

Труды МАИ. 2024. № 139
Trudy MAI. 2024. No. 139. (In Russ.)

Научная статья

УДК 519.6+533

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183464>

EDN: <https://www.elibrary.ru/UCGKHD>

РАСЧЕТНАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ЦЕЛЬЮ СНИЖЕНИЯ ЭМИССИИ ОКСИДОВ АЗОТА

Юлия Александровна Митрофанова¹✉, Максим Георгиевич Казимарданов²,
Алексей Матвеевич Сипатов³

^{1,2,3}АО «ОДК-Авиадвигатель»,

Пермь, Россия

¹YuAMitrofanova@yandex.ru✉

²kazimardanov@gmail.com

Аннотация. В работе представлено исследование, главной целью которого является снижение эмиссии оксидов азота за счёт улучшения рабочего процесса в КС с использованием расчётной оптимизации конструкций жаровых труб (конструкции со свечей и без свечи зажигания). Для описания процесса горения топливовоздушной смеси в камере сгорания была принята осреднённая по Фавру система балансовых уравнений Навье-Стокса, замкнутая *k- ϵ* -моделью турбулентности. Для нахождения скорости образования/убывания компонент смеси была применена комбинированная EDM/FRC модель горения. Химическая кинетика моделировалась при помощи WGS модели окисления метана воздухом. Проведено уточнение геометрической модели по результатам трёхмерного численного моделирования эксперимента по определению

гидравлических характеристик элементов КС. Проведена идентификация математической модели. По результатам оптимизации расчетное значение эмиссии оксидов азота снизилось на 21,18 % для варианта без свечи зажигания и на 17,14 % со свечей зажигания.

Ключевые слова: горение газообразного топлива, газотурбинный двигатель, расчетная оптимизация, оксиды азота

Для цитирования: Митрофанова Ю.А., Казимарданов М.Г., Сипатов А.М. Расчетная оптимизация конструкции камеры сгорания газотурбинного двигателя с целью снижения эмиссии оксидов азота // Труды МАИ. 2024. № 139. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=183464>

Original article

COMPUTATIONAL OPTIMIZATION OF THE GAS TURBINE ENGINE THE COMBUSTION CHAMBER DESIGN TO REDUCE NITROGEN OXIDE EMISSIONS

Yulia A. Mitrofanova¹, Maxim G. Kazimardanov², Aleksei M. Sipatov³

^{1,2,3}JSC «UEC-Aviadvigatel»,

Perm, Russia

¹YuAMitrofanova@yandex.ru✉

²kazimardanov@gmail.com

Abstract. The paper presents a study whose main goal is to reduce the emission of nitrogen oxides by improving the working process in the combustion chamber using calculated optimization of flame tube designs.

A Favre-averaged system of Navier-Stokes balance equations was adopted to describe the combustion process of an air-fuel mixture in the combustion chamber. The system was closed by a two-parameter k - ϵ turbulence model. A combined EDM/FRC combustion model was used to find the rate of formation/destruction of the components of the mixture. Chemical kinetics was modeled using the WGS model of methane oxidation by air. The process of formation of nitrogen oxides was described by the high-temperature Zeldovich mechanism without PDF. The averaged system of Navier-Stokes balance equations was solved numerically by the control-volume finite element method.

Before setting up the mathematical model and calculated optimization, the geometric model was refined based on the results of three-dimensional numerical modeling of the experiment to determine the hydraulic characteristics of the elements of the combustion chamber. Comparison of the numerical and experimental pressure fall in the combustion chamber showed a good correspondence between the actual design and the drawing.

The identification of the mathematical model of the working process in the combustion chamber was carried out in three modes of operation of the gas turbine engine and for two designs of fire pipes: a variant with spark plugs and a variant without a spark plug. The control parameters were selected: turbulent Prandtl number, turbulent Schmidt number and EDM model coefficient, which limits the speed of mixing components in the model.

The reduction of nitrogen oxide formation at the combustion chamber outlet was achieved by changing the size, number and location of the main openings while maintaining their total area. The non-spark plug and spark plug fire tubes were finished separately from each other. Optimization was carried out at the nominal operating mode of the gas turbine

engine. As a result of optimization, the numerical value of nitrogen oxide emissions decreased by 21.18% for the case without a spark plug and by 17.14% with spark plugs.

Keywords: gas fuel combustion, gas turbine engine, computational optimization, nitrogen oxides

For citation: Mitrofanova Yu.A., Kazimardanov M.G., Sipatov A.M. Computational optimization of the gas turbine engine the combustion chamber design to reduce nitrogen oxide emissions. *Trudy MAI*. 2024. No. 139. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=183464>

Введение

Работа газотурбинного двигателя, непосредственно связана с выбросами вредных веществ в окружающую среду. При использовании природного газа (метана) в качестве топлива основными загрязняющими веществами становятся оксиды азота NO_x , оксиды углерода (CO и CO_2) [1]. Оксиды азота, выбрасываемые в атмосферу, представляют значительную опасность для здоровья человека и окружающей среды. При вдыхании они могут вызвать изменение состава крови (способствуют снижению выработки гемоглобина) и привести к серьезному отравлению. Проведены исследования, в которых доказано влияние газа на снижение сопротивляемости организма человека к респираторным заболеваниям [2] и увеличение смертности от онкологии и инфарктов [3].

