

В диссертационный совет

Д 212.337.01

**при ФГБОУ ВО Пензенский государственный
технологический университет**

ОТЗЫВ

официального оппонента диссертации Генералова Дмитрия Александровича «Математическое моделирование тепловых процессов лопаточного аппарата турбомашин» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

1. Актуальность темы диссертации

Для современных авиационных турбин предъявляются значительные требования по ограничению шума, по требуемому ресурсу работы, по коэффициенту полезного действия (КПД). При этом ресурс работы и КПД авиационных турбинных двигателей во многом определяются температурой рабочего тела, рост которой ведет к увеличению КПД, но к снижению ресурса установок. В этой связи, требуется разработка не только эффективных систем охлаждения высокотемпературных элементов турбин, но и создание высокоточных и высокопроизводительных программных пакетов и оригинальных математических моделей, позволяющих производить анализ тепловых процессов лопаточного аппарата турбомашин. При этом трудность получения численного решения заключается в том, что лопаточный аппарат турбин взаимодействует с высоко турбулентным газовым потоком (степень турбулентности $Tu > 2$ %) при наличии продольного градиента давления. Следует отметить также, что численное решение для должно быть выполнено

в сопряженной постановке (уравнения для определения локальных значений коэффициентов теплоотдачи со стороны газового потока и потока охладителя и уравнения теплопроводности для расчета температурного поля лопатки турбины), так как получение решения в несопряженной постановке ведет к значительному увеличению погрешности при прогнозировании теплового состояния.

Таким образом, особенность проектирования новых авиационных турбин требует не только сокращения цикла производства, сокращения натурных испытаний, но и разработки оригинальных математических моделей и программных средств для высокоточного прогнозирования тепловых процессов высокотемпературных элементов турбомашин.

Решение этой задачи при использовании коммерческих программных пакетов требуют привлечения значительных финансовых и вычислительных ресурсов. В связи с вышеизложенным, тема диссертационной работы, цель которой заключена в математическом моделировании и разработке численного метода, реализованного в комплексе программ, для проведения вычислительного эксперимента по исследованию тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок с выявлением эффективных методов их тепловой защиты, является актуальной и представляет определенный интерес для авиационных предприятий и проектных организаций, занимающихся проектированием и производством авиационных турбоустановок, энергоустановок и систем.

2. Структура и объем диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (99 пунктов) и приложения, включает 154 страницы (в том числе, приложения), 69 рисунков и 3 таблицы.

Объект исследования – тепловые и газодинамические процессы в газотурбинных установках с системами охлаждения лопаточного аппарата.

Предмет исследования – методы математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок.

Первая глава посвящена анализу техники и технологии охлаждения лопаток турбомашин, работ по исследованию эффективности систем охлаждения лопаток, анализу теплообмена с внешней стороны лопаток, феномену температурной стратификации и анализу методов и программных средств для численного моделирования теплового состояния лопаток турбомашин. По рассмотренным вопросам Генераловым Д.А. сделаны выводы. На основании сделанных выводов определены задачи исследования.

Вторая глава посвящена математической постановке задачи численного моделирования теплового состояния лопаток турбомашин в сопряженной постановке, включающая в себя дифференциальное уравнение теплопроводности для расчета температуры лопатки, уравнения подобия для определения коэффициентов теплоотдачи на передней и задней кромке лопатки, уравнение подобия для расчета коэффициентов теплоотдачи со стороны охладителя, а также дифференциальные уравнения пограничного слоя с необходимыми граничными условиями для определения локальных коэффициентов теплоотдачи для корыта и спинки лопатки. Особенность предлагаемого решения в том, что тепловые процессы в лопаточном аппарате определяются в сопряженной постановке. Сделаны выводы по разделу.

