



Минобрнауки России

Федеральное государственное  
автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский  
университет)» (МАИ)

125993, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4  
тел.: +7 499 158-92-09 | www.mai.ru | e-mail: mai@mai.ru  
ОГРН 1037739180820 | ИНН 7712038455

02.09.2026

№ 204-18-259

на №

от

Председателю диссертационного совета  
24.2.379.10 созданного на базе  
федерального государственного  
автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Самарский национальный  
исследовательский университет имени  
академика С.П. Королева»,  
академику РАН, д.т.н., профессору  
Шахматову Е.В.

Уважаемый Евгений Владимирович!

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в качестве ведущей организации направляет отзыв на диссертационную работу Лю Цзюньцзе на тему «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Приложение: отзыв ведущей организации на 9 л. в 2 экз.

Проректор по научной работе



А.В. Иванов

Исп. Ежов А.Д.  
+7 967 259 4800



**УТВЕРЖДАЮ**

Проректор по научной работе  
федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования  
«Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»



А.В. Иванов, д.т.н., доцент

« 02 » 09 2026 г.

**ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного автономного образовательного  
учреждения высшего образования «Московский авиационный институт  
(национальный исследовательский университет)»

**на диссертационную работу**

**Лю Цзюньцзе**

**«Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых  
теплообменников-регенераторов авиационного ГТД»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки  
летательных аппаратов

**Актуальность темы диссертации**

Диссертационная работа Лю Цзюньцзе посвящена решению одной из  
ключевых проблем современного авиационного двигателестроения —  
повышению эффективности газотурбинных двигателей (ГТД) за счёт  
регенерации теплоты выхлопных газов. В условиях ужесточения требований к

|                       |             |
|-----------------------|-------------|
| Входящий №            | 206-4612    |
| Дата                  | 03 СЕН 2026 |
| Самарский университет |             |

топливной экономичности и экологичности авиационных силовых установок, особенно для беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) большой продолжительности полёта и вспомогательных силовых установок (ВСУ), применение регенерации тепла позволяет повысить эффективный КПД установки с 15–20 % до 30–35 %. Однако широкое внедрение теплообменников-регенераторов сдерживается жесткими массогабаритными ограничениями: масса теплообменного аппарата может достигать 30–40 % от общей массы ГТД.

Автором обоснованно показано, что традиционные конфигурации оребрения (гладкие, волнистые, прерывистые, жалюзийные) исчерпали возможности повышения эффективности: дальнейшая интенсификация теплообмена сопровождается недопустимым ростом гидравлического сопротивления. В связи с этим разработка новых геометрических структур — спиральных и двуспиральных пластинчато-ребристых теплообменников — является актуальной научно-технической задачей. Особую значимость работе придаёт использование современных методов искусственного интеллекта и машинного обучения для прогнозирования теплогидравлических характеристик и многокритериальной оптимизации, что позволяет существенно сократить время и вычислительные затраты на проектирование.

### **Структура и содержание работы**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 110 источников. Общий объем работы составляет 190 страниц, содержит 61 рисунок и 18 таблиц.

В первой главе представлен развернутый аналитический обзор состояния и перспектив развития авиационных ГТД с регенерацией теплоты. Проведен детальный анализ традиционных типов оребрения, выявлены их недостатки, обоснована необходимость разработки принципиально новых геометрических структур. Проанализированы современные подходы к применению суррогатных

моделей и методов машинного обучения для прогнозирования теплогидравлических характеристик, а также методы многокритериальной оптимизации теплообменных аппаратов.

Во второй главе представлены результаты численного моделирования и экспериментальной верификации спиральных пластинчато-ребристых теплообменников. Разработана физическая модель и инновационный метод формообразования спиральных каналов, исключая необходимость заполнения профиля. Проведено сравнение двух методов формообразования, исследовано влияние шага ребер на характеристики СПРТ и ДСПРТ, выполнен сравнительный анализ эффективности односпиральной и двуспиральной конфигураций. Экспериментальная часть включает разработку специализированного стенда, методику измерений и верификацию численных результатов.

