

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭМИССИИ СО КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГТУ НК-38СТ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

О.А. Тихонов<sup>1</sup>  
А.Н. Сабирзянов<sup>1</sup>  
А.В. Бакланов<sup>2</sup>

olatikhonov@kai.ru  
ansabirzyanov@kai.ru  
andreybaklanov@bk.ru

<sup>1</sup> КНИТУ-КАИ, г. Казань, Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «КМПО», г. Казань, Российская Федерация

---

### Аннотация

Сформирована физико-математическая модель для расчета эмиссии оксида углерода. Проведено математическое моделирование турбулентного горения метана с воздухом при разных температурах окружающей среды в камере сгорания газотурбинной установки двигателя НК-38СТ в стационарном трехмерном приближении средствами пакета вычислительной гидрогазодинамики Ansys Fluent. Выполнено сравнение результатов моделирования эмиссии оксида углерода, полученных с привлечением различных химических механизмов, с данными экспериментов. Численные результаты по эмиссии оксида углерода, показывающие корректные значения в широком диапазоне температур окружающей среды, получены для модели горения FiniteRate с кинетическим механизмом GRI-Mesh 3.0. Максимальная погрешность при низких температурах не превышает 4 %. По данным из литературных источников, результаты прогнозирования эмиссии оксида углерода и распределения температурных полей неудовлетворительны: погрешность по эмиссии составляет более 27 %. Глобальный обобщенный двухступенчатый кинетический механизм метан + + воздух, встроенный в пакет Ansys Fluent, корректно определяет температурные поля, но прогнозирует эмиссионные характеристики при отрицательных температурах окружающей среды с погрешностью 92 %. Быстрый и качественный прогноз по эмиссии оксида углерода при численном моделировании заключается в создании новых редуцированных механизмов для узких диапазонов изменения температур окружающей среды

### Ключевые слова

Газотурбинная установка, камера сгорания, математическая модель, численное моделирование, кинетический механизм, эмиссия

Поступила 17.04.2023

Принята 16.10.2023

© Автор(ы), 2024

**Введение.** На территории России находится треть всех запасов природного газа на Земле, и вопросы транспортировки газа — многогранного процесса, требующего учета многих факторов для обеспечения эффективного перемещения газа до пункта назначения, — всегда очень актуальны. Современный фонд газоперекачивающих агрегатов в России на 86 % состоит из устройств, имеющих газотурбинный привод. Исследования показывают, что при эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) возникает целый ряд проблем [1], одна из которых — экологическая. Корректное прогнозирование эмиссионных характеристик ГТУ представляет собой актуальную задачу [2–6], решение которой позволит выбрать конструктивный вариант для практической реализации.

Существуют три подхода к моделированию эмиссионных характеристик.

1. Использование моделей горения современных пакетов вычислительной гидрогазодинамики (CFD-расчет).

2. Моделирование горения с помощью химических реакторов. Применяются реакторы идеального смешения (PSR), идеального вытеснения (PFR, проточные реакторы) или их комбинация.

3. Комбинированный метод, включающий в себя использование CFD-расчетов для определения эмиссионных характеристик средствами реакторных схем [7, 8].

Предложенные подходы не универсальные, поскольку необходимы дополнительные исследования. Серьезным недостатком первого подхода является невозможность использования детальных кинетических механизмов горения.

При втором подходе возникают проблемы с использованием реакторных схем, не позволяющие рассчитывать процессы в рециркуляционных зонах, учитывать гидравлические потери и конвективный теплообмен со стенками камеры сгорания (КС).

Третий подход заключается в комбинации первого и второго подходов. При первом подходе используется CFD-расчет наиболее простой модели горения, его результаты служат начальным приближением для второго, на котором используются подробные реакторные схемы с детальным кинетическим механизмом. Третий подход наиболее перспективен для оценки эмиссии вредных веществ [2], однако и ему присущи недостатки двух предыдущих подходов.

Для корректного расчета эмиссионных характеристик в КС ГТУ необходимо учитывать большой набор радикалов и промежуточных соедине-

ний. Детальные кинетические механизмы горения углеводородов включают в себя сотни веществ и тысячи реакций. Использование таких механизмов с турбулентными пространственными течениями при численном моделировании — очень сложная расчетная задача. Для ее упрощения используют редуцированные кинетические механизмы, которые позволяют значительно быстрее получать результат и оценивать эмиссионные характеристики.

*Цель настоящей работы* — проведение численных исследований применения известных кинетических механизмов для оценки эмиссии оксида углерода (СО) в ГТУ двигателя НК-38СТ при разной температуре окружающей среды. Для достижения поставленной цели необходимо сформировать физико-математическую модель, провести численные исследования, выполнить анализ и сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными.

**Применяемые модели расчета и исходные данные.** Модели различных физико-химических процессов имеют определяющее значение для адекватного моделирования. Например, для корректного расчета эмиссии СО химические механизмы превращения метана ( $\text{CH}_4$ ) в продукты сгорания должны включать в себя два канала, в основу которых положено реагирование метил-радикала ( $\text{CH}_3$ ).

