

**ПОДСЕКЦИЯ**  
**«РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС КАМЕР СГОРАНИЯ ГТД И ГТУ» /**  
**«WORKING PROCESS OF COMBUSTION CHAMBERS**  
**OF GAS TURBINE ENGINES AND GAS TURBINE POWER PLANTS»**

УДК 621.45.02

**ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА, ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА  
В ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ:  
ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ**

Матвеев С.Г.<sup>1</sup>, Анисимов М.Ю.<sup>1</sup>, Угланов Д.А.<sup>1</sup>, Попов Г.М.<sup>1</sup>, Матвеев С.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский университет, г. Самара, [msg@ssau.ru](mailto:msg@ssau.ru)

*Ключевые слова: газогенератор, камера сгорания, теплообмен, выбросы вредных веществ, криогенные системы*

При разработке новых поколений авиационных ГТД все большую роль играет создание опережающего научно-технического задела, обеспечивающего реализацию критических технологий для перспективных двигателей и энергетических установок. Все возрастающие требования, определяющие конкурентоспособность и сертификацию ГТД для использования на внутренних и международных авиалиниях, приводят к необходимости оптимизации термодинамического цикла, а именно: повышения давления и температуры газа перед турбиной, снижения потерь полного давления в газовоздушном тракте, роста к.п.д. узлов. Актуальным является и увеличение степени двухконтурности. Все это должно обеспечить повышение топливной эффективности, что кроме улучшения экономических показателей авиаперевозок приведет к снижению эмиссии CO<sub>2</sub>, нормирование которой теперь контролируется Международной организацией гражданской авиации (ИКАО). Ключевыми экологическими показателями также являются нормы по эмиссии NO<sub>x</sub> и нелетучих твердых частиц (nvPM) [1,2].

Решение поставленных задач может быть обеспечено только на основе проведения широкого круга научных исследований для разработки критических технологий высокой степени технологической готовности. Ключевыми из которых являются: малоэмиссионная камера сгорания с жаровой трубой из керамических композиционных материалов (ККМ) и интерметаллических сплавов, обеспечивающая большой ресурс при повышенных (более 1900К) температурах на выходе и ограниченном хладоресурсе поступающего воздуха из компрессора (для P<sub>к</sub> > 50); топливная система и рабочий процесс, адаптированный к использованию кроме традиционного керосина, также альтернативных топлив, таких как: устойчиво производимое топливо (SAF) и криогенные топлива (H<sub>2</sub> и СПГ); компрессор и турбина высокого давления с перспективной аэродинамикой и активным управлением радиальными зазорами при уменьшенном числе ступеней; турбина высокого давления с лопатками соплового аппарата и рабочего колеса из ККМ с перспективными системами охлаждения; интеллектуальная система автоматического регулирования и другие. Кроме того, важнейшую роль в разработке авиационных ГТД и энергетических установок в последнее время играют цифровые технологии, которые при существующем развитии вычислительных мощностей, повышении адекватности математических моделей и использовании технологий искусственного интеллекта позволили обеспечить более высокий уровень проектных работ при существенном сокращении времени проектирования и доводки опытных образцов [2].

Значительная часть вышеперечисленных направлений исследований по созданию опережающего научно-технического задела реализуется коллективом научно-образовательного центра газодинамических исследований (НОЦ ГДИ) Самарского университета имени Королева с использованием современной экспериментальной стендовой базы и высокопроизводительных вычислительных кластеров с установленным специализированным лицензионным обеспечением.