Камера сгорания (КС) вносит наибольший вклад в обеспечение экологических характеристик газотурбинных установок (ГТУ). Корректность моделирования рабочего процесса в КС и понимание механизмов образования вредных веществ

влияет на точность прогнозирования расчетного уровня эмиссии, т.е. на возможность расчетной доводки конструкции.

Предварительное математическое моделирование при проектировании [4] и процессе доводки КС позволяет в значительной мере уменьшить временные и финансовые затраты.

Рабочий процесс в КС включает в себя множество процессов таких, как турбулентное течение, горение топливоздушная смеси, образование вредных веществ, сажеобразование, радиационный теплообмен, конвективный теплообмен и др. Модель КС для двигателей промышленного применения имеет множество элементов таких как: отверстия для охлаждающего воздуха, лопатки завихрителей, козырьки системы охлаждения жаровой трубы и др., сгущение сетки вокруг которых влечёт за собой значительный рост «веса» сеточной модели. Эти два фактора делают затруднительным применение методов прямого численного моделирования при расчёте рабочего процесса в КС. Поэтому перед подготовкой сеточной модели упрощают геометрическую модель [5,6,7], а при концептуальной постановке задачи принимают ряд гипотез [8, 9], однако такие действия влекут за собой увеличение неопределённости в методике расчета, что приводит к потере в точности результатов расчета.

По этой причине перед началом расчетной оптимизации необходимо уточнить геометрическую модель (например, при помощи трёхмерного численного моделирования эксперимента по определению гидравлических характеристик элементов КС [10]), проверить адекватность принятых гипотез [8] и идентифицировать параметры математической модели [11].

Целью данной работы является снижение образования оксидов азота за счёт улучшения рабочего процесса в КС с использованием расчётной оптимизации конструкции жаровой трубы.

Концептуальная постановка

В работе были приняты следующие гипотезы:

- объектом моделирования является однофазный многокомпонентный, реагирующий поток топливовоздушной смеси (воздух, метан, продукты сгорания);
- течение потока является турбулентным;
- поток является сжимаемым и вязким [12];
- скорость химических реакций определяется процессами смешения и кинетикой химических реакций;
- не учитывается сопряженный [8] и лучистый теплообмен.

Задачами исследования являются:

- верификация геометрической модели по результатам предварительных аэродинамических испытаний;
- идентификация математической модели рабочего процесса в камере сгорания ГТУ по результатам её испытаний в составе отсека;
- снижение уровня эмиссии оксидов азота за счет расчетной оптимизации конструкции жаровой трубы.

Идентификация математической модели была проведена на трёх режимах работы ГТУ и для двух конструктивных вариантах жаровых труб (ЖТ): ЖТ со свечой зажигания (далее свечная ЖТ) и ЖТ без свечи зажигания (далее несвечная ЖТ).

Жаровые трубы отличались друг от друга количеством рядов основных отверстий. Дальнейшая расчётная оптимизация была проведена на номинальном режиме работы ГТУ.

Математическая постановка

Для описания однофазного многокомпонентного турбулентного потока была принята хорошо зарекомендовавшая себя в инженерных расчетах система осреднённых по Фавру [13,14,15] балансовых уравнений Навье–Стокса [16,17, 18], замкнутая комбинированной моделью турбулентности $k-\varepsilon$ [19, 20].

Массовая скорость L_l образования компоненты l была вычислена через сумму массовых скоростей образования рассматриваемой компоненты во всех элементарных реакциях, в которых участвует компонента l :

$$L_l = m_l \sum_{f=1}^F (v_{fl}'' - v_{fl}') R_f, \quad (10)$$

где m_l – молярная масса l -ой компоненты, F – количество элементарных реакций, v_{fl}'' – стехиометрический коэффициент для l – ого продукта в f - ой химической реакции, v_{fl}' – стехиометрический коэффициент для l – ого реагента в f - ой химической реакции, R_f – скорость элементарной реакции.

Скорость элементарной реакции вычислялась при помощи комбинированной EDM/FRC [21] модель горения. В рамках этого подхода R_f определяется следующим выражением:

$$R_f = \min(R_f^{EDM}, R_f^{FRC}) \quad (11)$$

где R_f^{EDM} и R_f^{FRC} – скорости, вычисленные при помощи EDM и FRC моделей

соответственно.

Для описания химической кинетики окисления метана воздухом была принята WGS [22] модель. Процесс образования оксидов азота моделировался высокотемпературным механизмом Зельдовича [23, 24], без учёта PDF.

Осреднённая система балансовых уравнений Навье-Стокса решалась численно методом контрольных объёмов.

Построение сеточной модели

Для выполнения расчёта рабочего процесса в камере сгорания ГТУ была использована модель сектора 30° , содержащая одну из выбранных жаровых труб.