Третья глава содержит описание численного метода решения дифференциального уравнения теплопроводности, метода решения дифференциальных уравнений пограничного слоя, на поверхности корыта и спинки лопатки, методики решения сопряженной задачи определения теплового состояния лопатки турбомашин. Генералов Д.А. разработал алгоритм и процедуры численного исследования теплового состояния лопатки турбомашин при реализации различных способов тепловой защиты лопаточного аппарата, и обеспечивающие заданную точность результатов

расчета при сокращении вычислительных затрат. Получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

В четвертой главе выполнено описание разработанного оригинального комплекса программ для моделирования теплового состояния лопаточного аппарата в сопряженной постановке. Особенностью разработанного программного комплекса является то, что комплекс имеет дружелюбный графический интерфейс, удобный при использовании конструкторами и технологами при проектировании и анализе эксплуатации газовых турбин. Возможно, следовало бы, показать возможность использования разработанного программного продукта для анализа теплового состояния лопаточного аппарата паровых турбин. Выполнена валидация разработанных моделей методов и реализующих их оригинальных программных средств. Выполнено численное исследование теплового состояния лопаток турбомашин, в том числе с оригинальными системами охлаждения с демпфирующими полостями, а также с устройствами газодинамической температурной стратификации. Полученные автором результаты опубликованы в журналах из списка ВАК и в материалах, индексируемых в иностранных базах Scopus и Web of science, отмечены дипломами на выставках и конференциях различного уровня, проводились при грантовой поддержке.

3. Научная новизна. Научная новизна рассмотренной диссертационной работы заключается в разработке оригинального метода моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате газотурбинных установок, позволяющем проводить анализ и учет параметров пограничного слоя на лопатках турбины, и обеспечивающий получение численных результатов по количественной оценке параметров тепловых процессов лопаточного аппарата при различных параметрах работы турбины и с различными схемами охлаждения. Кроме того, на основе сопряженного решения задачи

теплопроводности лопаток и задачи анализа пограничного слоя выполнено численное исследование тепловых процессов при конвективном охлаждении лопаток с демпфирующими полостями, при использовании газодинамической температурной стратификации в схеме тепловой защиты лопаточного аппарата турбомашин. На основе конечно-разностного метода и метода теплового баланса разработаны методики численного расчета и алгоритмы математического моделирования тепловых процессов в лопаточном аппарате с различными схемами тепловой защиты. Разработанные методы и алгоритмы реализованы в оригинальном комплексе программ для анализа теплового состояния лопаток турбомашин с учетом газодинамической обстановки в межлопаточном пространстве.

4. Методы исследования. В диссертационной работе применены современные методы исследования, базирующихся на основных положениях теории аэротермодинамики, тепломассообмена, пограничного слоя, математического моделирования и численных методов.

5. Практическая значимость. Практическая значимость работы заключается в разработке комплекса программ для анализа на базе вычислительного эксперимента перспективных технических решений по тепловой защите лопаточного аппарата, что позволило оценить возможности использования газодинамической температурной стратификации для увеличения ресурса газотурбинной установки. Разработаны в результате численного анализа с использованием оригинальных программ технические решения для газотурбинного двигателя (патент РФ №2537793), позволяющие по оценке Генералова Д.А. повысить КПД турбоустановок на 0,35% при увеличении температуры рабочего тела на 50 градусов.

Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при научно-техническом сопровождении проектов по проектированию газотурбинных установок.

6. Реализация и внедрение результатов диссертационной работы.

Следует отметить, что исследования выполнялись при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 15-48-02275-р_а «Разработка принципов и моделей создания и исследования новых энергосберегающих, экологически чистых и замкнутых теплотехнологий с газодинамической температурной стратификацией рециркулируемого теплоносителя», № 16-38-00475 мол_а «Разработка программно-информационного комплекса для исследования и отработки технологии тепловой защиты лопаток турбомашин») и Российского агентства по делам молодежи (приказ №192 от 24.12.2014 г.) по проекту «Разработка программно-информационного комплекса для моделирования и исследования теплового состояния лопаток турбин», также частично по гранту Президента Российской Федерации МД-1576.2014.8 «Моделирование, исследование и разработка методов повышения эффективности энергомашин с дисперсным рабочим телом». Следует отметить наличие графического пользовательского интерфейса у разработанного программного комплекса, что облегчает его использование производственными предприятиями, а также позволяет получать новые научные результаты по анализу тепловых процессов в лопаточном аппарате газовых турбин.

Разработанный автором оригинальный программный комплекс и методические разработки по исследованию тепловых процессов в лопаточном аппарате газовых турбин, используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению «Теплоэнергетика и теплотехника» на кафедре «Тепловая и топливная энергетика» ФГОУ ВО Ульяновский государственный технический университет, а также на производстве в филиале «Ульяновский» ПАО «Т Плюс» для анализа работы лопаточного аппарата турбомашин. Имеются документы (акты), подтверждающие внедрение результатов диссертационной работы.

