



Опытно-конструкторское
Бюро имени А. Люльки



«Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки» («ОКБ им. А. Люльки»)
филиал ПАО «ОДК-Уфимское моторостроительное производственное объединение»
ул. Касаткина, 13, г. Москва, Российская Федерация, 129301
Тел.: +7(495) 783-01-11, факс: +7(495) 683-09-97, 686-75-66, <http://www.umpo.ru>, e-mail: okb@okb.umpo.ru
ОГРН 1020202388359, ИНН 0273008320, КПП 771643001

19.02.2019 № 260-2400/344
на № _____ от _____

129993, Москва, А-80, ГСП-3,
Волоколамское шоссе, д.4,
Председателю диссертационного совета
Д212.125.08
доктору технических наук профессору
Равиковичу Ю.А.

Уважаемый Юрий Александрович!

Направляю Вам отзыв главного специалиста нашего ОКБ д.т.н. Мамаева Б.И.
как официального оппонента на диссертацию Ле Тиен Зыонга, представленную на
соискание ученой степени кандидата технических наук.

Приложение: упомянутый отзыв на 5 листах в 2 экз.

Начальник КБ

Поляков К.С.

Исполнитель
Касьянова В.Г.
тел. 8(499)755 05 71

19.02.19

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. №
28 02 20 19

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу **Ле Тиен Зыонга** «Конструктивные методы обеспечения прочности и повышения эффективности бандажных полок лопаток рабочего колеса турбины газогенератора авиационных ГТД», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05 - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов»

Задача повышения КПД турбин, учитывая уже достигнутый высокий уровень их аэродинамического совершенства, является не только весьма актуальной, но и очень сложной. Именно поиск резервов улучшения эффективности турбины заставляет внимательно изучать любые возможности снижения потерь энергии в ее проточной части, так как в случае успеха даже десятые доли процента КПД могут обеспечить значительную экономию топлива.

Радиальный зазор между рабочими лопатками и корпусом - один из источников больших потерь энергии, особенно в первых ступенях высокотемпературных турбин с короткими лопатками. Когда они из-за высоких механических и термических нагрузок выполняются без бандажа, потери КПД в радиальном зазоре могут превышать три процента.

Бандажирование лопаток позволяет существенно снизить эти потери: во-первых, уменьшаются осевые перетекания за счет использования лабиринтного уплотнения и уменьшения самого зазора в силу допуска задеваний лопаток о корпус и, во-вторых, исключаются перетекания газа в зазоре с корыта на спинку лопаток. Вместе с тем, рост окружной скорости и температуры газа перед турбиной создает большие трудности для постановки бандажа из-за требования обеспечить надежность лопаток в работе. Поэтому варианты лопаток без бандажа, которые доступнее, менее рискованные и предпочтительные для производства, наиболее распространены в первых ступенях современных турбин.

Из сказанного следует, что соискатель ставит **актуальную научно-техническую задачу** в области проектирования высокотемпературных осевых турбин, имеющую большое прикладное значение.

Конкретные задачи диссертационного исследования и пути их решения (введение и гл. 1) в целом разумно определены в результате обзора схем турбин современных ГТД, анализа проблем, возникающих при постановке бандажа, и возможностей их решения. Рассмотрены пути улучшения температурного и прочностного состояния лопаток с бандажом за счет

применения в системе охлаждения турбины аппарата спутной закрутки воздуха, теплообменника, конвективно-плечного охлаждения лопатки, а также применения современных жаропрочных сплавов. К сожалению, в этой части диссертации мало использованы результаты известных по этой теме отечественных работ (А.М. Завадовского, С.З. Копелева, К.М. Попова и др.).

Примененный комплексный подход к решению поставленных задач (гл. 2) в целом правилен и может обеспечить **достоверность** основных полученных результатов и сделанных выводов. Он базируется на численном моделировании пространственных явлений в рабочем венце турбины: построении сопряженного расчета теплообмена и на его базе расчете напряженного состояния лопатки. Все расчеты выполняются с помощью современных численных методов, с успехом используемых в инженерном анализе. Пример расчетов рабочей лопатки показывает, что они дают богатую информацию для проверки прочности и оптимизации формы лопатки.

К недостаткам этой главы можно отнести то, что в ней излишнее внимание уделено описанию известных положений, соотношений и принятых в практике приемов вычислений, что неоправданно затрудняет выделение главных задач, решаемых в диссертации.

В главе 3 проводится сравнительный анализ двух основных подходов к профилированию рабочих лопаток, имеющих бандажные полки: с узкохордным и широкохордным пером. Делается обоснованный вывод о необходимости охлаждения полок при современных значениях температуры газа. Выполнен полезный для практики обзор и анализ различных вариантов охлаждения бандажных полок, включая вариант фирмы «Роллс-Ройс».

Снижение утечек газа через радиальный зазор - одна из главных целей установки бандажной полки с лабиринтом. Однако рекомендованное в главе 4 сопротивление утечкам газа на выходе из лабиринта, организованное путем введения выступа со стороны корпуса (в так называемом «закрытом» зазоре), вряд ли целесообразно в силу слабого влияния на утечку и ухудшения условий входа потока в последующий сопловой венец.

Отмечая неизбежное повышение напряжений в сечениях пера лопатки при введении бандажной полки, автор анализирует применение различных конфигураций полки (с гладким торцевым контактом или с зацепом), которые позволяют снизить уровень напряжений до приемлемых величин, отвечающих требованиям обеспечения запасов длительной прочности (гл. 5). Для определения значений предела длительной прочности автор использует надежную зависимость Ларсена-Миллера.