1. Через  $\text{CH}_3$  к образованию и реагированию формальдегида ( $\text{CH}_2\text{O}$ ), метилоксида ( $\text{CH}_3\text{O}$ ), гидроксиметиленового радикала ( $\text{CH}_2\text{OH}$ ), метанола ( $\text{CH}_3\text{OH}$ ) с радикалами О, Н, ОН с образованием СО и диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ );

2. Через рекомбинацию  $\text{CH}_3$  в этан ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ) и дальнейшее разложение данного соединения в группу углеводородных соединений и радикалов ( $\text{C}_2\text{H}_5$  — этил-радикал,  $\text{C}_2\text{H}_4$  — этилен,  $\text{C}_2\text{H}_3$  — винил-радикал, радикалы  $\text{C}_2\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_2$ ,  $\text{CH}$ ) и реагирование данных соединений с радикалами О, Н, ОН с образованием СО и  $\text{CO}_2$ .

В зависимости от соотношения компонентов в смеси на основе горючего  $\text{CH}_4$  доля участия химических каналов в эмиссии СО значительно изменяется [2, 3]. Образование СО обусловлено следующими процессами:

– химическим реагированием в богатых смесях, когда при низких значениях коэффициента избытка окислителя углеводородные соединения, вступающие в реакции с кислородом и радикалами, окисляются только до СО; для окисления до  $\text{CO}_2$  не хватает окислителя;

– «замораживанием» скорости реакции до окисления СО до СО<sub>2</sub>, что связано с резким снижением температуры смеси; сильно проявляется для ГТУ в пограничных слоях вблизи стенки, когда в них вдувается относительно холодный воздух из второго контура;

– горением при высоких температурах, при которых происходит диссоциация СО<sub>2</sub> на СО.

В настоящей работе исследованы разные модели неперемешанного горения, которые можно применить для оценки эмиссии СО и расчета основных параметров КС ГТУ: модель равновесного приближения, модель ламинарных диффузионных микропламен (FlameLet), модель конечной скорости химической реакции (FiniteRate).

Модель равновесного приближения основана на бесконечных скоростях химического реагирования в потоке. При рассмотрении равновесного приближения для процесса стационарного горения в ГТУ двигателя НК-38СТ эмиссия СО в диапазоне начальных температур реагирующей смеси от 700...800 К не превышает 0,05...0,19 мг/м<sup>3</sup>, что не соответствует экспериментальным данным.

Модель FlameLet позволяет прогнозировать концентрации эмиссии СО только при наличии экспериментальных данных. В этой модели горения для турбулентных потоков учитывается аэродинамическая деформация стехиометрической поверхности пламени за счет статистических характеристик (начальной скорости диссипации, скорости скалярной диссипации). Для настройки этих параметров модели горения и необходимы экспериментальные данные. Результаты использования данной модели применительно к КС ГТУ приведены в [4, 9, 10].

Модель FiniteRate использует уравнение Аррениуса для оценки скорости химических реакций, входящих в уравнения изменения массовой концентрации индивидуальных веществ, которые составляют реагирующую смесь. Точность определения эмиссионных характеристик в данной модели во многом зависит от полноты учитываемых веществ и кинетического механизма горения. Недостатками модели являются отсутствие явной взаимосвязи турбулентных характеристик потока с изменениями массовой концентрации компонентов смеси и значительные вычислительные ресурсы, необходимые для проведения численного эксперимента с детальным кинетическим механизмом.

Теоретическая EDC-модель, которая встраивает детальные химические механизмы в малые турбулентные структуры, в настоящей работе не использовалась, поскольку получение результатов с помощью EDC-мо-

дели за приемлемое время затруднительно. В [11] показано, что численные исследования структуры турбулентного диффузионного горения с помощью EDC-модели дают несовпадение по структуре пламени и сильно заниженные концентрации по эмиссии CO по сравнению с экспериментом.

Вариантом комбинированного подхода, используемого для расчета эмиссионных характеристик КС ГТУ, является предложенный в [3] подход, использующий модель горения FlameLet и EDC-модель. На основе принятых критериев (массовой доли восстановленного топлива, относительного объема зоны реакции) расчетная область разделяется на две зоны действия моделей FlameLet и EDC. Согласно данным [3], такой подход позволяет прогнозировать эмиссию CO с погрешностью 22,5 %.

Рассмотрим стационарный режим работы серийной КС ГТУ двигателя НК-38СТ. Геометрическая модель (рис. 1) представляет собой сектор КС ГТУ (1/23 полной геометрии) с условиями периодичности. Важнейшим элементом конструкции КС является горелочное устройство с двумя контурами, осуществляющее качественное смешение и закрутку потоков горючего ( $\text{CH}_4$ ) и окислителя (воздух) и сгорание полученной смеси. Первый контур предназначен для создания пилотного пламени для гарантированного зажигания поступающих компонентов из второго контура, служащего для подачи в КС основных расходов окислителя и горючего.