Для упрощения построения расчётных сеток, а также дальнейшей оптимизации расчётной модели свечной ЖТ была разбита на шесть областей как показано на рисунке 1. Модель для варианта с несвечной трубой была разбита аналогично на 7 областей (рисунок 2).

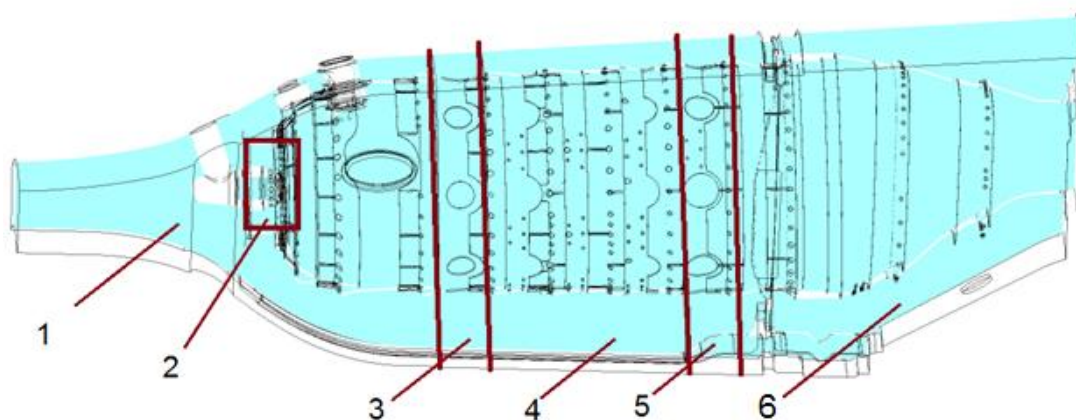


Рисунок 1 – Разбивка расчётной области на части для варианта со свечной ЖТ

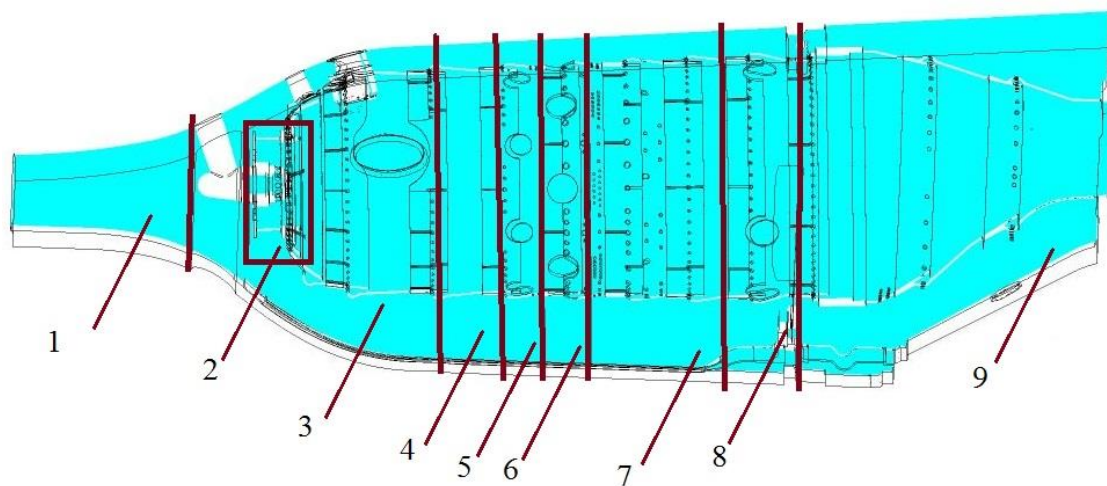


Рисунок 2 – Разбивка расчётной области на части для варианта с несвечной
ЖТ

Для расчёта были построены неструктурированные тетраэдральные сетки с тремя слоями призматических элементов вблизи стенок для описания распределения скорости в пограничном слое. Максимальный размер элемента в ЖТ равен 1,5 мм.

Верификация геометрической модели

При изготовлении камер сгорания для двигателей наземного применения технологические отклонения связаны в первую очередь с производством отверстий охлаждения в конструкциях жаровых труб и газосборниках. Технологические отклонения влияют на точность моделирования и редко поддаются измерению имеющимися инструментами.

Для проверки соответствия конструктивных отклонений нормативным допускам проводятся аэродинамические испытания в ходе которых определяются расходные характеристики частей двигателя. Как правило, на таких испытаниях замеряется перепад давления и коэффициент расхода воздуха.

В настоящей работе верификация геометрических моделей жаровых труб была произведена по трём режимам работы ГТУ: номинальном (далее режим 1), 0,7 от номинального (далее режим 2) и 0,3 от номинального (далее режим 3).

Отклонение между расчётным значением перепада давления и замеренным экспериментально представлено в таблице 1.