В третьей главе разработана методика определения теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата с использованием физико-ориентированных нейросетевых моделей. Сформирован комплексный набор данных из 1082 образцов для шести типов геометрий ребер. Проведен сравнительный анализ четырёх алгоритмов машинного обучения (ИНС, CatBoost, LightGBM и XGBoost), показавший превосходство искусственной нейронной сети ( $R^2 > 0,996$ ). Разработана гибридная суррогатная модель ФИНС-МРЧ-ИНС с физико-информированной предобработкой данных, обеспечивающая среднюю относительную ошибку MAPE на уровне 0,47 % для интенсивности теплопередачи и 0,88 % для коэффициента трения. Выполнена многокритериальная оптимизация двуспирального оребрения с использованием генетического алгоритма NSGA-II и анализ механизмов интенсификации теплообмена на основе принципа синергии полей.

В четвертой главе разработана комплексная методика оценки эффективности авиационного МГТД с теплообменником-регенератором. Предложена математическая модель макроскопического масштабирования характеристик регенератора на основе метода числа единиц переноса теплоты. Выполнена количественная оценка двух направлений проектирования: обеспечение минимальных массогабаритных характеристик (направление А) и максимальное повышение тепловой эффективности (направление Б).

### **Научная новизна исследований и полученных результатов**

Наиболее существенным научным результатом диссертационной работы является разработка метода проектирования сверхкомпактных теплообменников-регенераторов для авиационных ГТД, объединяющего трехмерное CFD-моделирование, экспериментальные данные, алгоритмы машинного обучения и многокритериальную оптимизацию.

В работе установлены закономерности течения и интенсификации теплообмена в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением. Показано влияние вторичных пространственных течений, вихревых структур и отрыва пограничного слоя на интенсивность теплопереноса и аэродинамическое сопротивление.

Разработана методика определения теплогидравлических характеристик теплообменных аппаратов с применением физико-ориентированных нейросетевых моделей. Сформированный набор данных включает 1082 образца и охватывает шесть типов геометрий ребер. На независимой тестовой выборке нейросетевая модель обеспечила значения  $R^2$  0,9963 для фактора Колберна  $j$  и 0,9975 для коэффициента трения  $f$ .

Важным результатом является разработанная комплексная методика оценки эффективности авиационного МГТД, связывающая геометрические параметры оребренной поверхности с интегральными термодинамическими

характеристиками рабочего цикла двигателя на основе метода числа единиц переноса теплоты (NTU).

Практически значимыми являются результаты оптимизации: для сценария минимизации массогабаритных характеристик рассчитано снижение рабочего объема матрицы теплообменного аппарата на 32,2 %, уменьшение общей массы регенератора на 18,6 % и снижение потерь давления на 4,8 %. Для сценария повышения тепловой эффективности степень регенерации теплоты повышена до 87,8 %, что соответствует расчетному росту эффективного КПД силовой установки на 1,5–1,9 %.

#### **Степень обоснованности и достоверности защищаемых положений**

Основные положения и результаты диссертации являются обоснованными и достоверными. Достоверность обеспечивается комплексным применением численного моделирования и физического эксперимента, проверкой сеточной независимости и верификацией моделей турбулентности, использованием калиброванных измерительных средств и анализом неопределенности экспериментальных данных.

Для верификации расчетной методики автором разработан специализированный экспериментальный стенд, обеспечивающий раздельное регулирование параметров горячего и холодного потоков и регистрацию температурно-давленческих характеристик. Экспериментальные данные использованы для подтверждения результатов численного моделирования.

Достоверность моделей машинного обучения дополнительно оценивалась с применением независимой тестовой выборки, повторных запусков, бутстрэппинга и доверительных интервалов. Комплексная проверка результатов различными методами обеспечивает достаточную надежность сформулированных научных выводов и инженерных рекомендаций.

### **Практическая значимость работы**

Практическая значимость диссертации определяется возможностью использования разработанной методики для проектирования и оптимизации компактных теплообменников-регенераторов авиационных МГТД. Предложенный подход позволяет существенно сократить вычислительные затраты на этапе перебора геометрических вариантов и одновременно учитывать конкурирующие требования к тепловой эффективности, гидравлическому сопротивлению, массе и габаритам.