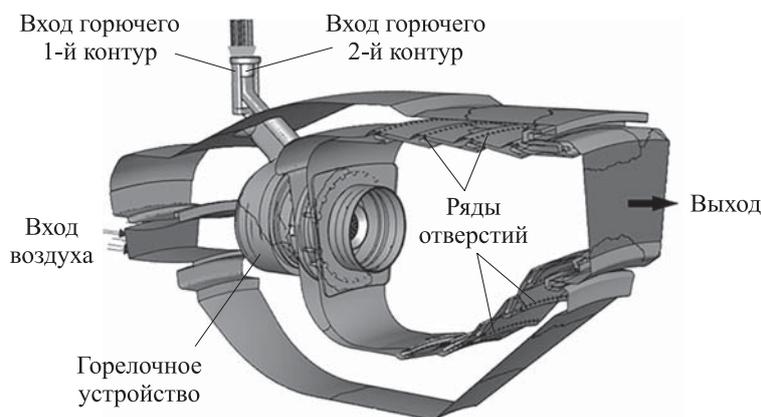


Рис. 1. Сектор КС ГТУ двигателя НК-38СТ

Для защиты стенок от перегрева они перфорированы в верхней части расчетного сектора КС пятью рядами отверстий (четыре ряда — 19 отверстий, один ряд — 13 отверстий), в нижней части — шестью

рядами отверстий (три ряда — 13 отверстий, два ряда — 11 отверстий, один ряд — 15 отверстий).

Сеточная модель состоит из 8,5 млн полиэдральных ячеек с минимальным ортогональным качеством 0,104.

Математическая модель включает в себя осредненные по Рейнольдсу и Фавру уравнения сохранения массы, импульса и энергии для турбулентного потока. Для замыкания системы уравнений использовалась двухпараметрическая модель турбулентности SST ( $k-\omega$ ), состоящая из уравнений с типовыми константами. Данная модель турбулентности является универсальной среди RANS-моделей и позволяет моделировать как пристенную область течения, так и ядро потока [3, 4, 10]. При расчете процесса горения система дополнялась уравнениями массовой концентрации отдельных компонентов. Для упрощения математической модели теплообмен реагирующего потока с элементами конструкции КС не учитывался. Продукты сгорания — гомогенный газ, подчиняющийся уравнению состояния идеального газа. Стенки КС — гладкие, для них стандартно задавались условия прилипания и непротекания. Для решения полученной системы дифференциальных уравнений в частных производных использовался совместный решатель по давлению Coupled пакета Ansys Fluent.

Граничные условия представлены температурами и массовыми секундными расходами горючего и окислителя для трех температур окружающей среды (таблица). Коэффициент избытка окислителя на выходе КС составляет 3,2.

#### Исходные данные для проведения расчетов

Параметр	Температура окружающей среды, °С		
	16	0	-16
Массовый расход воздуха, кг/с	2,21774	2,313218	2,408696
Температура торможения на входе в КС, К	792,7	756,6	720,5
Массовый расход горючего в 1-м (пилот) и 2-м контурах, кг/с	0,001826	0,001826	0,001826
	0,041783	0,041283	0,040783
Температура горючего в 1-м (пилот) и 2-м контурах, К	300	300	300
			623,5

Оценка эмиссии СО требует подбора детального кинетического механизма, который подтверждается широким спектром экспериментальных исследований. В настоящее время эталоном горения низших алканов,

в частности  $\text{CH}_4$ , считается механизм Aramco Mech и его разновидности [12–14], включающие в себя 493 вещества и 5131 реакцию, но использовать его в CFD-расчетах не представляется возможным из-за огромных требований к вычислительным мощностям. Широко применяемым детальным кинетическим механизмом является механизм GRI-Mech 3.0 (53 вещества, 325 реакций) [15]. Приведенные механизмы по экспериментальным данным хорошо согласуются между собой в диапазоне давлений, используемых в ГТУ, для обедненных и стехиометрических реагирующих смесей [16].

Исследованы следующие кинетические механизмы:

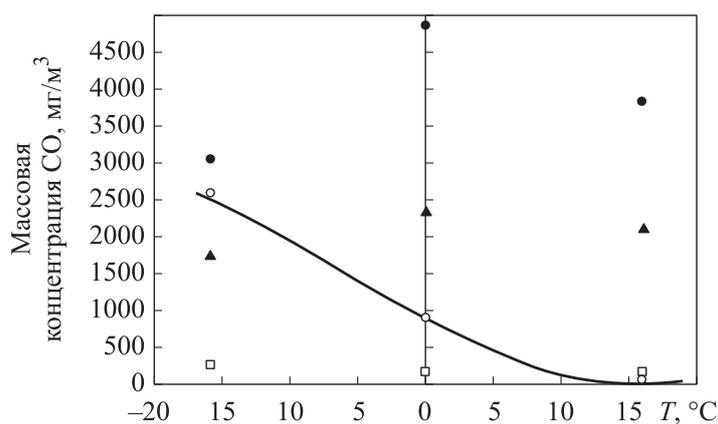
- GRI-Mech 3.0 (53 вещества, 325 реакций) [15];
- Kee58 (18 компонентов и 58 обратимых реакций) [17];
- типовой глобальный двухступенчатый механизм горения  $\text{CH}_4$   
( $\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{CO} + 0,5\text{O}_2 = \text{CO}_2$ );
- 16s29v (16 компонентов, 29 реакций) [18];
- Smooke46 (17 компонентов, 46 реакций) [19].

Указанные механизмы оптимизированы для ламинарных потоков по одной характеристике либо по совокупности характеристик: ламинарной скорости горения, температуре пламени, времени задержки воспламенения, концентрациям основных индивидуальных веществ, входящих в продукты сгорания. Полученные результаты экспериментально подтверждаются для конкретных диапазонов значений температуры, давлений и соотношения компонентов [16].

**Результаты моделирования.** Результаты математического моделирования сравнивались с обобщенными экспериментальными данными по эмиссии СО в продуктах сгорания ГТУ двигателя НК-38СТ на испытательной станции АО «КМПО» (г. Казань) [20]. Все численные результаты получены на установившемся режиме расчета среднemasсовым осреднением по числу итераций, которое по любому параметру составляет не менее 10 000.

На рис. 2 приведены результаты применения кинетических механизмов в модели горения FiniteRate для оценки эмиссии СО. Видно, что экспериментальные данные по эмиссии СО на выходе КС корректно предсказывает лишь кинетический механизм GRI-Mech 3.0. Погрешность результатов применения данного механизма при температуре окружающей среды  $-16\text{ }^\circ\text{C}$  составляет 3,72 %, при 0 и  $16\text{ }^\circ\text{C}$  — 1 %. В таком кинетическом механизме есть необходимый набор индивидуальных веществ и химических реакций для корректного моделирования. Все остальные редуцированные и глобальные кинетические механизмы Kee58, типовой

глобальный двухступенчатый механизм горения  $\text{CH}_4$ , 16s29v, Smooke46 не позволяют правильно прогнозировать эмиссию  $\text{CO}$  для температуры окружающей среды. Результаты применения кинетического механизма 16s29v следующие:  $\text{CO} = 42308,9 \text{ мг/м}^3$  при  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{CO} = 72807,9 \text{ мг/м}^3$  при  $-16 \text{ }^\circ\text{C}$  (на рис. 2 не показаны). Механизм 16s29v при дальнейшем анализе не рассматривался.

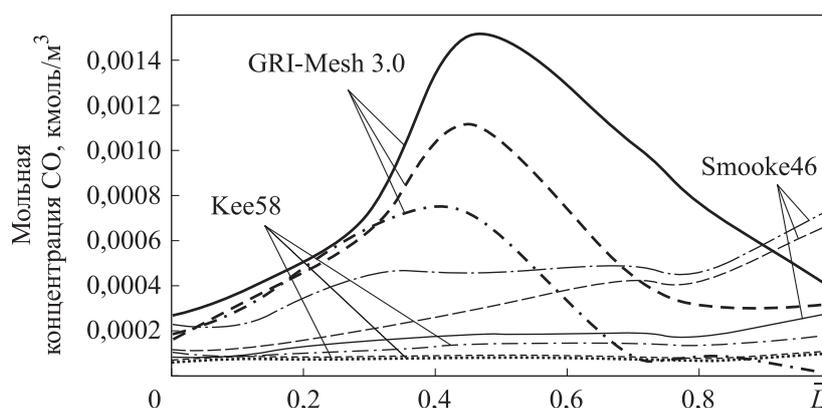


**Рис. 2.** Массовая концентрация  $\text{CO}$ , приведенного к 15 % содержания кислорода, в зависимости от температуры окружающей среды:  
 ○ — кинетический механизм GRI-Mesh 3.0; ▲ — Kee58; ● — Smooke46;  
 □ — обобщенный кинетический механизм

Чтобы кинетические механизмы показывали корректные результаты, требуется корректировка параметров химических реакций, а возможно, в эти механизмы необходимо добавить некоторые новые кинетические наборы на основе глубокого экспертного анализа.