### Отделение процессов горения.

Коллектив отделения процессов горения выполняет расчетно-экспериментальные исследования процесса горения традиционных (авиационный керосин, природный газ) и альтернативных (водород, спирты) видов топлив в камерах сгорания газотурбинных двигателях и установках. Математические модели расчетов процесса горения верифицируются на собственных многоуровневых экспериментах, начиная от измерения фундаментальных величин, таких как скорости протекания реакций (УНУ "Реакционная кинетика и динамика в экстремальных условиях"[3]); нормальная скорость распространения пламени (установка «Heat Flux»[4, 5, 6]), а также полноценными экспериментами на высокотемпературной установке для исследования процессов в камерах сгорания с определением скорости потока, температурного поля, состава продуктов сгорания, температуры стенок элементов КС, величины пульсаций давления в условиях, близких по температуре воздуха на входе, к реальным (подогрев воздуха до 800°C) и повышенным давлением (до 3 атм.). В процессе проведения расчетно-экспериментальных исследований решаются важнейшие научно-технические проблемы, возникающие при проектировании двигателей нового поколения, а именно:

- Разработка и валидация математических моделей с учетом детальной химической кинетики, включая образование ПАУ и нелетучих твердых частиц.
- Разработки форсуночных устройств с многоточечной подачей традиционных и альтернативных видов топлива, в том числе в условиях горения обедненных смесей.
- Разработка высокоэффективных систем охлаждения и применение новых, жаропрочных материалов (включая ККМ) для горячей части камеры сгорания.
- Баланс между снижением NOx и неполного сгорания продуктов сгорания (CO, HC).
- Применение методов искусственного интеллекта при предварительном проектировании камеры сгорания ГТД и ГТУ.
- Минимизация термоакустических эффектов.

### Отделение лопаточных машин.

Основные направления работ по газовой динамики лопаточных машин заключаются в следующем:

- совершенствование методов проектирования рабочих процессов лопаточных машин с использованием сквозного многоуровневого моделирования с учетом требований перспективных авиационных двигателей к увеличению нагруженности и уменьшению габаритов лопаточных венцов;
- доводка рабочих процессов турбомашин и других устройств с использованием современных методов математической оптимизации, учетом взаимодействия исследуемого узла с другими узлами двигателя, учетом деформаций элементов проточной части на различных режимах работы двигателя;
- сопряженное теплогидравлическое моделирование высокотемпературных турбин с учетом современных теплозащитных покрытий;
- нестационарное моделирование рабочих процессов турбомашин и их отдельных элементов;
- проектирование и совершенствование входных и выходных устройств авиационных двигателей;
- разработка программного обеспечения для профилирования лопаточных машин, автоматизации процессов расчета и обработки результатов численного моделирования турбомашин.

### Отделение криогенной техники.

С 2020 года на базе НОЦ ГДИ активно развивается лаборатория криогенной техники. Одним из основных направлений лаборатории является разработка методов повышения эффективности двигателей и энергетических установок на СПГ за счет использования низкопотенциальной энергии криопродукта. Например, лаборатория криогенной техники

приняла участие в создании первого в России речного пассажирского судна, работающего на криогенном топливе - сжиженном природном газе (СПГ). Были выполнены работы по расчетным исследованиям системы топливоподачи и хранения СПГ для силовой установки речного пассажирского судна.

Выполненные исследования по разработке и созданию нового класса энергопроизводящих устройств, использующих низкопотенциальную энергию сжиженного природного газа и других криогенных веществ, показали, что их применение в составе ГТУ позволит увеличить КПД на 5-8% [7, 8].

Отдельно проведены исследования по повышению эффективности микро ГТУ (мощностью 70 кВт) за счет утилизации теплоты выхлопных газов с помощью теплообменника-регенератора (со степенью регенерации 75-85%). Создана методика расчета и проектирования теплообменников. Для решения этих проблем были разработаны усовершенствованный спиральный ребристый теплообменник (SFHE) и теплообменник с двойными спиральными ребрами (DSFHE) с инновационной технологией формирования ребер (с помощью аддитивных технологий). Это позволяет оптимизировать эффективную площадь поверхности теплопередачи, сохраняя при этом минимальные потери давления потоков воздуха и выхлопных газов. Разработана и создана экспериментальная установка для получения и проверки критериальных уравнений коэффициентов теплоотдачи, а также коэффициентов гидравлического сопротивления в сложных каналах теплообменника-регенератора [9].

