

**ОТЗЫВ**  
**официального оппонента**  
**кандидата технических наук Бурцева Сергея Алексеевича**  
**на диссертационную работу Лю Цзюньцзе**  
**«Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых**  
**теплообменников-регенераторов авиационного ГТД»,**  
**представленную на соискание учёной степени кандидата технических**  
**наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и**  
**энергетические установки летательных аппаратов**

**Общая характеристика работы**

Диссертация посвящена решению актуальной задачи повышения эффективности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) с регенерацией теплоты за счёт применения спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов (СПРТ) и двухспиральных СПРТ (ДСПРТ).

Целью работы является разработка метода проектирования данных аппаратов на основе численного моделирования их рабочего процесса, интеграции алгоритмов машинного обучения и многокритериальной оптимизации. Для достижения поставленной цели автором были решены следующие задачи: разработан комплексный метод проектирования сверхкомпактных теплообменников; установлены закономерности интенсификации теплообмена в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением; разработана методика определения теплогидравлических характеристик с применением физико-ориентированного обучения нейронных сетей; разработана методика комплексной оценки эффективности авиационного малоразмерного ГТД.

**Актуальность темы исследования**

Актуальность работы не вызывает сомнений. Внедрение рекуператоров в авиационные ГТД позволяет снизить удельный расход топлива и повысить КПД с 15-20% до 30-35%. Однако масса традиционных теплообменных аппаратов может достигать 30-40% от массы двигателя, что ограничивает их применение. Традиционные конфигурации рёбер (гладкие, волнистые, прерывистые) исчерпали возможности интенсификации теплообмена без недопустимого роста гидравлического сопротивления. Работа направлена на решение этой проблемы путём разработки принципиально новых геометрических структур (спиральные и двуспиральные рёбра) и создания интеллектуальных методов их проектирования, что делает тему диссертации высоко актуальной для современной авиации и энергетики.

## **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения и списка литературы из 110 наименований. Работа изложена на 191 странице, содержит 63 рисунка и 18 таблиц.

В первой главе представлен аналитический обзор, обосновывающий актуальность работы. Показано, что классические конфигурации рёбер достигли предела, а традиционные эмпирические корреляции обладают погрешностью 10-20% и непригодны для новых геометрий. Обоснована необходимость применения методов машинного обучения для быстрого прогнозирования характеристик.

Во второй главе разработана физическая модель и проведено численное исследование спиральных теплообменников. Предложен инновационный метод бесшовного формообразования, исключаящий необходимость заполнения профиля. Подробно исследовано влияние шага рёбер на характеристики СПРТ и ДСПРТ, выполнен анализ полей течения и компактности.

В третьей главе разработана методика определения теплогидравлических характеристик с использованием физико-ориентированных нейросетевых моделей. Проведено сравнение четырёх алгоритмов машинного обучения (CatBoost, LightGBM, XGBoost, ИНС), выявлены оптимальные сочетания параметров и доказано преимущество Искусственной нейронной сети (ИНС). Выполнена многокритериальная оптимизация с использованием алгоритма NSGA-II и проведён анализ методом SHAP.

В четвёртой главе разработана комплексная методика оценки эффективности авиационного малоразмерного ГТД. Установлена взаимосвязь между геометрическими параметрами оребрения и интегральными термодинамическими показателями цикла через метод  $\varepsilon$ -NTU. Проведена количественная оценка снижения массы, объёма и роста тепловой эффективности для двух сценариев проектирования.

## **Новизна проведённых исследований и полученных результатов**

В работе впервые получены следующие результаты:

1. Разработан метод проектирования сверхкомпактных теплообменников-регенераторов для авиационных малоразмерного ГТД, отличающийся интеграцией экспериментальных зависимостей, трехмерного CFD-моделирования, алгоритмов машинного обучения и многокритериальной оптимизации, что позволяет сократить время расчёта на 2–3 порядка.

2. Установлены гидродинамические и тепловые закономерности течения в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением, выявлены механизмы формирования пространственных вторичных вихрей и их влияния на разрушение теплового пограничного слоя.

3. Разработана методика определения теплогидравлических характеристик с применением физико-ориентированного обучения нейронных сетей, отличающаяся учётом фундаментальных уравнений теплообмена и гидродинамики при обучении модели.

4. Разработана методика оценки эффективности малоразмерного ГТД, устанавливающая взаимосвязь геометрии рёбер на микроуровне с интегральными термодинамическими показателями рабочего цикла двигателя.