Таблица 1 – Отклонение перепада давления

Режим работы ГТУ	Свечная ЖТ	Несвечная ЖТ
1	0,21 %	0,04 %
2	0,27 %	0,06 %
3	0,25 %	0,05 %

Максимальное отклонение расчетных значений перепада давления и замеренного в ходе эксперимента не превышает 0,3 %, что показывает хорошее соответствие геометрической модели реальному изделию.

Идентификация параметров математической модели

Идентификация параметров математической модели рабочего процесса в камере сгорания проводилась по результатам испытаний двух конструктивных вариантов жаровой трубы (свечная и несвечная ЖТ). Управляющими параметрами для настройки модели были выбраны:

– Pr_T – турбулентное число Прандтля,

– Sc_T – турбулентное число Шмидта,

– A – коэффициент, ограничивающий скорость перемешивания компонент в ячейке (модель EDM).

Задача оптимизации сводилась к отысканию таких значений управляющих параметров модели, при которых функция F_m

$$F_m = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 (NOx_{ij}^{exp} - NOx_{ij}^{num})^2,$$

достигает своего минимума где $i=1$ свечная ЖТ, $i=2$ несвечная ЖТ, j — номер режима, NOx_{ij}^{exp} — эмиссия оксида азота, замеренная экспериментально, $NOx_{ij}^{num} = NOx(Pr_T, Sc_T, A)_{ij}^{num}$ — расчётная эмиссия оксида азота.

Минимум функции F_m находился методом Нелдера–Мида[25]. Всего было рассмотрено более 40 троек управляющих параметров. На рисунке 3 представлен ход настройки модели.

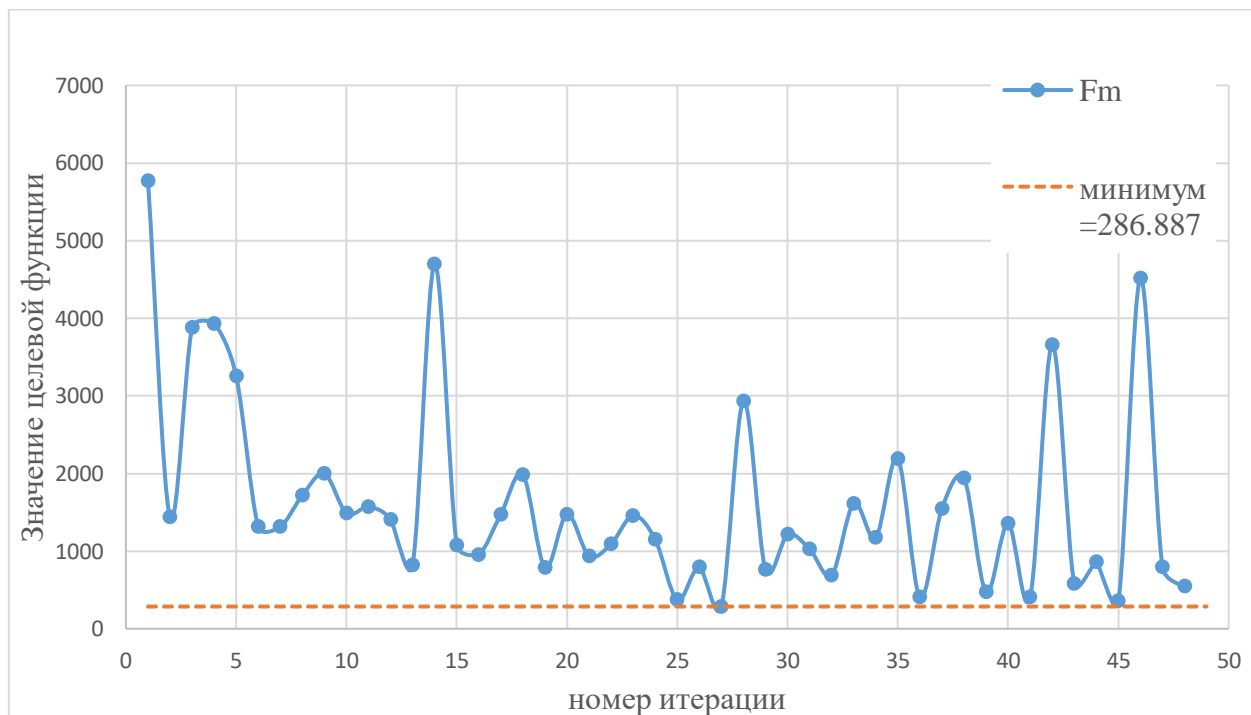


Рисунок 3 – Ход настройки математической модели

Минимум функции ($F_m = 286,88$) был найден на 27 итерации, последующие расчёты были проведены для исключения локальности экстремума.

Максимальное отклонение расчётной эмиссии NO_x на свечной трубе составило 26,21 % на режиме 2. Такое значение отклонения может объясняться высокой чувствительностью модели к параметрам. На режимах 3 и 1 максимальное отклонение составило 5,58 % и 2,54 % соответственно. Значение целевой функции F_m при $i=1$ (учёт только свечной трубы) составило 113,7. Для несвечной трубы максимальное отклонение эмиссии NO_x зафиксировано на режиме 3 и достигло 88,5%. На режимах 2 и 1 оно составило 8,89 и 8,09% соответственно. Значение целевой функции F_m при $i=2$ (учёт только несвечной трубы) достигло 173,18. Несмотря на плохое соответствие значений эмиссии NO_x на режиме 3 несвечной трубы, можно считать модель настроенной, так как значения NO_x на этом режиме небольшое, и вклад в целевую функцию невелик.

