

**УТВЕРЖДАЮ**  
Ректор  
ФГБОУ ВО «Уфимский  
государственный авиационный  
технический университет»,  
д.т.н., профессор



Криони Н. К.  
2019 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

на диссертацию Ле Тиен Зьонг «Конструктивные методы обеспечения прочности и повышения эффективности бандажных полок лопаток рабочего колеса турбины газогенератора авиационных ГТД», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов

#### **Актуальность темы диссертационного исследования**

Повышение экономичности, надёжности и ресурса авиационных ГТД является одной из наиболее важных задач, решаемых при проектировании авиационных двигателей новых поколений, при доводке и модернизации двигателей, находящихся в эксплуатации. Сложность решения этой задачи заключается в том, что в двигателях новых поколений имеет место существенный рост максимальной температуры газа перед турбиной, которая в двигателях 5-го и 6-го поколения может достигнуть 1900...2100 К.

Установка бандажной полки на торце пера лопатки позволяет уменьшить концевые потери энергии газа, вследствие того полностью исключаются его перетекания в радиальном зазоре, с корыта на спинку профиля. Кроме того, бандажная полка позволяет снизить изгибающую нагрузку и тем самым уменьшить уровень переменных динамических напряжений на профильную часть пера лопатки. Это обстоятельство очень существенно, поскольку ресурс горячих узлов авиационных ГТД примерно в два раза меньше, чем ресурс его холодных узлов. Поэтому исследование новых конструктивных схем оптимальной геометрии бандажных полок на лопатках рабочего колеса газогенератора с целью обеспечения её прочности и долговечности, новых систем их охлаждения, предназначенных для их реализации в перспективных проектах высокотемпературных турбин, является важной и актуальной задачей, решению которой посвящена диссертация Ле Тиен Зьонг.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

ЗХ № 05 04 2019

## Структура диссертационной работы

Диссертационная работа, представленная Ле Тиен Зыонг, выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва. Она состоит из Введения и 6-ти глав, каждая из них заканчивается выводами, полученными на основании содержания проведенных исследований. В конце диссертации представлено заключение, содержащее основные итоги выполненной работы, и список использованных источников. Общий объём работы 109 страниц, включая 73 рисунка, 2 таблицы и 70 библиографических ссылок.

Во **Введении** показана актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, показана научная новизна положений, выносимых на защиту.

**В первой главе** представлен анализ конструктивных схемы турбин современных ГТД, их систем охлаждения, методы снижения температуры охлаждающего воздуха. Рассмотрены имеющиеся резервы по повышению интенсивности охлаждения профильной части пера лопаток рабочего колеса турбин газогенератора авиационных ГТД и эффективность использования теплозащитных покрытий нового поколения.

В последнем параграфе этой главы представлены результаты расчётной оценки допустимой температуры ( $T_{мет}$ ) лопаток турбин при изменении параметра  $\theta = (T_{г}^* - T_{лоп}) / (T_{г}^* - T_{охл}^*) = 0,3 \dots 0,54$ , характеризующего интенсивность их охлаждения, и температуры газа перед турбиной, равной  $T_{г}^* = 1800 \dots 2100\text{K}$ , которая соответствует максимальной температуре газа перед турбиной для авиационных ГТД 5-го и 6-го поколений.

В выводах по главе 1 показано, что имеются определённые резервы в повышении уровня напряжений в рабочих лопатках турбин, которые можно использовать с целью установки на их периферии бандажных полок, способствующих повышению КПД и ресурса современных и вновь проектируемых турбин авиационных ГТД.

**Вторая глава** посвящена исследованию методики сопряженного численного моделирования бандажированных рабочих лопаток турбины в программе Ansys Workbench, где Ansys CFX используется для расчёта газодинамики и теплообмена, а Static Structural - для расчёта напряжённого состояния лопатки. Объектом исследования является рабочая лопатка турбины газогенератора ГТД, на которой установлена бандажная полка, характерной для современных турбин относительной высоты пера лопатки  $(h/b) = 1,75$ . В этой главе представлена геометрия решёток профилей исследуемой лопатки, трёх базовых сечения лопатки, в корне, середине и на периферии лопатки, а также конструктивные углы на входе и выходе из профиля, величины хорды и шага между отдельными профилями, составляющими решётки профилей.