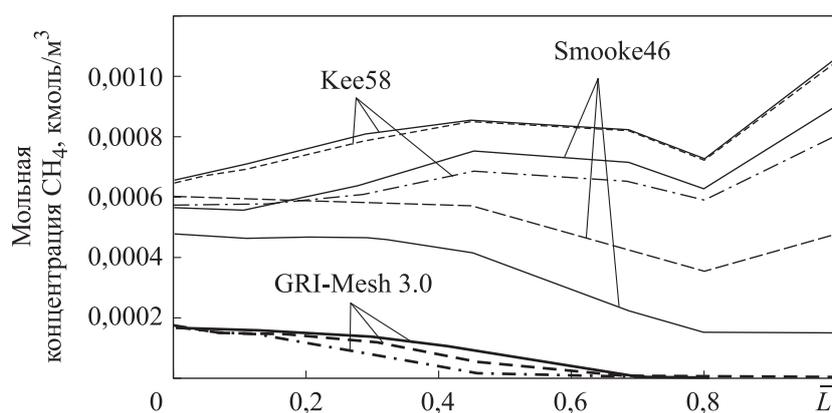
На рис. 3 приведено изменение мольной концентрации  $\text{CO}$  вдоль продольной плоскости КС. Кривые эмиссии  $\text{CO}$  по механизму GRI-Mesh 3.0 имеют характер с выраженным экстремальным значением. Максимум концентрации  $\text{CO}$ , обусловленный химизмом и газодинамической картиной течения в КС, находится в конце зоны горения КС. Физическая картина процесса такова, что высокотемпературный факел пилотного пламени обтекается холодным закрученным потоком из горелочного устройства, в верхней части зоны горения КС находятся два тороидальных вихря слабой интенсивности, в нижней части зоны горения КС — два тороидальных вихря высокой интенсивности. Данное газодинамическое распределение и вдув холодного воздуха для охлаждения приводят к уменьшению скорости окисления и появлению в объеме КС локальной

области, где концентрация CO максимальна (см. рис. 3). Разные температуры охлаждающего воздуха изменяют значение максимальной концентрации CO (см. рис. 3). Для механизмов Smooke46 и Kee58 на рис. 3 такой эффект не наблюдается.



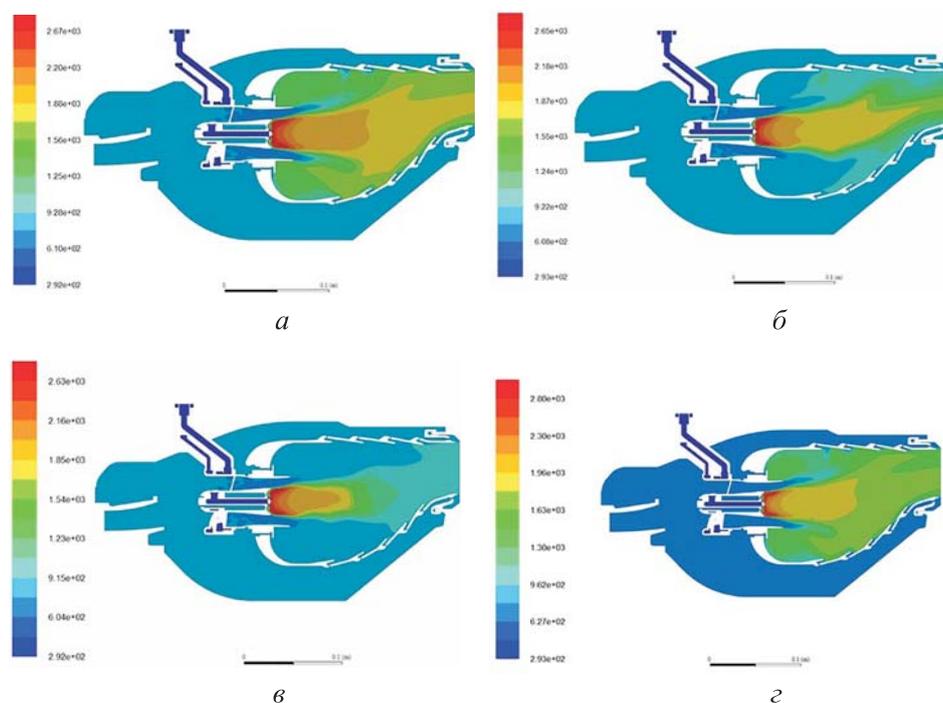
**Рис. 3.** Распределение мольной концентраций CO в продольной плоскости КС: сплошные кривые — температура окружающей среды  $-16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; штриховые кривые —  $0$ ; штрихпунктирные кривые —  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$

Изменение мольной концентрации метана вдоль продольной плоскости КС по безразмерной длине жаровой трубы приведено на рис. 4. Из всех кинетических механизмов только GRI-Mech 3.0 показывает полное разложение  $\text{CH}_4$  в пределах объема КС двигателя НК-38СТ, что можно связать с наличием двух химических каналов разложения  $\text{CH}_4$  в данном механизме.