Результаты оптимизационных расчётов

Уменьшение эмиссии оксидов азота на выходе из КС достигалось путём изменения количества, размера и расположения основных отверстий с сохранением их суммарной площади. Жаровые трубы (несвечная и свечная) доводились отдельно друг от друга.

Было просчитано 16 конструктивных вариантов для несвечной ЖТ, расчётное значение эмиссии NO_x в наилучшем варианте снизилось на 21,18 % относительно исходной конструкции. На рисунке 4 представлено поле скорости протекания реакции образования оксидов азота, рассчитанной по механизму Зельдовича, для исходного и наилучшего конструктивных вариантов. Скорость образования NO_x

обезразмерена ($Rate_{б/р} = Rate / Rate_{кр}$, $Rate_{б/р}$ – обезразмеренная скорость образования NO_x , $Rate$ – скорость образования NO_x , $Rate_{кр}$ – обезразмеривающее значение скорости).

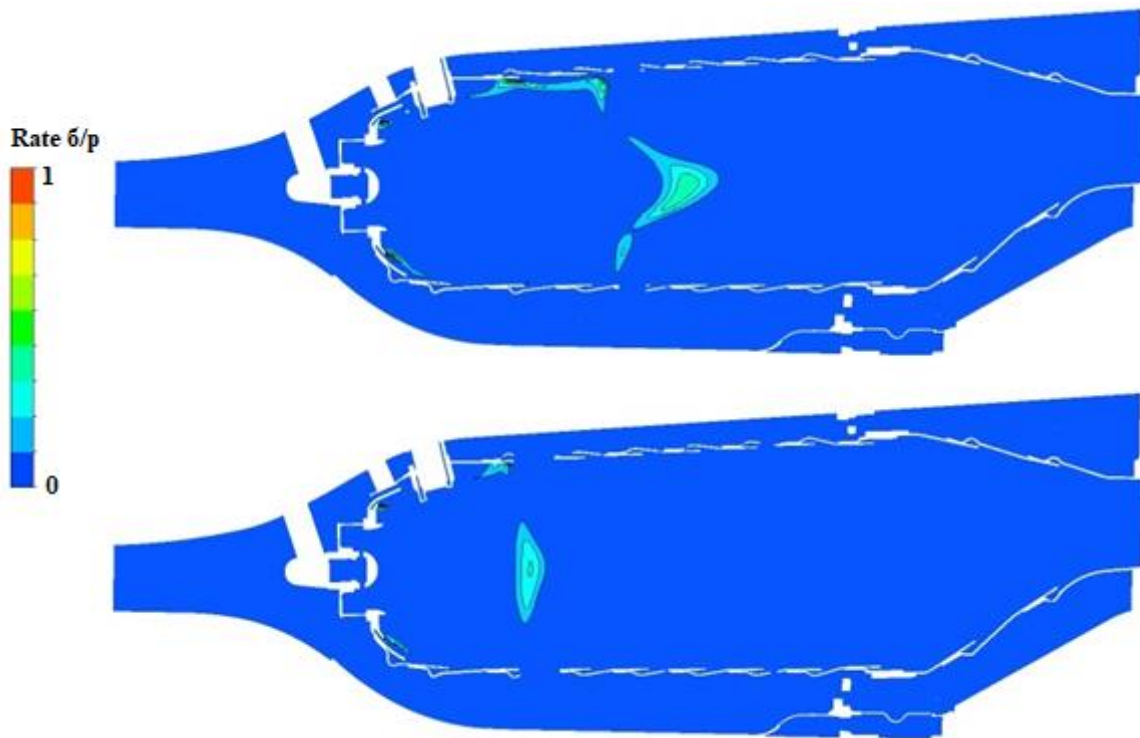


Рисунок 4 – Поле скорости образования NO_x в продольном сечении сектора КС, несвечная ЖТ

Для свечной ЖТ было просчитано 14 конструктивных вариантов, расчётное значение эмиссии NO_x в наилучшем варианте удалось снизить на 17,14 % относительно исходной конструкции. Поле скорости протекания образования оксидов азота по термическому механизму Зельдовича для исходного и наилучшего конструктивного варианта представлено на рисунке 5.