7. Достоверность полученных результатов. Достоверность выполненных в диссертационной работе исследований обеспечена совпадением результатов, полученных в ходе численного исследования с результатами экспериментальных исследований, выполненных другими авторами, а также оценкой сеточной сходимости и анализом неопределенности полученных результатов численного эксперимента (ГОСТ 54500.1-2011).

8. Оформление материалов диссертации. Диссертация изложена технически грамотно, хорошим литературным языком, снабжена достаточным количеством иллюстративного материала и достаточно качественно оформлена.

9. Апробация диссертационной работы. Степень апробации работы на мой взгляд, вполне достаточна. Основные положения работы опубликованы в печати (среди публикаций имеется 17 работ из них 2 статьи в изданиях из перечня ВАК, 3 статьи в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science, 1 патент РФ на изобретение, 1 свидетельство для регистрации программы для ЭВМ).

10. Замечания по диссертационной работе. 1. В работе не приведено сравнение с решениями, полученными в апробированных CAE на базе свободной или коммерческой лицензии.

2. При расчете коэффициентов теплоотдачи со стороны охладителя и для передней и задней кромок использованы уравнения подобия, дающие погрешность определения коэффициента теплоотдачи до 25 процентов. Чем объясняется то, что разработанная модель не полностью базируется на дифференциальных уравнениях движения, энергии, неразрывности и уравнении состояния?

3. При выполнении верификации разработанной модели и оригинальных программных средств не описано для какого сечения по высоте лопатки выполнено сравнение коэффициентов теплоотдачи, полученных в результате

численного решения и по результатам экспериментальных исследований КАИ (рис. 4.20). Кроме того, величина коэффициентов теплоотдачи определяется также геометрией лопаточного аппарата, а в диссертационной работе не приведено описание геометрии лопатки, тепловое состояние которой было исследовано в заимствованных автором для верификации экспериментах КАИ.

4. При анализе сеточной сходимости было бы эффективнее показать температуру стенки для корыта и спинки лопатки в зависимости от качества расчетной сетки. Кроме того, интересным является анализ влияния типа расчетных элементов сетки на время получения численного решения заданной точности.

5. На стр. 114 при обращении к экспериментам КАИ (рис. 4.20, 4.21) отсутствует ссылка на источник литературы по эксперименту.

6. В подрисуночной надписи (рис. 1.7.) допущена опечатка.

10. Заключение. Диссертационная работа Генералова Д.А. выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, содержание автореферата отражает основные положения диссертационной работы. Диссертационная работа Генералова Д.А. является законченной научно-исследовательской работой и может быть квалифицирована, как новое решение важных научно-прикладных задач. Работа соответствует п.1 («Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»), п. 4 («Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента») и п. 5 («Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента») паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

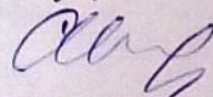
Как следует из вышеизложенного, представленная работа Генералова Д.А. по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению выполненных исследований соответствует требованиям,

10. Заключение. Диссертационная работа Генералова Д.А. выполнена на достаточно высоком научно-техническом уровне, содержание автореферата отражает основные положения диссертационной работы. Диссертационная работа Генералова Д.А. является законченной научно-исследовательской работой и может быть квалифицирована, как новое решение важных научно-прикладных задач. Работа соответствует п.1 («Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений»), п. 4 («Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента») и п. 5 («Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента») паспорта специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Как следует из вышеизложенного, представленная работа Генералова Д.А. по актуальности, научно-техническому уровню и практическому значению выполненных исследований соответствует требованиям, предъявляемым ВАК к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Официальный оппонент, кандидат технических наук,

доцент



А.А. Цынаева

Шифр специальностей, по которым проведена защита диссертационной работы оппонента Цынаевой А.А. 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 01.04.14

«Теплофизика и теоретическая теплотехника»

Подпись к.т.н., доц. Цынаевой А.А. ~~закрываю~~

Ученый секретарь СамГТУ, д.т.н.



Малиновская Ю.А.