**Рис. 4.** Распределение мольной концентрации  $\text{CH}_4$  в продольной плоскости КС (обозначения кривых см. рис. 3)

Распределение статической температуры в продольной плоскости КС двигателя НК-38СТ для разных химических механизмов приведено на рис. 5. Кинетический механизм GRI-Mesh 3.0 корректно моделирует температурные поля (рис. 5, а), которые совпадают с экспериментальными данными. Кинетические механизмы Smooke46 и Kee58 дают высокотемпературную область только для пилотного пламени. Объемного горения для этих механизмов в КС ГТУ двигателя НК-38СТ не наблюдается (рис. 5, б, в). Глобальный химический механизм горения  $\text{CH}_4$  с воздухом пакета Ansys Fluent прогнозирует распределение температурных полей на выходе КС с погрешностью до 3 % (рис. 5, г) при различных температурах окружающей среды, однако эмиссию CO этот механизм предсказывает неправильно (см. рис. 3).



**Рис. 5.** Распределение статической температуры в продольной плоскости КС по кинетическим механизмам GRI-Mech 3.0 (а), Smooke46 (б), Kee58 (в) и по глобальному двухступенчатому механизму горения метана (г)

**Заключение.** Применение в модели горения FiniteRate кинетического механизма окисления низкомолекулярных углеводородов GRI-Mesh 3.0 позволяет адекватно прогнозировать эмиссионные характеристики КС ГТУ двигателя НК-38СТ, работающей на газообразном топливе в широком диапазоне температур.

Набор редуционных механизмов, использованных в настоящей работе, при прогнозировании эмиссии СО выдает результат с погрешностью более 27 %. В связи с этим для быстрого и корректного прогнозирования должны быть созданы новые редуционные и глобальные механизмы, работающие в узких интервалах температур окружающей среды.

При создании редуционных механизмов, позволяющих корректно прогнозировать эмиссию СО в КС, необходима их экспертная оценка, определяющая наличие в них важных радикалов и нестабильных промежуточных соединений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Комаров Е.М., Кокуева Ж.М. Повышение эффективности газоперекачивающих агрегатов: проблемы и решения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2019, № 5 (128), с. 104–118.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-104-118>
- [2] Варнатц Ю., Маас У., Диббл Р. Горение. М., ФИЗМАТЛИТ, 2003.
- [3] Куценко Ю.Г. Численные методы оценки эмиссионных характеристик камер сгорания газотурбинных двигателей. Екатеринбург, Пермь, УрО РАН, 2006.
- [4] Сабирзянов А.Н., Явкин В.Б., Александров Ю.Б. и др. Моделирование эмиссионных характеристик камер сгорания ГТД. *Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева*, 2014, № 2, с. 62–70. EDN: STWМКN
- [5] Лавров В.Н., Постников А.М., Цибизов Ю.И. и др. Разработка системы низкоэмиссионного горения топлива в газотурбинных установках. *Вестник СГАУ им. С.П. Королёва*, 2007, № 2, с. 118–127. EDN: IRGGUH
- [6] Козлов В.Е., Старик А.М., Титова Н.С. и др. О механизмах образования экологически опасных соединений в гомогенных камерах сгорания. *Физика горения и взрыва*, 2013, т. 49, № 5, с. 17–33. EDN: RBUETD
- [7] Нгуен Т.Х. Применение улучшенной модели системы химических реакторов для предсказания эмиссии оксидов азота при горении бедной смеси в газотурбинной камере сгорания. *Физика горения и взрыва*, 2019, т. 55, № 3, с. 27–34.  
DOI: <https://doi.org/10.15372/FGV20190303>
- [8] Захаров В.М., Козлов В.Е., Лебедев А.Б. и др. Разработка реакторных моделей диффузионной камеры сгорания для сравнительного анализа детальных и редуцированных кинетических схем горения углеводородных топлив. *Физика горения и взрыва*, 2009, т. 45, № 2, с. 20–28. EDN: KBAUGR
- [9] Гольцев В.Ф., Щепин С.А. Анализ модели тонкого фронта пламени при расчете эмиссии вредных веществ камерами сгорания. *ТВТ*, 2016, т. 54, № 4, с. 569–575.  
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0040364416040074>
- [10] Мингазов Б.Г., Явкин В.Б., Сабирзянов А.Н. и др. Анализ применимости моделей горения для расчета многофорсуночной камеры сгорания ГТД. *Вестник СГАУ им. С.П. Королёва*, 2011, № 5, с. 208–214. EDN: OXZWSH