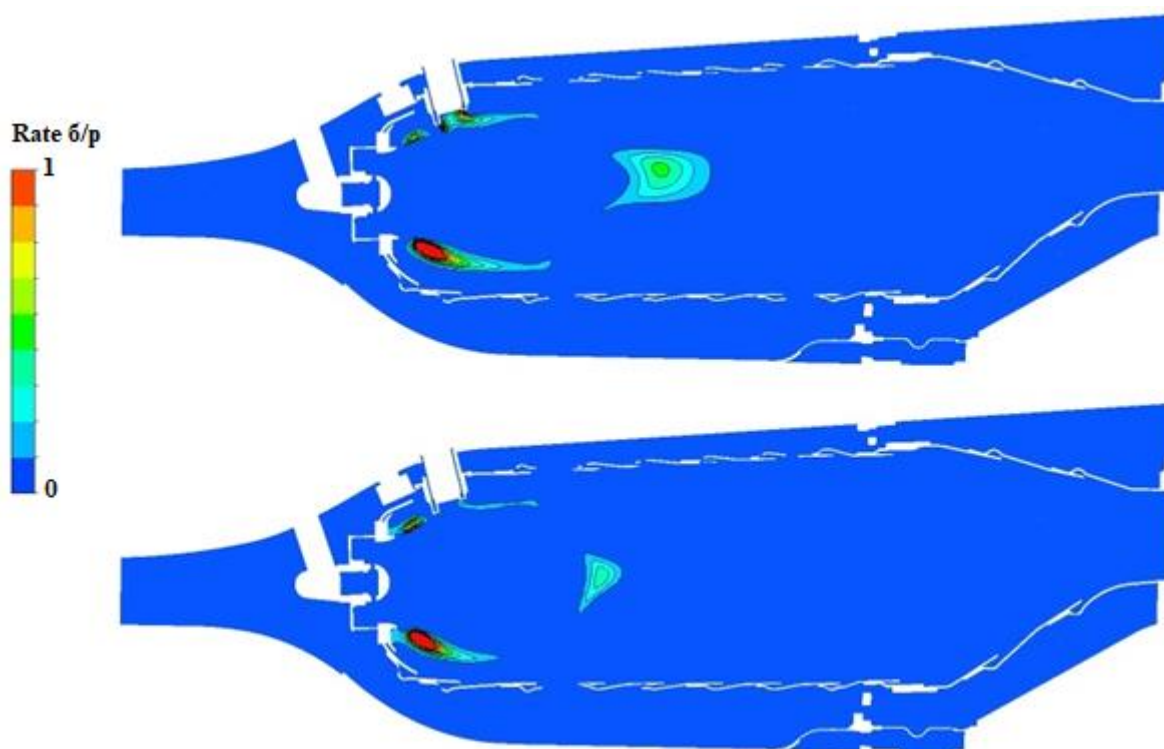


Рисунок 5 – Поле скорости образования NOx в продольном сечении сектора КС, свечная ЖТ

Как видно из рисунков 4 и 5 объемы зон с высокими скоростями образования NOx в варианте с итоговой геометрией заметно уменьшились. Особенно хорошо это заметно на несвечной ЖТ, что согласуется с расчётами NO на выходе из КС.

Выводы

В ходе работы была проведена настройка математической модели однофазного многокомпонентного реагирующего потока топливовоздушной смеси в камере сгорания и последующая оптимизация рабочего процесса с целью снижения эмиссии NOx.

Благодаря оптимизации удалось снизить расчётное значение NOx на 21,18 % для варианта не свечной ЖТ и на 17,14 % для варианта свечной ЖТ.

Список источников

1. Забелин Н.А., Лыков А.В., Рассохин В.А. Эмиссия загрязняющих веществ от газотранспортной системы ОАО «Газпром» // Научно-технические ведомости СПбПУ. Глобальная энергетика. 2013. № 3 (178). С. 294–305.
2. Яцына И.В., Синева А.В., Тулакин И.Ю., Жадан Е.А. и др. Здоровье детей промышленно развитого региона // Гигиена и санитария. 2015. № 94 (5). С. 39–44.
3. Силаева П.Ю., Силаев А.В. Особенности рассеивания выбросов диоксида азота предприятиями энергокомплекса и их влияние на население мегаполисов // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2018. Т. 26. № 1. С. 63–72.
4. Новиков И.Н., Абросимова Е.А. Разработка обобщенной математической модели расчета и проектирования камер сгорания вихревого противоточного типа // Труды МАИ. 2014. № 78. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=53709>
5. Бендерский Л.А., Любимов Д.А. Математическое моделирование турбулентных струйных течений с помощью RANS/ILES-метода высокого разрешения // Авиационные двигатели. 2022. № 2 (15). С. 5–12. DOI: [10.54349/26586061_2022_2_05](https://doi.org/10.54349/26586061_2022_2_05)
6. 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, 15-19 мая 2017). - Екатеринбург: Уральский федеральный университет, 2017. С. 71 – 75.

