

ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Лю Цзюньцзе

«Метод проектирования спиральных пластинчато-ребристых теплообменников-регенераторов авиационного ГТД», представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов

Проблема повышения топливной эффективности авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) остаётся одной из ключевых в современном двигателестроении. Особенно остро она стоит для беспилотных летательных аппаратов длительного барражирования, где применение регенерации тепла выхлопных газов позволяет поднять эффективный КПД микроГТД (МГТД) с 15-20 % до 30-35 %. Однако массогабаритные ограничения сдерживают широкое внедрение регенераторов – в классическом исполнении теплообменник может достигать 30-40 % массы силовой установки, а традиционные ребристые поверхности уже практически исчерпали резервы интенсификации. В этом контексте диссертационная работа Лю Цзюньцзе, направленная на создание метода проектирования сверхкомпактных регенераторов с привлечением цифровых технологий и машинного обучения, является безусловно актуальной и имеющей большое практическое значение.

Научная новизна исследования представлена следующими результатами:

- разработан метод сквозного проектирования регенераторов для авиационных МГТД, в котором впервые объединены трёхмерное CFD-моделирование, экспериментальные данные, нейросетевые алгоритмы и многокритериальная оптимизация по алгоритму NSGA-II. Такой комплексный подход сокращает сроки и вычислительные затраты на поиск оптимальных конструкций в 100-1000 раз;

- установлены закономерности теплообмена и гидродинамики в каналах со спиральным и двуспиральным оребрением, причём выявлены физические механизмы образования пространственных вторичных течений и разрушения теплового пограничного слоя, которые определяют локальную интенсивность переноса тепла и потери давления;

- предложена оригинальная методика прогнозирования теплогидравлических характеристик (факторов $*j^*$ и $*f^*$) на основе физико-ориентированного обучения нейронных сетей – в отличие от чисто эмпирических корреляций, она непосредственно включает фундаментальные уравнения теплообмена и динамики потока в процесс обучения, обеспечивая

исключительную точность (коэффициент детерминации $> 0,996$, средняя относительная ошибка $< 1 \%$);

– разработана методика комплексной оценки эффективности МГТД с регенератором, устанавливающая количественную связь между геометрией микроструктуры поверхности и интегральными показателями цикла двигателя через метод числа единиц переноса (NTU), что позволяет оценивать влияние конструктивных изменений на системном уровне.

Практическая ценность работы подтверждена созданием интеллектуального вычислительного комплекса, который существенно ускоряет инженерную оптимизацию теплообменных аппаратов. Разработанные конструкции прошли апробацию и внедрены в производство на АО «Металлист-Самара», а также используются в учебном процессе Самарского университета, что зафиксировано соответствующими актами.

Достоверность полученных результатов не вызывает сомнений благодаря корректной постановке задач, обоснованному выбору физических моделей (верифицированная модель турбулентности BSL $*k^*-\omega$ с проверкой сеточной сходимости), созданию экспериментального стенда для испытаний фрагментов регенератора и хорошему совпадению расчётных данных с опытными (расхождение не превышает 5%).

Среди несомненных **достоинств** работы следует выделить удачную и нетривиальную синергию методов искусственного интеллекта и классической теплофизики, что выводит задачи проектирования на качественно новый уровень, а также высокую востребованность результатов как для фундаментальной науки, так и для прикладных разработок.

Вместе с тем, по содержанию автореферата можно высказать несколько **замечаний**:

1. Недостаточно освещено влияние технологических факторов, характерных для аддитивного производства (шероховатость поверхности, остаточные напряжения), на реальные характеристики спроектированных ребристых структур.

2. В разделе, посвящённом эксперименту, упоминается испытание лишь сегмента теплообменника, однако методология пересчёта локальных данных на полноразмерный аппарат, хотя и заявлена в четвёртой главе, в автореферате изложена неполно.

Перечисленные замечания носят уточняющий характер и не затрагивают главных научных и практических достижений диссертации.

В целом, диссертационная работа Лю Цзюньцзе представляет собой завершённое квалификационное научное исследование, выполненное на высоком методологическом уровне, содержит новые научно обоснованные технические решения, значимые для развития авиационного

двигателестроения. Диссертационная работа полностью соответствует критериям п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (с изменениями и дополнениями), а ее автор, Лю Цзюньцзе, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по научной специальности 2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов

Доцент кафедры «Ракетно-космическая техника и энергетические системы», к.т.н. (2.5.15. Тепловые, электроракетные двигатели и энергетические установки летательных аппаратов)

3 сентября 2026 г.



Шилова Алена Алексеевна

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

614990, Российская Федерация, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, д. 29, +7 (342) 219-80-67, rector@pstu.ru

Подпись Шиловой Алены Алексеевны заверяю:

Ученый секретарь Ученого совета

ФГАОУ ВО «ПНИПУ»,

к.и.н., доцент



Макаревич Владимир Иванович