### **Обоснованность и достоверность основных результатов исследований**

Достоверность результатов обеспечивается корректной постановкой задач, использованием верифицированных моделей турбулентности (BSL  $k-\omega$ ), проверкой на сеточную независимость и экспериментальной валидацией на разработанном стенде. Расчётные данные подтверждают результаты экспериментальных исследований с погрешностью менее 10%. Статистическая оценка надёжности моделей машинного обучения проведена методами бутстрэппинга и анализа доверительных интервалов. Диссертация содержит достаточное количество графиков и иллюстраций, подтверждающих доказательную базу.

### **Теоретическая и практическая значимость работы**

Теоретическая значимость заключается в раскрытии механизмов интенсификации теплообмена в каналах сложной формы, а также в разработке физико-информированных нейросетевых моделей для прогнозирования характеристик.

Практическая значимость заключается в создании интеллектуального комплекса, позволяющего инженерам ускорить процесс расчёта и оптимизации, а также в полученных рекомендациях по проектированию теплообменников, обеспечивающих снижение массы на 18,6% и объёма на 32,2%, либо повышение тепловой эффективности до 87,8%.

### **Апробация работы и публикации**

Основные положения диссертации отражены в 16 научных работах, из которых 4 статьи опубликованы в рецензируемых изданиях рекомендованных

ВАК и 9 статей в изданиях, индексируемых в базах Web of Science и Scopus. Результаты исследований были представлены на конференциях различного уровня. Диссертация и автореферат написаны технически грамотным языком, оформление соответствует требованиям.

### **Замечания по содержанию и оформлению работы**

1. В главе 3 при сравнении моделей машинного обучения автор делает вывод о преимуществе ИНС, но не рассматривает возможность использования комбинированных моделей (гибридных ансамблей), которые могли бы повысить точность и надёжность прогноза одновременно. Это оставляет открытым вопрос о потенциале дальнейшего развития методологии.

2. В работе не приведён подробный анализ прочностных характеристик предложенных конструкций. Учитывая, что исследуются высокотемпературные рекуператоры для авиационных ГТД, следовало бы более подробно рассмотреть проблему температурных деформаций и напряжений в тонких рёбрах, а также влияние этих факторов на долговечность аппарата.

3. Замечания по оформлению диссертации:

- отсутствует перечень используемых в диссертации обозначений, сокращений, символов и индексов, что затрудняет чтение диссертации;
- встречаются неточности, например, на страницах 133-134 при описании рисунков 50 и 51 используется обозначение "f-фактор", тогда как в тексте работы это коэффициент трения Фаннинга  $f$ .

4. Замечания по автореферату:

- в автореферате модель турбулентности Realizable  $k$ - $\varepsilon$  названа Реализуемой моделью  $k$ - $\varepsilon$ , что затрудняет восприятие.
- на рисунке 7 плохо подобрано представление графиков, в результате чего графики для модели турбулентности Realizable  $k$ - $\varepsilon$  практически сливаются с графиком для стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели.

Замечания по тексту диссертации и автореферата в целом не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление от диссертационной работы и не снижают её научной и практической ценности.

### **Заключение о соответствии диссертации критериям**

Считаю, что диссертация Лю Цзюньцзе «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД» на соискание учёной степени кандидата технических наук является законченной научно-квалификационной работой. Автором получены

результаты, обладающие научной новизной, имеющие теоретическую и практическую значимость. Опубликовано требуемое количество работ в авторитетных изданиях. Текст автореферата полностью соответствует тексту диссертации.

Диссертация соответствует требованиям положения «О присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Лю Цзюньцзе, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов.

Официальный оппонент  
доцент кафедры  
«Газотурбинные двигатели  
и комбинированные установки»

МГТУ им. Н.Э. Баумана, к.т.н.

Тел. 8(499)265-78-42, [burtsev@bmstu.ru](mailto:burtsev@bmstu.ru)



Бурцев Сергей Алексеевич

26.08.2026

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Адрес: 105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, с. 1

Тел.: +7 (499) 263-63-91

E-mail: [bauman@bmstu.ru](mailto:bauman@bmstu.ru)



« ВЕРНО »

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА  
 КИНЫГИНА А.Н.  
ОТДЕЛ ОРГАНИЗАЦИИ РАБОТЫ  
ЕДИНОЙ ПРИЕМНОЙ УКСИ  
МГТУ ИМЕНИ Н.Э. БАУМАНА