

ОТЗЫВ

**официального оппонента доктора технических наук
Разносчикова Владимира Валентиновича
на диссертацию Лю Цзюньцзе на тему:
«Метод проектирования спиральных
пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели
и энергоустановки летательных аппаратов»**

Структура и объем диссертации

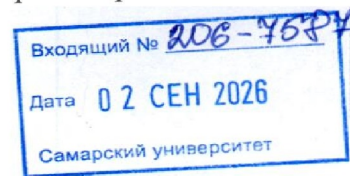
Представленная на оппонирование работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королёва (Самарский университет) на кафедре теплотехники и тепловых двигателей. Работа иллюстрирована 63 рисунками, содержит 18 таблиц объемом 191 страниц. Список используемой литературы насчитывает 110 наименований.

Актуальность темы диссертации

Повышение эффективности авиационного газотурбинного двигателя (ГТД) за счет использования теплообменников регенераторов распространенная и известная идея. Эффективная регенерация тепла позволит снизить удельный расход топлива и повысить эффективный коэффициент полезного действия ГТД. Однако неудовлетворительные габаритно-массовые характеристики теплообменников существенно ограничивают их применение в авиационных системах.

Среди типов рекуператоров для газотурбинных двигателей пластинчато-ребристые теплообменники (ПРТ) являются наиболее предпочтительными благодаря компактности, термомеханической стойкости и конструктивной гибкости. Однако, традиционные конфигурации ПРТ исчерпали возможности повышения эффективности.

Создание комплексного метода проектирования, интегрирующего численное моделирование, экспериментальную валидацию, алгоритмы машинного обучения и многокритериальную оптимизацию, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное значение для развития авиационного двигателестроения. Предлагаемый подход позволяет существенно сократить время проектирования и



обеспечить высокую точность прогнозирования характеристик теплообменных аппаратов нового поколения, что соответствует современным тенденциям цифровой трансформации инженерных разработок.

Новизна предложенной геометрии двуспирального оребрения, многорежимный характер турбулентных течений в микроканалах, отсутствие верифицированных эмпирических зависимостей для таких конфигураций, а также доказанный потенциал повышения эффективности рекуперации определяют высокую научную и практическую актуальность диссертационного исследования Лю Цзюньцзе.

Научная новизна диссертационной работы не вызывает сомнений и заключается в том, что впервые получены следующие результаты:

1. Разработан метод проектирования сверхкомпактных теплообменников-регенераторов, который осуществляется в процессе интеграций экспериментальных зависимостей, трехмерного CFD-моделирования, алгоритмов машинного обучения и многокритериальной оптимизации.

2. Установлены гидродинамические и тепловые закономерности течения и интенсификации теплообмена в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением.

3. Разработана методика определения теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата для авиационного ГТД с применением физико-ориентированного обучения нейронных сетей.

4. Разработана методика комплексной оценки эффективности газотурбинного двигателя с учетом параметров и характеристик теплообменного аппарата, устанавливающая взаимосвязь геометрических параметров оребрения с интегральными термодинамическими показателями рабочего цикла двигателя на основе макроскопического масштабирования методом числа единиц переноса теплоты относительно базовой конфигурации рекуператора.

Практическая значимость работы.

Теоретическая и практическая ценность полученных Лю Цзюньцзе результатов исследований заключается в следующем:

Теоретическая значимость заключается в том, что раскрыты механизмы интенсификации теплообмена в спиральных каналах за счёт генерации трёхмерных вихревых структур, определены условия их возникновения в зависимости от геометрии и шага оребрения при турбулентном течении.