При расчете самой бандажной полки на прочность автор рассматривает полку как консольную балку с заделкой в периферийной части пера под нагрузкой от собственных центробежных сил. При выборе оптимального варианта конфигурации полки анализируются различные положения зацепов и различные толщины их контактной части.

Далее в главе рассматривается весьма актуальная проблема охлаждения бандажной полки. При этом представляют интерес результаты и рекомендации автора, касающиеся как внутреннего конвективного, так и наружного пленочного охлаждения полки. Однако вызывает сомнение целесообразность применения перфорации в галтели на переходе от пера к полке, так как это неизбежно увеличивает концентрацию напряжений в критическом сечении.

Научная новизна исследования как раз заключается в разработке конфигурации бандажной полки и схемы ее охлаждения для рабочей лопатки высокотемпературной турбины с целью обеспечения прочности лопатки и повышения КПД. А **практическая ценность** полученных в диссертации результатов состоит не только в примере проектирования охлаждаемой лопатки с бандажом, но и в том, что они ясно показывают, какую сложность конструктору доставляет постановка такого бандажа. Однако в случае успеха бандаж - это весьма прогрессивное техническое решение, отвечающее совершенствованию турбины. И для правильного выбора варианта лопатки должен быть принят во внимание интегральный критерий его оценки, включающий в себя не только экономию топлива (влияние КПД и расхода охладителя), но и затраты на проектирование, изготовление и доводку.

В заключительной главе 6 рассматривается средство снижения концевых потерь у внутренней поверхности бандажной полки. Идея использования для этого поперечных ребер в пограничном слое против вторичных течений заманчива. Выполнено немало экспериментов на моделях, есть патенты (см., например, монографию А.М. Топунова и Б.А. Тихомирова об управлении потоком в турбинах, 1979 г.). Установлено, что при надлежащем выборе конструкции такие перегородки могут обеспечить эффективное воздействие на вторичные течения и снизить потери энергии. Но реальных конструкций, тем более в газовых турбинах, нет. Дело в том, что геометрические параметры этих устройств практически не поддаются расчету. Реальная структура вторичных течений не известна. Она усложняется, например, конусностью периферийной концевой стенки и поступлением охлаждающего воздуха. Поэтому требуется тщательная отработка в каждом конкретном случае в условиях, максимально приближенных к натурным. Несогласование же форм профиля ребра и линий

основного потока приводит к существенному возрастанию потерь в месте установки ребра. К тому же, при изменении режима работы турбины (углов атаки и скорости потока) применение перегородок может вести к увеличению потерь.

Диссертант выполнил ряд необходимых расчетов и даже провел модельные испытания выбранного ребра (правда, без подбора его оптимальной формы и размеров и без охлаждения). Впрочем, полученный в экспериментах положительный, по мнению автора, результат никак не был оценен им количественно, например, выигрышем КПД ступени.

По-видимому, рекомендуемую автором локализацию вторичных течений установкой ребра следует рассматривать только как принципиальную возможность, полезность которой находится под вопросом. А охлаждение ребра добавляет сомнений в общем положительном эффекте, который не прояснен в диссертации.

По работе можно сделать еще ряд замечаний:

1. Один из главных положительных результатов от использования полки заключается в возможности уменьшить радиальный зазор и уплотнить его лабиринтом. Вместе с тем, требуется дополнительный расход охлаждающего воздуха и могут ухудшиться аэродинамические характеристики профилей. Автор не приводит результатов комплексного анализа всех этих процессов, который должен подвести баланс между влияниями изменений КПД и расхода охладителя и показать суммарный эффект в экономичности ГТД.

2. Предлагая систему комбинированного охлаждения полки, автор не приводит ее внутреннюю схему и устройство. Это затрудняет понимание и оценку данного предложения.

3. Установка бандажной полки создает проблемы не только для пера лопатки, но и для его замкового соединения с диском. Возможна потеря устойчивости наиболее горячего гребешка лабиринта в его утоненной периферийной части при изгибе свисающих краев полки. Эти проблемы не затронуты в диссертации.

4. Методика проектирования бандажной полки (исходные данные, порядок действий, выбор размеров, критерии оптимизации и т. д.) описана не полностью.

5. Нельзя не отметить, что в тексте встречаются грамматические и стилистические ошибки.

Эти замечания, имеющие, в частности, характер пожеланий для дальнейшей научной работы автора, не сказываются на общем

положительном выводе о важном исследовании, представленном в диссертации.

Основные результаты диссертационного исследования содержатся в опубликованных статьях автора и доложены им на научно-технических конференциях.

Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации.

В заключение следует отметить, что рассмотренная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, содержащей решение актуальной и сложной задачи по проектированию бандажированных рабочих лопаток в высокотемпературной турбине. В работе предложены конструктивные мероприятия по обеспечению надежности и повышению газодинамической эффективности турбины с такими лопатками.

Работа отвечает требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного 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 ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.05. - «Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов».

Официальный оппонент
доктор технических наук,
Опытно-конструкторское бюро имени А. Люльки –
филиал ПАО «ОДК-УМПО»,

главный специалист
«19» февраля 2019 г.

Б.И. Мамаев

*Подпись главного специалиста ОКБ д.т.н Мамаева Бориса Ивановича
заверяю*



Начальник отдела кадров ОКБ им. А. Люльки, филиал ПАО «ОДК-УМПО»
(129301, Москва, Касакина ул., д. 13) **Т.Г. Самсонова**