

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИПМ ДВО РАН,  
академик РАН, Гузев М.А.



### ОТЗЫВ

ведущей организации – Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной математики» Дальневосточного отделения Российской академии наук на диссертацию Андрианова Ивана Константиновича «Численное моделирование процессов теплоотвода в оболочковых элементах турбомашин на основании условия длительной прочности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

#### Актуальность исследования

В диссертационном исследовании рассматривается комплексная задача численного моделирования теплоотвода в оболочковых элементах турбомашин, имеющих внутреннюю систему охлаждения. Актуальность исследования обусловлена повышением рабочих температур газовых сред в работе газотурбинных двигателей, что требует проведения исследований, обеспечивающих оптимальную тепловую защиту элементов. Эффективность отвода тепла в оболочковых элементах турбомашин, находящихся в условиях внешнего нагрева и внутреннего охлаждения, во многом зависит от возможностей управления параметрами теплообмена и регулирования течения процессов охлаждения с целью дальнейшего совершенствования теплообменных систем.

В связи с модернизацией систем охлаждения оболочковых элементов турбомашин разработка математических моделей течения теплообменного процесса и методов их расчета, позволяющих оптимизировать параметры работы системы теплоотвода, представляется весьма непростой задачей. Одна из сложностей заключается в комплексной постановке задачи исследования, нелинейности рассматриваемых процессов, а также необходимости применения эффективных математических инструментов для достижения оптимальных значений параметров теплоотвода. Все чаще решения прикладных проблем требует использования подхода, ориентированного на методы математического теплового моделирования, теории прочности, газодинамики.

#### **Анализ содержания диссертации**

Диссертация изложена на 154 страницах, состоит из введения, пяти глав основного текста, списка литературы, состоящего из 138 наименований и приложений.

Во введении сформулированы цели и задачи исследования, обоснована актуальность и практическая значимость результатов решения исследуемой проблемы. Обоснована важность разработки подхода к реализации теплового состояния оболочковых элементов, удовлетворяющего прочностным условиям, и возможность оптимизировать процесс теплоотвода.

В первой главе представлена вводная часть исследования, отражено текущее состояние вопроса математического моделирования процессов теплопереноса, применения численных методик расчета, а также возможностей управления процессами отвода тепла.

Во второй главе дана физическая постановка задачи теплоотвода, представлены определяющие соотношения, описывающие исследуемый процесс отвода тепла с позиции минимизации массового расхода охладителя; предложен прочностной критерий, на основании которого обеспечивается

достижение минимальных затрат хладагента на охлаждение оболочковых элементов. Представленная математическая модель описывает течение процесса теплоотвода при требуемом прочностном условии для однослойных оболочковых элементов и оболочек с теплозащитным слоем, имеющих внутреннюю систему охлаждения.

В третьей главе представлены численные закономерности для определения минимального массового расхода охладителя в каналах теплоотвода оболочкового элемента для однослойных оболочковых элементов и оболочек с теплозащитным слоем. Построена нелинейная разностная схема для проведения оценки распределения коэффициентов теплоотдачи на поверхности теплоотвода, а также изменения температуры хладагента в каналах охлаждения. Построена разностная схема с применением итерационных процедур для оценки полей скоростей и давлений в каналах охлаждения, получены численные закономерности процесса теплопереноса, связывающие параметры отвода тепла и геометрические характеристики каналов. В четвертой главе отражены особенности программной реализации разработанной численной методики расчета геометрии каналов теплоотвода, при которой обеспечивается минимальный массовый расход на основании критерия длительной прочности. Отражены последовательность решения комплексной задачи оптимального теплоотвода, основные шаги для получения численной оценки исследуемых параметров.

В пятой главе представлены результаты расчета параметров теплоотвода, при которых обеспечивается процесс оптимального охлаждения для оболочковой турбинной лопатки при наличии и отсутствии теплозащитного слоя для заданной схемы нагружения, а также при различных временных интервалах работы теплообменной системы. Представлены различные вариации ширины поперечного сечения каналов теплоотвода, при которых достигается минимальный расход хладагента.

## Оценка результатов диссертации, их значимость для науки и производства

Новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

1. Предложен новый подход к оптимизации процессов охлаждения оболочковых элементов на основании разработанных математических моделей, позволяющих рассчитать минимальный массовый расход охладителя и соответствующую геометрию каналов теплоотвода в однослойных и двухслойных оболочковых элементах на основании критерия длительной прочности.

2. Предложены новые численные процедуры для оценки оптимального теплоотвода на основании нелинейных разностных уравнений и итерационных схем, позволяющих минимизировать расход охлаждающих газовых сред и оценить кинематическую картину течения охладителя, процесс теплоотдачи, при которых реализуется равнопрочное напряженное состояние оболочковых элементов.