Практическая значимость результатов работы заключается в разработке интеллектуального комплекса прогнозирования параметров пластинчато-ребристых теплообменников, который позволяет инженерам существенно ускорить процесс оптимизации теплообменных аппаратов.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность результатов обеспечивается комплексным применением взаимодополняющих методов. Численные расчёты выполнены с использованием валидированной модели турбулентности BSL k- ω и прошли тщательную проверку на сеточную независимость (расхождение параметров j и f при измельчении сетки не превысило 0,5 %). Разработанный экспериментальный стенд с калиброванным измерительным оборудованием позволил провести физические испытания; расхождение CFD-результатов с экспериментом составило менее 5–10 %. Суррогатные модели (ИНС, XGBoost, CatBoost, LightGBM) обучены на репрезентативной выборке из 1082 образцов с применением байесовской оптимизации и бутстрэппинга, что обеспечило высокую обобщающую способность ($R^2 > 0,996$). Совокупность перечисленных подходов подтверждает надёжность и обоснованность полученных результатов.

Личный вклад автора

Диссертация написана автором самостоятельно, имеются ссылки на свои публикации, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвинутые для публичной защиты, что свидетельствует о личном вкладе автора.

Диссертация и автореферат написана грамотным техническим языком, снабжена достаточным количеством иллюстраций и оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертациям.

Автореферат отражает основное содержание диссертационной работы, выводы подтверждены материалами исследований.

Апробация работы.

Основные положения диссертации отражены в 15 публикациях в том числе, в 4 научных журналах из перечня ВАК РФ, в 9 статьях в изданиях, индексируемых в базах данных Web of Science и Scopus. Результаты исследований докладывались и обсуждались на семинарах и конференциях различного уровня, включая

международные. Поэтому считаю, что диссертационная работа Лю Цзюньцзе в достаточной мере апробирована.

Содержание диссертации достаточно полно, подробно и ясно раскрывает постановку, методы и результаты решения поставленных и рассмотренных задач. Автореферат полностью отражает содержание диссертации. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

Замечания по содержанию и оформлению работы.

Недостатков, ставящих под сомнение справедливость каких-либо результатов, в диссертации не обнаружено. Однако имеются некоторые замечания.

1. Все численные и экспериментальные исследования выполнены исключительно на воздухе как рабочем теле. В реальных условиях эксплуатации авиационного рекуператора горячий тракт содержит продукты сгорания из множества разных веществ в газообразном, жидком и твердом состоянии, что может влиять на теплофизические свойства и, соответственно, на коэффициенты теплоотдачи. В работе не проведена оценка чувствительности результатов к изменению состава газа, что сужает область применимости полученных корреляций.

2. В работе активно используется оптимизация. Однако, в диссертации нет четких описаний процедур выполненных оптимизационных исследований. А именно, если это Парето множество, то нет перечисление критериев и их направление поиска. Нет точного описания вектора варьируемых переменных с указанием левой и правой границы варьирования. Нет перечня ограничивающих параметров (если они используются) с указанием либо левой, либо правой, либо левой и правой границы ограничения. Не указан критерий (условие) останова поиска итерационного процесса оптимизации в выбранном методе (к примеру, в NSGA-II).

Отмеченные замечания не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы Лю Цзюньцзе.

Заключение по диссертации.

Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченным научно-исследовательским трудом, выполненным соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Диссертантом решена важная научно-техническая задача по созданию метода проектирования спиральных пластинчаторебристых теплообменников-регенераторов нового типа для авиационного ГТД.

Исходя из вышеизложенного могу с уверенностью сказать, что диссертационная работа является завершенным научным исследованием, соответствует специальности 2.5.15. «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», имеет важное научное и практическое значение и отвечает всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук ВАК России, а ее автор Лю Цзюньцзе заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по указанной специальности.

Доктор технических наук, доцент

Ведущий научный сотрудник отдела двигателей и химмотологии ФАУ ЦИАМ им. П. И. Баранова



В. В. Разносчиков

" 02 " 09 2026 г.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ имени П. И. Баранова») — государственный научный центр Российской Федерации в области авиакосмического двигателестроения. 111116, г. Москва, ул. Авиамоторная, д.2.

Тел. +7(495) 362-90-82

e-mail vvraznoschikov@ciam.ru

Подпись Разносчикова В.В. заверяю:

Начальник управления по работе с персоналом



Евсюкова Т.А.

02.09.2026