- [11] Снегирёв А.Ю., Фролов А.С. Расчет турбулентного диффузионного пламени методом крупных вихрей. *ТВТ*, 2011, т. 49, № 5, с. 713–727. EDN: OFAGEP
- [12] Metcalfe W.K., Burke S.M., Ahmed S.S., et al. A hierarchical and comparative kinetic modeling study of C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> hydrocarbon and oxygenated fuels. *Int. J. Chem. Kinet.*, 2013, vol. 45, no. 2, pp. 638–675. DOI: <https://doi.org/10.1002/kin.20802>
- [13] Li Y., Zhou C.-W., Somers K.P., et al. The oxidation of 2-butene: A high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene. *Proc. Combust. Inst.*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 403–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.05.052>
- [14] Zhou C.-W., Li Y., Burke U., et al. An experimental and chemical kinetic modeling study of 1,3-butadiene combustion: ignition delay time and laminar flame speed measurements. *Combust. Flame*, 2018, vol. 197, pp. 423–438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.08.006>
- [15] Egolfopolous F.N., Cho P., Law C.K. Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures. *Combust. Flame*, 1989, vol. 76, no. 3-4, pp. 375–391. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90119-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90119-3)
- [16] Zettervall N., Fureby C., Nilsson E.J.K. Evaluation of chemical kinetic mechanisms for methane combustion: a review from a CFD perspective. *Fuels*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 210–240. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels2020013>
- [17] Peters T. Numerical modeling of turbulence natural-gas diffusion flames. Phd thesis. Delft, Delft TU, 1995.
- [18] Козлов В.Е., Лебедев А.Б., Секундов А.Н. и др. Моделирование скорости турбулентного гомогенного горения на основе «квазиламинарного» подхода. *ТВТ*, 2009, т. 47, № 6, с. 946–953. EDN: KYGDWT
- [19] Smooke M.D. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane-air flames. Berlin, Springer-Verlag, 1991.
- [20] Бакланов А.В. Обеспечение эффективности сжигания топлива в малоэмиссионной камере сгорания газотурбинной установки при различных климатических условиях. *Вестник МАИ*, 2022, т. 29, № 1, с. 144–155. DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-144-155>

**Тихонов Олег Александрович** — старший преподаватель кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ-КАИ (Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10).

**Сабирзянов Андрей Наилевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Реактивные двигатели и энергетические установки» КНИТУ-КАИ (Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10).

**Бакланов Андрей Владимирович** — канд. техн. наук, заместитель главного конструктора АО «КМПО» (Российская Федерация, 420036, г. Казань, ул. Дементьева, д. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Тихонов О.А., Сабирзянов А.Н., Бакланов А.В. Численное моделирование эмиссии СО камеры сгорания ГТУ НК-38СТ в зависимости от температуры окружающей среды. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 3 (150), с. 19–33. EDN: ULJBBC

**NUMERICAL SIMULATION OF THE NK-38ST GAS TURBINE ENGINE COMBUSTION CHAMBER CO EMISSION DEPENDING ON THE AMBIENT TEMPERATURE**

**O.A. Tikhonov<sup>1</sup>**

**A.N. Sabirzyanov<sup>1</sup>**

**A.V. Baklanov<sup>2</sup>**

olatikhonov@kai.ru

ansabirzyanov@kai.ru

andreybaklanov@bk.ru

<sup>1</sup> KNRTU- KAI, Kazan, Russian Federation

<sup>2</sup> JSC “КМПА”, Kazan, Russian Federation

---

**Abstract**

The paper considers a created physical and mathematical model for computing the CO emission. Turbulent combustion of methane with air was mathematically simulated at different ambient temperatures in the NK-38ST gas turbine engine combustion chamber in the stationary three-dimensional approximation using the Ansys Fluent fluid dynamics computation package. CO emission simulation results obtained using various chemical mechanisms were compared with the experiment data. CO emission numerical results demonstrating correct values in a wide range of the ambient temperatures were obtained for the FiniteRate combustion model with the GRI-Mesh 3.0 kinetic mechanism. Maximum error at the low temperatures was not exceeding 4 %. According to the literature sources, results of predicting the CO emission and temperature field distributions are unsatisfactory: error in the CO emission is 27 % or more. The global generalized two-stage kinetic mechanism methane + air is built into the Ansys Fluent package, correctly identifies the temperature fields, but predicts emission characteristics at the negative ambient temperatures with an error of 92 %. Fast and high-quality forecast of the CO emission in numerical simulation lies in creating new reduced mechanisms for the narrow ranges in the ambient temperature alteration

**Keywords**

*Gas turbine unit, combustion chamber, mathematical model, numerical simulation, kinetic mechanism, emission*