3. Разработан новый программный комплекс для проведения вычислительных экспериментов по расчету геометрических характеристик каналов внутренней системы охлаждения, обеспечивающих минимальный массовый расход хладагента.

Диссертантом в полной мере выполнено требование «Положения о порядке присуждения ученых степеней» об опубликовании результатов исследований. Основные результаты диссертации нашли отражение в 17 публикациях автора, в том числе 4 - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 3 – свидетельства о государственной регистрации программ. Основные результаты проведенного диссертационного исследования были представлены на научных конференциях, семинарах и конкурсах.

Полученные результаты развивают область научных исследований, связанных с оптимизацией теплообменных процессов, сопряженных с оценкой напряженного состояния. Результаты диссертационного

исследования, а также разработанные программы имеют практический интерес и могут быть использованы в опытно-конструкторских бюро при проектировании газотурбинных двигателей, модернизации систем охлаждения оболочковых элементов турбин.

### Замечания по работе

1. В работе ничего не сказано о теплообмене излучением. Вместе с тем, как правило, даже при интенсивном конвективном теплообмене роль лучистого теплового потока в подобных задачах оказывается важной, в том числе за счет переизлучения лопаток друг на друга. Во всяком случае, следовало бы оговорить, почему не учитывается этот теплообмен.

2. В работе не указано, учитывался ли теплообмен на торцевых поверхностях оболочковых элементов.

3. В работе не учитывалась переменность свойств и многослойность теплозащитных покрытий, используемых для тепловой изоляции элементов.

4. В работе ничего не говорится о погрешности используемых в работе численных методов, особенно в окрестностях экстремальных точек кривых, представленных на рисунках гл. 5.

5. В работе никак не комментируется погрешность использования стационарных уравнений гл. 2 при расчетах в гл. 5, относящихся к строго говоря нестационарным процессам, характеризуемым различными временами  $\tau$ .

6. В работе не обсуждается влияние на вычислительные результаты погрешностей полуэмпирических формул (2.26) – (2.28), (2.36), (2.43), формула на с. 50 (6-ая строка снизу).

7. В работе не проводится оценка вычислительной сложности применяемых алгоритмов, и не дается информация о времени счета используемых программ.

8. В работе ничего не говорится о сравнении полученных в ходе численного эксперимента результатов с натурными экспериментами, опубликованными в литературе или проведенными самостоятельно.

9. Соотношение (2.3) использует линейную аппроксимацию, следовало бы обосновать возможность такой аппроксимации и указать величину возможной погрешности.

10. В работе приводится ряд практических рекомендаций на основе результатов численного моделирования, однако их недостаточно. Выводы на основе этих результатов нередко имеют расплывчатый характер и непонятно, как их использовать на практике. Например, «Температура хладагента постепенно повышается в соответствии с направлением течения потока. Наибольшее изменение температуры охладителя отмечается в канале периферийного сечения» (с. 100); «Наименьшая температура достигается в конце расчетного контура» (с. 105).

### Заключение

Диссертация работа Андрианова И. К. представляет собой научно-квалификационную работу, выполненную на высоком научном уровне и представляет собой самостоятельное законченное исследование, в котором содержится решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития соответствующей отрасли научных знаний. Диссертация обладает актуальностью и новизной, соответствует паспорту специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ» согласно следующим пунктам: разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента; комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и

вычислительного эксперимента. Выводы и рекомендации по использованию результатов исследования обоснованы и имеют практическое значение. В автореферате и публикациях соискателя в полной мере отражено содержание диссертации, а также наиболее существенные положения и выводы.

Представленная работа отвечает требованиям положения ВАК о присуждении ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Андрианов Иван Константинович заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв на диссертацию И.К. Андрианова обсуждён и одобрен на заседании научно-исследовательской группы вероятностных методов и системного анализа ФГБУН Институт прикладной математики ДВО РАН 30.03.2017 г. (протокол № 2).

Отзыв подготовили:

Главный научный сотрудник ИПМ ДВО РАН, д.ф.-м.н., профессор

Г.Ш. Цициашвили

Цициашвили Гурами Шалвович

Адрес: 690041, Владивосток, ул. Радио, 7; e-mail: guram@iam.dvo.ru

Тел.: 8 (914) 693-27-49

Главный научный сотрудник ИПМ ДВО РАН, д.т.н., профессор

А.Н. Жирабок

Жирабок Алексей Нилович

Адрес: 690041, Владивосток, ул. Радио, 7; e-mail: zhirabok@mail.ru

Тел.: 8 (924) 234-58-95

Адрес федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт прикладной математики» Дальневосточного отделения Российской академии наук: Россия, 690041, г. Владивосток, ул. Радио, 7.