Специалистами коллектива НОЦ ГДИ выполнен ряд работ в интересах ведущих предприятий двигателестроительной области. Например, выполнено проектирование перспективного газогенератора для двигателей НК тягой до 24 тонн в интересах ПАО «ОДК-Кузнецов», разработана проточная часть осевого компрессора и камеры сгорания ГТЭ-65.1, спроектировано, изготовлено и испытано горелочное устройство, работающее на чистом водороде [10] в интересах АО «Силовые машины», выполнена оптимизация турбины высокого давления в интересах АО «ОДК-Авиадвигатель», а также ряд других работ.

### **Список литературы**

1. Бабкин В.И., Ланшин А.И., Полев А.С., Федякин В.Н. Создание конкурентоспособных авиационных двигателей 2025-2030 годов //Деловая слава России. – 2015. - № 49. – С. 25 – 29.
2. Козлов А.Л., Палкин В.А. перспективы развития авиационного двигателестроения // Авиационные двигатели. – 2023. – № 1(18). – С. 13 – 30.
3. [https://ssau.ru/science/ni/nip/nil/fiz\\_chem/ynyrkd](https://ssau.ru/science/ni/nip/nil/fiz_chem/ynyrkd)
4. Matveev, S. S. Laminar burning velocities of surrogate components blended with ethanol [Text]/ S.S. Matveev, D.V. Idrisov, S. G. Matveev, A.A. Konnov// Combustion and Flame, 2019. – V. 209. – P. 389-393.
5. Soloviova – Sokolova, J.V. Laminar Burning Velocities of n-Decane and Binary Kerosene Surrogate Mixture [Text]/J.V. Soloviova – Sokolova, V.A. Alekseev, S.S Matveev, I.V. Chechet, S.G. Matveev, A.A. Konnov//Fuel 2017:187 429-34
6. Lokachari N., Kukkadapu G., Song H., Matveev S.S. etc. A comprehensive experimental and kinetic modeling study of di-isobutylene isomers: Part 1 // Combustion and Flame 2023. — Vol. 251.
7. Shimanov A.A., Uglanov D.A., Lopatin A.L., Kedam N., Liu J. Research Calculating of Micro Gas Turbine Engine Heat Exchanger // The 2nd Asian Aerospace and Astronautics Conference (AAAC 2024). — 2024. — P. 203-209
8. Shimanov A.A., Uglanov D.A., Lopatin A.L., Kedam N., Liu J. Enhanced compactness and thermal performance of a novel double spiral finned heat exchanger: A CFD and ANN approach // Applied Thermal Engineering 2025. — Vol. 275.
9. Карнаух В.В., Тремкина О.В., Угланов Д.А. Эксергетический метод оценки эффективности низкотемпературных энергетических установок, использующих

низкопотенциальное тепло криопродукта // Вестник Международной академии холода. — 2024. — № 3. — С. 18-24

10. Камера сгорания газовой турбины для сжигания водородсодержащих смесей, патент на изобретение № 2837101 от 25 марта 2025г.

### **Сведения об авторах**

Матвеев С.Г., к.т.н., доцент, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, в.н.с., научный руководитель НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: экспериментальные исследования и моделирование процессов горения применительно к камерам сгорания ГТД и ГТУ, образование и выброс загрязняющих веществ при сжигании углеводородных топлив, применение метано-водородных смесей и водорода в камерах сгорания газотурбинных установок.

Попов Г.М., к.т.н., доцент кафедры теории двигателей летательных аппаратов имени В.П. Лукачева, с.н.с. НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: газовая динамика в турбомашинах.

Угланов Д.А., д.т.н., профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей, в.н.с., начальник отделения криогенной техники НОЦ ГЛИ-209. Область интересов: преобразование низкопотенциальной энергии криопродукта в различных энергетических системах и установках

Анисимов М.Ю., к.т.н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, с.н.с., директор НОЦ ГДИ-209 Самарского университета. Область научных интересов: экспериментальные исследования КС ГТД, эмиссия вредных выбросов.

Матвеев С.С., к.т.н., доцент кафедры теплотехники и тепловых двигателей, с.н.с., начальник отделения процессов горения НОЦ ГДИ, Область научных интересов: процессы горения традиционных и альтернативных видов топлива в камерах сгорания ГТД и ГТУ.