7. Мингалев С.В., Казимарданов М.Г. Применение численных методов для доводки камер сгорания авиационных двигателей по характеристикам распыла топлива // Труды МАИ. 2021. № 117. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=156325>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-19)
8. Митрофанова Ю.А., Загитов Р.А., Трусков П.В. Оценка влияния учета сопряжённого теплообмена между частями камеры сгорания и реагирующим потоком на результаты моделирования эмиссии оксидов азота // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176856>
9. Способин А.В. Бессеточный алгоритм расчёта сверхзвуковых течений невязкого газа // Труды МАИ. 2021. № 119. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=159777>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-04)
10. Митрофанова Ю.А., Загитов Р.А., Трусков П.В. Настройка математической модели для описания горения газообразного топлива с учётом уточнения геометрии расчётной области // Вычислительная механика сплошных сред. 2020. Т. 13. № 1. С. 60-72.
11. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М. Идентификация математической модели ГТД по результатам испытаний // Труды МАИ. 2022. № 122. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
12. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – М.-Л.: Гостехиздат, 1950. – 676 с.
13. Wilcox D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows // In AIAA 24th Aerospace Meeting. American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1986. P. 15–17. DOI: [10.2514/6.1986-29](https://doi.org/10.2514/6.1986-29)

14. Reynolds O. Papers on mechanical and physical subjects. Cambridge: At the University Press. 1901. V. II. 227 p.
15. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. California. DCW Industries, Inc., 1994. 460 p.
16. Прандтль Л., Титъенс О. Гидро- и аэромеханика. Т. 2. Движение жидкостей с трением и технические приложения. - М.-Л.: Гостехтеориздат, 1935. – 311 с.
17. Молчанов А.М. Математическое моделирование гиперзвуковых гомогенных и гетерогенных неравновесных течений при наличии сложного радиационно-конвективного теплообмена. – М.: Изд-во МАИ, 2017. – 160 с.
18. Ларина Е.В., Крюков И.А., Иванов И.Э. Моделирование осесимметричных струйных течений с использованием дифференциальных моделей турбулентной вязкости // Труды МАИ. 2016. № 91. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=75565>
19. Фрик П.Г. Турбулентность: модели и подходы. Ч. I. – Пермь: Пермский государственный технический университет, 1998. – 108 с.
20. Кузьминов А.В., Лапин В.Н., Черный С.Г. Метод расчёта турбулентных течений несжимаемой жидкости на основе двухслойной $(k-\varepsilon)$ модели // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. № 5. С. 73-86.
21. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion // 16th Symposium (International) on Combustion (1976). Comb. Inst., Pittsburg, Pennsylvania. 1976. V. 16. P. 719–729. DOI: [10.1016/s0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(77)80366-4)

22. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames // *Combustion Science and Technology*. 1981. V. 27. P. 31–43. DOI: [10.1080/00102208108946970](https://doi.org/10.1080/00102208108946970)
23. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменский Д.А. Окисление азота при горении. – М. – Л.: Издательство АН СССР, 1947. – 148 с.
24. Fenimore C.P., Jones G.W. Nitric Oxide Decomposition at 2200–2400° K // *The Journal of Physical Chemistry*. American Chemical Society. 1957. V. 61. No. 5. P. 654–657. DOI: [10.1021/j150551a034](https://doi.org/10.1021/j150551a034)
25. Nelder J., Wead R. A Simplex Method for Function Minimization // *Computer Journal*. 1965. V. 7. P. 308–313. DOI: [10.1093/COMJNL/7.4.308](https://doi.org/10.1093/COMJNL/7.4.308)

References

1. Zabelin N.A., Lykov A.V., Rassokhin V.A. Emission of pollutants from the Gazprom gas transportation system. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPBPU. Global'naya ehnergetika*. 2013. No. 3 (178). P. 294-305. (In Russ.).
2. Yatsyna I.V., Sineva A.V., Tulakin I.Yu., Zhadan E.A., etc. The health of children in an industrially developed region. *Gigiena i sanitariya*. 2015. No. 94 (5). P. 39-44. (In Russ.).
3. Silaeva P.Yu., Silaev A.V. Features of dispersion of nitrogen dioxide emissions by enterprises of the energy complex and their impact on the population of megacities. *Vestnik RUDN. Seriya: Ehkologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2018. V. 26, No. 1. P. 63-72. (In Russ.).

4. Novikov I.N., Abrosimova E.A. Development of a generalized mathematical model for calculating and designing combustion chambers of a vortex countercurrent type. *Trudy MAI*. 2014. No. 78. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53709>
5. Bendersky L.A., Lyubimov D.A. Mathematical modeling of turbulent jet flows using the high-resolution RANS/ILES method. *Aviatsionnye dvigateli*. 2022. No. 2 (15). P. 5-12. (In Russ.). DOI: [10.54349/26586061_2022_2_05](https://doi.org/10.54349/26586061_2022_2_05)
6. Funikov V.N., Nedoshivina T.A. Modeling of the working process of methane combustion in the combustion chamber of the GTE DG-90 Gorenje. *Trudy vtoroi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii molodykh uchenykh Ural'skogo ehnergeticheskogo instituta* (Ekaterinburg, 15-19 maya 2017). Ekaterinburg: Ural Federal University Publ., 2017. P. 71-75.
7. Mingalev S.V., Kazimardanov M.G. Application of numerical methods for fine-tuning combustion chambers of aircraft engines according to fuel spray characteristics. *Trudy MAI*. 2021. No. 117. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=156325>. DOI: [10.34759/trd-2021-117-19](https://doi.org/10.34759/trd-2021-117-19)
8. Mitrofanova Yu.A., Zagitov R.A., Trusov P.V. Assessment of the effect of accounting for conjugate heat transfer between parts of the combustion chamber and the reacting flow on the results of modeling nitrogen oxide emissions. *Trudy MAI*. 2023. No. 132. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176856>
9. Mododin A.V. A grid-less algorithm for calculating supersonic flows of an inviscid gas. *Trudy MAI*. 2021. No. 119. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=159777>. DOI: [10.34759/trd-2021-119-04](https://doi.org/10.34759/trd-2021-119-04)