Показаны граничные условия, выбранные для расчетов температурного состояния

бандажной полки и профильной части пера лопатки, траекторий линий тока охлаждающего воздуха, осуществляющего плёночное охлаждение наружных и внутренних поверхностей бандажных полок со стороны проточной части турбины. Данная методика может быть использована для расчётной оценки действующих напряжений и температур пера рабочей лопатки ТВД и её бандажной полки.

**Третья глава** содержит результаты исследований и анализ конструктивных решений по обеспечению эффективного охлаждения подполочных сечений и критичных участков бандажной полки, а также температурного состояния концевых частей гребней лабиринтных уплотнений, устанавливаемых на этих полках, которые могут быть использованы при проектировании бандажированных лопаток турбин газогенераторов современных и перспективных ГТД.

Представлены основные геометрические параметры решёток профилей, влияющих на характеристики рабочих лопаток турбины газогенератора ГТД. Показан способ охлаждения подполочного участка пера лопатки дополнительным рядом отверстий, из которых выпускается охлаждающий воздух на периферии пера лопатки. Плёночного охлаждения переднего гребня лабиринтного уплотнения рядом отверстий, расположенных на полке, в основании этого гребня. Конвективное охлаждение самой полки рядами каналов, расположенных в её толщине.

**Четвертая глава** посвящена совершенствованию системы уплотнения радиального зазора в ступени турбины, в которой на бандажной полке лопатки рабочего колеса установлено лабиринтное уплотнение. Автором исследована структура течения газа через радиальный зазор, различные конструкции лабиринтных уплотнений, отличающихся их формой и схемой установки. Предложена конструкция закрытого радиального зазора для снижения перетеканий газа из проточной части турбины через лабиринтное уплотнение, установленное на бандажной полке, и количественная зависимость изменения КПД ступени турбины газогенератора от относительной величины радиального зазора.

**В пятой главе** автором рассмотрены конструктивные методы обеспечения прочности профильной части пера лопатки, и конвективно-плёночного охлаждения бандажной полки рабочей лопатки ТВД. Показано, что можно обеспечить запас прочности пера бандажированных лопаток при использовании новых жаропрочных материалов, теплозащитных покрытий, новой схемы конвективно-плёночного охлаждения и оптимизации формы бандажной полки.

**В шестой главе** представлены конструктивные методы локализации зон распространения вторичных токов и повышения эффективности рабочей лопатки турбины при установке серповидного гребня на спинке пера рабочих лопаток ступени турбины под бандажной полкой. Показано, что аналогичный результат получается при установке гребня на спинке сопловой лопатки турбины, поскольку физическая картина образования вторичных токов одинакова, отличие состоит только в их интенсивности.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Научная новизна заключается в том, что разработана новая схема конвективно-плёночного охлаждения бандажной полки лопатки рабочего колеса высокотемпературной турбины высокого давления авиационного ГТД, отличающаяся тем, что каналы охлаждения, выполненные в толщине бандажной полки рабочей лопатки турбины, имеют локальные выходы охлаждающего воздуха как на поверхности полки, расположенные на её внешней или внутренней сторонах, так и в месте нахождения максимальных изгибных напряжений, конструктивно – в месте перехода от пера лопатки к бандажной полке.

В соответствии с поставленными задачами в диссертационной работе получены следующие научные результаты:

- рекомендован метод проектирования ассиметричной бандажной полки, установленной на торце пера рабочей лопатки турбины, для снижения уровня изгибных напряжений на вогнутой стороне пера лопатки, поскольку там температура лопатки на значительную величину выше, чем на выпуклой стороне пера лопатки;

- разработана конструктивная схема конфигурации радиального зазора, где на входе и выходе из лабиринтного уплотнения организован поворот потока примерно на  $180^\circ$ , в результате чего появляются отрывные зоны вихревого течения, снижающие потери от утечек газа, поступающего из проточной части турбины;

- предложен конструктивный способ локализации вторичных токов в пристеночной области, примыкающей к бандажной полке пера лопатки, в котором, на спинке пера лопатки, под полкой, на расстоянии, близком к полке, за радиусом перехода от полки к поверхности пера лопатки, устанавливается гребень, препятствующий распространению вторичных токов по высоте пера лопатки.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов**  
Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что автором разработана методика проектирования бандажной полки и обеспечения её прочности в лопатках турбины газогенераторов современных и перспективных ГТД, имеющих высокие температуры газа перед турбиной. Автором диссертации предложено использовать систему конвективно-плёночного охлаждения не только пера лопатки, но и самой бандажной полки, как на её внутренней, так и наружной сторонах.

