Wen Z., Yun S., Thomson M.J., Lightstone M.F. Modelling soot formation in turbulent kerosene/air jet diffusion flames. *Combustion and Flame*, 2003, vol. 135, pp. 323–340. DOI: 10.1016/S0010-2180(03)00179-2.

[53] Maffina A., Candel S., Franzelli B. Validation of State-of-the-Art LES Modelling for Soot Prediction in Rich Premixed Turbulent Flames: a Focus on Oxidation Processes. In: *ECM 2023: 11th European Combustion Meeting*, Rouen, April 2023, 7 p.

[54] Rezchikova A. *Large-Eddy Simulation of combustion in gas turbines. Ph.D. thesis*. Paris-Saclay, 2022, 213 p.

[55] Åkerblom A., Pignatelli F., Fureby C. Numerical simulations of spray combustion in jet engines. *Aerospace*, 2022, vol. 9, no. 838, 24 p. DOI: 10.3390/aerospace9120838.

[56] Liu Sh., Wang H., Ren J., et al. High-resolution reconstruction and a-priori modeling of turbulent flames in the context of large eddy simulation using the convolutional neural network. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2023, vol. 39, iss. 4, pp. 5187–5197. DOI: 10.1016/j.proci.2022.07.128.

[57] Muli M.M. *Implementation of the Thickened Flame Model for turbulent premixed and nonpremixed combustion in OpenFOAM. Master thesis*. Milano, 2024, 110 p.

[58] Chen Zh.X., Langella I., Swaminathan N. The role of CFD in modern jet engine combustor design. In: Environmental Impact of Aviation and Sustainable Solutions. *IntechOpen*, 2020, 28 p. DOI: 10.5772/intechopen.88267.

[59] Veselov K.E., Evdokimov O.A. Issledovanie gazodinamiki i goreniya zhidkogo topliva v model'noy kamere sgoraniya [Study of Gas Dynamics and Liquid Fuel Combustion in a Model Combustion Chamber]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika — Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2023, vol. 64, no. 2, pp. 105–120. DOI: 10.15372/PMTF202215096.

[60] Mazzotta L., Lamioni R., Agati G., Evangelisti A., et al. On the impact of CFD turbulence models for premixed NH3/H2 combustion on emissions and flame characteristics in a swirl-stabilized burner. *Flow, Turbulence and Combustion*, 2025, vol. 114, pp. 1043–1063. DOI: 10.1007/s10494-025-00638-7.

Savin M.A., Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor, Department of Aircraft Engines, Perm National Research Polytechnic University. e-mail: savin.ma@ya.ru