Полученные результаты могут быть использованы при создании и модернизации теплообменных аппаратов авиационных двигателей, при проведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также в учебном процессе при подготовке специалистов в области теплотехники, тепловых двигателей, авиационной энергетики и вычислительной гидрогазодинамики.

Результаты диссертации использованы при выполнении государственного задания по проекту № FSSS-2024-0017, внедрены в учебный процесс Самарского университета и в производственный процесс АО «Металлист-Самара», что подтверждено актом внедрения от 29.05.2026 г.

### **Апробация работы и публикации**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на международных и всероссийских научно-технических конференциях, в том числе на Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития двигателестроения» в 2021, 2023 и 2025 гг., ICMEAS 2023 (г. Сиань, Китай), ASPEE 2024 (г. Шанхай, Китай) и AAAC 2024 (г. Нанкин, Китай).

По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, включая 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки

России, и 9 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus.

### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Разработанные методики и полученные результаты рекомендуется использовать в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах по созданию компактных теплообменников-регенераторов для авиационных газотурбинных и микрогазотурбинных двигателей.

Предложенный комплекс численного моделирования, машинного обучения и многокритериальной оптимизации может быть рекомендован для применения при проектировании теплообменных аппаратов с различными типами оребрения, а также для решения задач сквозного междисциплинарного проектирования перспективных силовых установок летательных аппаратов.

Результаты также целесообразно использовать в образовательном процессе высших учебных заведений при изучении тепломассообмена, вычислительной гидрогазодинамики, проектирования тепловых двигателей и современных методов инженерной оптимизации.

### **Недостатки диссертационной работы**

Наряду с положительной оценкой диссертационной работы следует отметить отдельные вопросы, которые могут быть предметом дальнейшего исследования:

1. Экспериментальная верификация проведена на сегменте теплообменного аппарата с двумя парами каналов горячий-холодный. При масштабировании на полноразмерный рекуператор могут возникать дополнительные краевые эффекты и неравномерность распределения потоков, которые в работе не рассматриваются.

2. Разработанные модели машинного обучения демонстрируют высокую точность в исследованном пространстве параметров. Вместе с тем для практического проектирования перспективных конструкций желательно дополнительно исследовать устойчивость и обобщающую способность моделей при выходе за пределы исходного диапазона геометрических и режимных параметров.

3. В работе основное внимание уделено теплогидравлическим характеристикам и массогабаритной оптимизации. Для дальнейшего развития методики представляет интерес более детальный учет прочностной надежности, долговечности, термических напряжений, вибрационных воздействий и технологичности изготовления оптимизированных конструкций.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности диссертационной работы и не влияют на общую положительную оценку полученных результатов.

### **Заключение по диссертации**

Диссертационная работа Лю Цзюньцзе «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научно-техническая задача повышения эффективности авиационных газотурбинных двигателей с регенерацией теплоты путем разработки и оптимизации компактных спиральных и двуспиральных теплообменников-регенераторов.

Работа характеризуется научной новизной, обоснованностью и достоверностью основных положений, имеет существенную практическую значимость, содержит результаты численных и экспериментальных исследований, а также результаты внедрения.

Содержание диссертации соответствует паспорту научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. По совокупности полученных результатов диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор Лю Цзюньцзе заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15.

Отзыв на диссертационную работу Лю Цзюньцзе «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД» обсужден и одобрен на заседании кафедры 204 «Авиационно-космическая теплотехника» Института № 2 «Авиационные, ракетные двигатели и энергетические установки» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)». Присутствовали на заседании – 21 чел.

Результаты голосования: «за» – 21 чел., «против» – 0 чел., «воздержался» – 0 чел.

Протокол № 1 от «02» сентября 2026 г.

И. о. зав. кафедрой 204,

к. т. н., доцент

д.т.н., доцент

д.т.н., профессор



А. Д. Ежов



Д.С. Янышев



А.М. Молчанов