

Отзыв научного руководителя
о работе Лю Цзюньцзе
над кандидатской диссертацией
«Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых
теплообменников-регенераторов авиационного ГТД»,
представленной к защите на соискание учёной степени кандидата
технических наук
по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и
энергоустановки летательных аппаратов (технические науки)

Лю Цзюньцзе окончил с отличием магистратуру факультета энергетики и энергии Северо-западного политехнического университета (КНР, г. Сиань) по направлению подготовки «Авиационные двигатели и энергетические установки». В 2022 году он поступил в аспирантуру (на очное отделение) федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» по направлению подготовки 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов. Во время обучения в аспирантуре на кафедре теплотехники и тепловых двигателей активно принимал участие в научных и образовательных проектах, реализуемых в институте двигателей и энергетических установок федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева».

В результате многолетних исследований в направлении исследования проблем проектирования, расчёта, изготовления теплообменных аппаратов и методов интенсификации теплообмена для авиационных газотурбинных двигателей с регенеративным циклом была сформирована общая методология и разработаны частные методики, которые и составили основу представляемой к защите кандидатской диссертации «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД».

Актуальность работы обусловлена объективной потребностью реализации высокоэффективных авиационных ГТД за счет применения теплообменник-регенератор может быть использован для утилизации теплоты выхлопных газов для подогрева сжатого воздуха перед камерой сгорания. Эффективная регенерация тепла позволяет радикально снизить удельный расход топлива и повысить эффективный КПД установки с 15 – 20 % до 30 – 35 % при сохранении той же степени повышения давления. Однако внедрение теплообменников-регенераторов сопряжено с существенной проблемой — в традиционном исполнении теплообменный аппарат может достигать 30–40 % от общей массы и габаритов ГТД, что существенно ограничивает его применение в авиационных

системах и комплексах. Среди типов регенераторов для газотурбинных двигателей пластинчато-ребристые теплообменники (ПРТ) являются наиболее предпочтительными благодаря компактности, термомеханической стойкости и конструктивной гибкости. Однако традиционные конфигурации рёбер (гладкие, прерывистые, волнистые) исчерпали возможности повышения эффективности: дальнейшая интенсификация теплоотдачи в классических ПРТ сопровождается недопустимым ростом гидравлического сопротивления, что снижает энергетический эффект регенераций из-за увеличения затрат мощности на привод компрессора. Преодоление указанной проблемы требует разработки новых геометрических структур матриц ПРТ, способных обеспечить качественно иной уровень теплогидравлических характеристик, а также методики проектирования сверхкомпактных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов для МГТД.

Поэтому целью работы является повышение эффективности авиационных ГТД с регенерацией теплоты за счёт применения спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов, разработанных и созданных методом проектирования на основе численного моделирования их рабочего процесса.

Ключевыми моментами, содержащими научную новизну и практическую значимость являются следующие.

1. Разработан и метод проектирования сверхкомпактных теплообменников-регенераторов для авиационных МГТД, объединяющий методики вычислительной гидрогазодинамики, интеллектуальные алгоритмы машинного обучения и многокритериальную оптимизацию. Применение данного метода за счёт интеграции контура активного обучения позволило гарантированно снизить погрешность прогнозирования до уровня менее 5 % всего за две итерации, обеспечив сокращение общих временных затрат и вычислительных ресурсов на 70–80 % по сравнению с традиционными подходами сплошного перебора.

2. Получены физические закономерности коэффициента теплоотдачи в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением, устанавливающие влияние интенсивных вторичных течений на разрушение теплового пограничного слоя. На основе полученных результатов, а также трехмерного численного моделирования и экспериментальных данных доказано преимущество спирального оребрения над традиционным волнообразным. Установлено, что за счёт генерации интенсивных вторичных течений спиральная конфигурация обеспечивает рост фактора теплоотдачи j на 42,33 % и комплексного показателя эффективности JF на 34,03 % (при $Re = 5000$), что подтверждает высокую эффективность выбранных геометрических параметров оребрения ТА.

3. Разработана и апробирована методика определения теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата для авиационного ГТД с использованием физико-ориентированных нейросетевых моделей доказала свою высокую точность определения параметров вновь создаваемых систем. Использование данной методики обеспечивает высокую точность прогнозирования ($R^2 > 0,996$, $MAPE < 1 \%$) во всем диапазоне рабочих параметров. Установлено, что после полного развёртывания и предварительного обучения системы весь последующий цикл многокритериальной оптимизации занимает не более 30 секунд.