Received 17.04.2023

Accepted 16.10.2023

© Author(s), 2024

## REFERENCES

- [1] Komarov E.M., Kokueva Zh.M. Improving the efficiency of gas pumping units: problems and solutions. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2019, no. 5 (128), pp. 104–118 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2019-5-104-118>
- [2] Warnatz J., Maas U., Dibble R.W. *Combustion*. Berlin, Springer-Verlag, 2001.
- [3] Kutsenko Yu.G. Chislennyye metody otsenki emissionnykh kharakteristik kamer sgoraniya gazoturbinykh dvigateley [Numerical methods of estimation of emission characteristics of combustion chambers of gas turbine engines]. Ekaterinburg-Perm, UrO RAS Publ., 2006.
- [4] Sabirzyanov A.N., Yavkin V.B., Aleksandrov Yu.B., et al. Gas-turbine engine combustor emission simulation. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 2, pp. 62–70 (in Russ.). EDN: STWMKN
- [5] Lavrov V.N., Postnikov A.M., Tsibizov Yu.I., et al. Developing of low emission fuel burning system in gas turbine engines. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2007, no. 2, pp. 118–127 (in Russ.). EDN: IRGGUH
- [6] Kozlov V.E., Starik A.M., Titova N.S., et al. On mechanisms of formation of environmentally harmful compounds in homogeneous combustors. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2013, vol. 49, no. 5, pp. 520–535. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508213050031>
- [7] Nguen T.Kh. Improved chemical reactor network application for predicting the emission of nitrogen oxides in a lean premixed gas turbine combustor. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 267–273. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0010508219030031>
- [8] Zakharov V.M., Kozlov V.E., Lebedev A.B., et al. Development of reactor models of a diffusion combustion chamber for comparative analysis of detailed and reduced kinetic schemes of combustion of hydrocarbon fuels. *Combust. Explos. Shock Waves*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10573-009-0017-5>
- [9] Goltsev V.F., Shchepin S.A. Analysis of the flamelet model for calculation of emissions of pollutants by combustors. *High Temp.*, 2016, vol. 54, no. 4, pp. 541–546. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X16040076>
- [10] Mingazov B.G., Yavkin V.B., Sabirzyanov A.N., et al. Analysis of combustion models applicability for designing combustion chamber with a large number of nozzles. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva* [Vestnik of the Samara State Aerospace University], 2011, no. 5, pp. 208–214 (in Russ.). EDN: OXZWSH
- [11] Snegirev A.Yu., Frolov A.S. The large eddy simulation of a turbulent diffusion flame. *High Temp.*, 2011, vol. 49, no. 5, pp. 690–703. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X11040201>
- [12] Metcalfe W.K., Burke S.M., Ahmed S.S., et al. A hierarchical and comparative kinetic modeling study of C<sub>1</sub>-C<sub>2</sub> hydrocarbon and oxygenated fuels. *Int. J. Chem. Kinet.*, 2013, vol. 45, no. 2, pp. 638–675. DOI: <https://doi.org/10.1002/kin.20802>

- [13] Li Y., Zhou C.-W., Somers K.P., et al. The oxidation of 2-butene: a high pressure ignition delay, kinetic modeling study and reactivity comparison with isobutene and 1-butene. *Proc. Combust. Inst.*, 2017, vol. 36, no. 1, pp. 403–411. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.05.052>
- [14] Zhou C.-W., Li Y., Burke U., et al. An experimental and chemical kinetic modeling study of 1,3-butadiene combustion: ignition delay time and laminar flame speed measurements. *Combust. Flame*, 2018, vol. 197, pp. 423–438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2018.08.006>
- [15] Egolfopoulos F.N., Cho P., Law C.K. Laminar flame speeds of methane-air mixtures under reduced and elevated pressures. *Combust. Flame*, 1989, vol. 76, no. 3-4, pp. 375–391. DOI: [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(89\)90119-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(89)90119-3)
- [16] Zettervall N., Fureby C., Nilsson E.J.K. Evaluation of chemical kinetic mechanisms for methane combustion: a review from a CFD perspective. *Fuels*, 2021, vol. 2, no. 2, pp. 210–240. DOI: <https://doi.org/10.3390/fuels2020013>
- [17] Peters T. Numerical modeling of turbulence natural-gas diffusion flames. Phd thesis. Delft, Delft TU, 1995.
- [18] Kozlov V.E., Lebedev A.B., Sekundov A.N., et al. Simulation of the rate of turbulent homogeneous combustion using the “quasi-laminar” approach. *High Temp.*, 2009, vol. 47, no. 6, pp. 912–919. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0018151X09060194>
- [19] Smooke M.D. Reduced kinetic mechanisms and asymptotic approximations for methane-air flames. Berlin, Springer-Verlag, 1991.
- [20] Baklanov A.V. Fuel combustion efficiency ensuring in low-emission combustion chamber of gas turbine engine under various climate conditions. *Vestnik MAI [MAI Aerospace Journal]*, 2022, vol. 29, no. 1, pp. 144–155 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.34759/vst-2022-1-144-155>

**Tikhonov O.A.** — Senior Lecturer, Department of Jet Engines and Power Systems, KNRTU- KAI (Karla Marksa ul. 10, Kazan, 420111 Russian Federation).

**Sabirzyanov A.N.** — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Jet Engines and Power Systems, KNRTU-KAI (Karla Marksa ul. 10, Kazan, 420111 Russian Federation).

**Baklanov A.V.** — Cand. Sc. (Eng.), Deputy Chief Designer, JSC “KMPA” (Dementieva ul. 1, Kazan, 420036 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Tikhonov O.A., Sabirzyanov A.N., Baklanov A.V. Numerical simulation of the NK-38ST gas turbine engine combustion chamber CO emission depending on the ambient temperature. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 3 (150), pp. 19–33 (in Russ.). EDN: ULJBBC