10. Mitrofanova Yu.A., Zagitov R.A., Trusov P.V. Setting up a mathematical model to describe the combustion of gaseous fuels, taking into account the refinement of the geometry of the computational domain Gorenje. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred.* 2020. V. 13. No. 1. P. 60-72. (In Russ.).
11. Ezrokhi Yu.A., Kalensky S.M. Identification of a mathematical model of a gas turbine engine based on test results. *Trudy MAI.* 2022. No. 122. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=164276>. DOI: [10.34759/trd-2022-122-19](https://doi.org/10.34759/trd-2022-122-19)
12. Loitsyansky L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* (Mechanics of liquid and gas). Moscow-Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1950. 676 p.
13. Wilcox D.C. Multiscale Model for Turbulent Flows, *In AIAA 24th Aerospace Meeting.* American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1986. P. 15–17. DOI: [10.2514/6.1986-29](https://doi.org/10.2514/6.1986-29)
14. Reynolds O. *Papers on mechanical and physical subjects.* Cambridge: At the University Press. 1901. V. II. 227 p.
15. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD.* California. DCW Industries, Inc., 1994. 460 p.
16. Prandtl L., Titiens O. *Gidro- i aehromekhanika. V. 2. Dvizhenie zhidkosti s treniem i tekhnicheskie prilozheniya* (Hydro- and aeromechanics. V. 2. Movement of liquids with friction and technical applications). Moscow-Leningrad: Gostekhizdat Publ., 1935. 311 p.
17. Molchanov A.M. *Matematicheskoe modelirovanie giperzvukovykh gomogennykh i geterogennykh neravnovesnykh techenii pri nalichii slozhnogo radiatsionno-konvektivnogo teploobmena* (Mathematical modeling of hypersonic homogeneous and heterogeneous

nonequilibrium flows in the presence of complex radiation-convective heat transfer).
Moscow: MAI Publ., 2017. 160 p.

18. Larina E.V., Kryukov I.A., Ivanov I.E. Modeling of axisymmetric jet flows using differential models of turbulent viscosity. *Trudy MAI*. 2016. No. 91. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=75565>

19. Frick P.G. *Turbulentnost': modeli i podkhody. Ch. I.* (Turbulence: models and approaches. Part I.). Perm: Perm State Technical University Publ., 1998. 108 p.

20. Kuzminov A.V., Lapin V.N., Cherny S.G. A method for calculating turbulent flows of an incompressible fluid based on a two-layer ($k-\varepsilon$) model. *Vychislitel'nye tekhnologii*. 2001. V. 6, No. 5. P. 73-86. (In Russ.).

21. Magnussen B.F., Hjertager B.H. On Mathematical Modeling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion. *16th Symposium (International) on Combustion*. Comb. Inst., Pittsburg, Pennsylvania. 1976. V. 16, P. 719–729. DOI: [10.1016/s0082-0784\(77\)80366-4](https://doi.org/10.1016/s0082-0784(77)80366-4)

22. Westbrook C.K., Dryer F.L. Simplified reaction mechanisms for the oxidation of hydrocarbon fuels in flames. *Combustion Science and Technology*. 1981. V. 27, P. 31–43. DOI: [10.1080/00102208108946970](https://doi.org/10.1080/00102208108946970)

23. Zeldovich Ya.B., Sadovnikov P.Ya., Frank-Kamensky D.A. *Okislenie azota pri gorenii* (Oxidation of nitrogen during combustion). Moscow-Leningrad: USSR Academy of Sciences Publ., 1947. 148 p.

24. Fenimore C.P., Jones G.W. Nitric Oxide Decomposition at 2200–2400° K. *The Journal of Physical Chemistry*. American Chemical Society. 1957. V. 61, No. 5. P. 654–657. DOI: [10.1021/j150551a034](https://doi.org/10.1021/j150551a034)

25. Nelder J., Wead R. A Simplex Method for Function Minimization. *Computer Journal*. 1965. V. 7, P. 308–313. DOI: [10.1093/COMJNL/7.4.308](https://doi.org/10.1093/COMJNL/7.4.308)

Статья поступила в редакцию 06.09.2024

Одобрена после рецензирования 15.09.2024

Принята к публикации 25.12.2024

The article was submitted on 06.09.2024; approved after reviewing on 15.09.2024; accepted for publication on 25.12.2024