4. Применение разработанной методики оценки эффективности позволило установить взаимосвязь между геометрическими параметрами ребер регенератора и интегральными термодинамическими показателями рабочего цикла авиационного двигателя. Системный анализ доказал, что внедрение оптимизированных ДСПРТ в состав силовой установки авиационного МГТД для сценария обеспечения минимальных массогабаритных характеристик позволяет: снизить рабочий объём матрицы теплообменного аппарата на 32,2 %, уменьшить общую массу регенератора на 18,6 % и снизить потери давления газа в трактах теплообменника на 4,8 %. В случае максимального увеличения тепловой эффективности авиационного МГТД, использование оптимизированной геометрии повышает тепловую эффективность ТА до 87,8 %, что обеспечивает рост эффективного КПД всей силовой установки на 1,5–1,9 %.

Достаточно высокая степень корреляции расчётных данных с результатами экспериментальных исследований (погрешность менее 5–10 %) доказывает надёжность предложенного метода проектирования сверхкомпактных теплообменников-регенераторов для авиационных МГТД. Дальнейшее развитие работы связано с адаптацией разработанной методики для оптимизации других типов теплообменных поверхностей, а также с интеграцией алгоритмов машинного обучения в системы сквозного междисциплинарного проектирования перспективных силовых установок летательных аппаратов.

Теоретическая значимость работы заключается в раскрытии механизмов интенсификации теплообмена в спиральных каналах сложной формы. Научно обоснован и качественным образом описан эффект возникновения трехмерных вихревых структур, определены условия его появления в зависимости от пространственной геометрии и шага спирального ребрения теплообменного аппарата при турбулентном режиме течения. Кроме того, теоретическую ценность представляет разработанная методика определения теплогидравлических характеристик теплообменного аппарата для авиационного ГТД с применением физико-ориентированного обучения нейронных сетей.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанный интеллектуальный комплекс прогнозирования параметров ПРТ авиационных

ГТД позволяет инженерам ускорить процесс расчета (уменьшить время расчёта на 2-3 порядка) и многокритериальной оптимизации теплообменных аппаратов.

Математические модели и программное обеспечение для проектирования и расчета теплообменников-регенераторов авиационного назначения и экспериментальная установка внедрены в учебный процесс по направлению подготовки 13.03.03 – Энергетическое машиностроение.

Необходимо отметить, что результаты исследования верифицированы по экспериментальным данным и зависимостям, полученным на разработанном и созданном экспериментальном стенде. Данные результаты хорошо согласуются с результатами других авторов. Достоверность результатов обеспечивается:

1. Применением стандартов численного моделирования: все расчёты выполнены с использованием верифицированных моделей турбулентности и прошли тщательную проверку на сеточную независимость; полученные результаты согласуются с опубликованными эталонными экспериментальными данными.

2. Разработкой системы экспериментальной валидации: создана экспериментальная установка с проведением калибровки измерительных приборов и проведением систематического анализа неопределенностей; экспериментальные данные подтверждают достоверность результатов численного моделирования.

3. Использованием надёжных алгоритмов машинного обучения: прогностические модели построены с применением методов оптимизации параметров (включая байесовскую оптимизацию), что обеспечивает предотвращение переобучения; точность и обобщающая способность моделей подтверждены на репрезентативной выборке экспериментальных данных.

4. Реализацией многомерного метода перекрестной проверки: применен комплексный подход, объединяющий численное моделирование, прогнозирование на основе ИИ и экспериментальную проверку; результаты, полученные различными методами, взаимно согласуются, что гарантирует надёжность теоретических выводов и их применимость в инженерной практике

Таким образом, в диссертационной работе представлено решение актуальной научно-технической задачи в области авиационного двигателестроения, направленной на повышение эффективности авиационных ГТД с регенерацией теплоты за счёт применения спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов, разработанных и созданных методом проектирования на основе численного моделирования их рабочего процесса.

За время работы над диссертацией Лю Цзюньцзе проявила себя как опытный исследователь, умеющий решать сложные и мультидисциплинарные задачи. Результаты его диссертационной работы использованы при выполнении государственного задания по проекту №FSSS-2024-0017, а также внедрены в

производственный процесс на предприятии АО «Металлист-Самара», что подтверждено соответствующим актом внедрения (29.05.2026 г.).

Высокие организационные и человеческие качества Лю Цзюньцзе приносят большую общую пользу в развитии кафедры теплотехники и тепловых двигателей Самарского университета.

Основные результаты выполненных Лю Цзюньцзе исследований по теме диссертации отражены в 16 научных работ, в том числе 4 статьи в рецензируемых научных изданиях, рекомендованном ВАК при Минобрнауки России, 9 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science и Scopus, и 2 прочие публикации. Он неоднократно выступала с докладами на всероссийских и международных научных конференциях.

Считаю диссертационную работу «Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД», соответствующей требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а соискателя Лю Цзюньцзе заслуживающего присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Научный руководитель,
доктор технических наук, доцент,
профессор кафедры теплотехники
и тепловых двигателей
Самарского университета



Д.А. Угланов

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» (Самарский университет),

443086 г. Самара, Московское шоссе, 34

e-mail: uglanov.da@ssaul.ru

Тел.: 8 (846) 267-43-22