### **Достоверность результатов диссертационного исследования**

Достоверность диссертационной работы основывается на совпадении направленности и ограниченности зоны распространения вторичных линий тока под бандажной полкой, при установке на спинке профиля серповидного гребня с результатами эксперимента, а также на том, что все расчеты проводились в лицензионном пакете Ansys Workbench.

### **Публикация основных результатов**

Основные результаты диссертации опубликованы в 10-ти работах, из них 5 статей в журналах, рекомендованных ВАК по специальности 05.07.05, 5 статей в других рецензируемых журналах. Диссертация Ле Тиен Зьонг представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, и написана автором самостоятельно. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

### **Конкретные рекомендации по использованию результатов диссертации**

Результаты диссертационной работы Ле Тиен Зьонг могут быть использованы в авиационных Вузах в качестве методики проектирования бандажированных лопаток турбин, и на предприятиях авиационного двигателестроения при проектировании современных и перспективных высокотемпературных ТВД с бандажированной рабочей лопаткой.

### **Замечания по диссертационной работе**

1. Автор приводит схемы плёночного охлаждения вогнутой поверхности подполочного сечения пера лопатки с бандажом (см. Рис.3.7, изделие НК-93) и лопатки без бандажа (см. Рис.5.1), используемые при проектировании отечественных и иностранных ТВД. Однако аналогичная схема, предложенная им для охлаждения серповидного ребра, ограничивающего распространение вторичных токов по направлению к срединной её части, должна была бы быть дополнена информацией, касающейся температурного состояния этого гребня, не имеющего каналов внутреннего охлаждения.
2. Расчеты теплонапряжённого состояния пера и полки лопатки выполнены без учёта наличия теплозащитных покрытий. Их эффективность учитывалась только в виде градиента температуры, который имел место при исследованиях на образцах лопатки, на покрытий различной толщины. Реальная лопатка в рабочих условиях имеет переменную температуру по высоте и по обводам профиля.
3. На стр.14 диссертации указано: «...наш опыт показывает...», что струйное охлаждение бандажной полки воздухом, направляемым через отверстия в плавающей вставке, «...малозэффективно». Необходимо пояснить это заключение примером какого-либо реального исследования.
4. На той же странице имеется утверждение, что «... в аппарате закрутки температура воздуха также снижается...» и ссылка на Атлас МАИ, а не учебник «Конструкция и проектирование авиационных ГТД».
5. На странице 42 указано, что «...компьютерные технологии позволяют осуществлять сложные экспериментальные исследования...». Очевидна ошибка, должно быть «... сложные расчетные исследования». На странице 68 написано, что «... плёночные

отверстия на стороне корыта торцевой (периферийной) части пера лопатки наклонены под большим углом...». Не указано, относительно какой оси, очевидно, имеется в виду ось, перпендикулярная к поверхности пера лопатки.

6. В тексте имеются отдельные грамматические ошибки. Например, на стр. 40 вверху фраза «На Рис.2.13 представлены...» в её окончании не имеет точки.

Указанные недостатки не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы.

**Заключение о соответствии диссертационной работы критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней ВАК РФ**

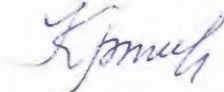
Диссертационная работа Ле Тиен Зыонг «Конструктивные методы обеспечения прочности и повышения эффективности бандажных полок лопаток рабочего колеса турбины газогенератора авиационных ГТД» является завершённым научным исследованием, отражающим новое конструкторское решение актуальной научной проблемы в современных и перспективных авиационных двигателях.

Работа отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утверждённого постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор Ле Тиен Зыонг заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры «Авиационные двигатели» факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта Уфимского государственного авиационного технического университета « 1 » апреля 2019 г., протокол № 9.

Отзыв составлен:

доктор технических наук (05.07.05), профессор  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»,  
профессор кафедры «Авиационные двигатели»

 (И.А. Кривошеев)  
« » апреля 2019 г.

Адрес организации: 450008, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. К. Маркса, д. 12

Телефон: + 7 (347) 272-29-18

e-mail: office@ugatu.su