

Яковлева Светлана Юрьевна

**ПОВЫШЕНИЕ КПД СТУПЕНИ ГАЗОВОЙ ТУРБИНЫ
ПРИ ВОЗДУШНОМ НАДДУВЕ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА
РАБОЧЕГО КОЛЕСА**

05.07.05 – Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент Вятков Владимир Вячеславович.

Официальные оппоненты:

Трушин Владимир Алексеевич, доктор технических наук, профессор, Уфимский государственный авиационный технический университет, профессор кафедры авиационной теплотехники и теплоэнергетики факультета авиационных двигателей, энергетики и транспорта;

Нестеренко Валерий Григорьевич, кандидат технических наук, доцент, Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), доцент кафедры «Конструкция и проектирование двигателей» факультета «Двигатели летательных аппаратов».

Ведущая организация: Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самарский университет).

Защита состоится 21.09.2016 г. в 13-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева» по адресу: 152934, г. Рыбинск, Ярославская область, ул. Пушкина, 53, ауд. Г – 237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», www.rsatu.ru.

Автореферат разослан 20.07.2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Надеждин Игорь Валентинович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Одной из важных задач современного российского двигателестроения является создание конкурентоспособных двухконтурных турбореактивных двигателей (ТРДД) для дозвуковых самолетов различного назначения. Эту задачу необходимо решать путем создания семейства двигателей на базе унифицированного газогенератора. Газогенератор является наиболее сложной и наукоемкой частью ТРДД. Важным элементом газогенератора является турбина высокого давления (ТВД), а параметры ТВД во многом определяют конкурентоспособность двигателя. Для базового газогенератора турбина высокого давления может выполняться как одноступенчатой, так и двухступенчатой. От поколения к поколению параметры рабочего процесса ТРДД растут, что сопровождается усложнением задачи получения высокой газодинамической эффективности ступени ТВД и соответственно высокого значения коэффициента полезного действия (КПД) по следующим причинам:

- уменьшилась высота проточной части ТВД, что привело к усилению негативного влияния вторичных течений. Лопаточные венцы ТВД стали работать в условиях, когда вторичные вихри, которые возникают у втулки и периферии, смыкаются в межлопаточном канале, увеличивая потери энергии;

- усложнилась система охлаждения лопаток и корпусных деталей, образующих проточную часть ТВД;

- усилилось влияние радиального зазора на КПД ступени.

Эти причины привели к тому, что КПД современных высокотемпературных, высокоперепадных охлаждаемых турбинных ступеней стал ниже, чем у ступеней турбин ТРДД 3-го поколения. Наибольший вклад в падение КПД вносит радиальный зазор, что объясняется следующими причинами. Во-первых, уменьшение высоты проточной части привело к росту относительной величины зазора, несмотря на широкое использование различных методов управления зазором, без которых невозможно представить конструктивный облик современного двигателя. Во-вторых, на рабочей лопатке современной ТВД по условиям ее работы невозможно применить бандажную полку. Все это приводит к тому, что снижение КПД ступени ТВД из-за утечки через радиальный зазор составляет до 2,2 %.

Для уменьшения этого негативного воздействия необходимо помимо совершенствования систем управления радиальным зазором разрабатывать способы уменьшения потерь энергии в радиальном зазоре за счет управления течением в этой области.

Радиальный зазор меняется по режимам работы двигателя и по ресурсу.

Более 85 % ухудшения топливной экономичности двигателя по ресурсу является следствием роста радиальных зазоров и лишь 15 % следствием износа профилей лопаток. Поэтому снижение утечек через радиальный зазор в лопаточных машинах является актуальной задачей.

Работа выполнена в рамках государственного задания на проведение поисковых научных исследований № 114120870095 «Теоретическое и экспериментальное моделирование газодинамических процессов авиационных ГТД, оптимизация аэродинамических поверхностей проточной части турбин, повышение эффективности двигателей».

Цель работы: повышение термодинамического КПД ступени турбины высокого давления с рабочей лопаткой без бандажной полки за счет струйного наддува радиального зазора со стороны корпуса.

Задачи работы:

- 1) Выполнить анализ возможности повышения КПД современных и перспективных турбин высокого давления ТРДД.
- 2) Разработать способ повышения КПД турбинной ступени с рабочей лопаткой без бандажной полки за счёт струйного наддува радиального зазора.
- 3) Сформулировать требования к ступени ТВД для возможности реализации струйного наддува радиального зазора, приводящего к повышению КПД.
- 4) Разработать методику численного моделирования течения в турбинной ступени при наличии наддува радиального зазора.

Научная новизна

- 1) Разработан способ повышения КПД путем уменьшения потерь в области радиального зазора рабочего колеса за счет выдува со стороны корпуса в радиальный зазор воздуха, отбираемого из проточной части компрессора.
- 2) Выявлены закономерности взаимодействия вихря утечек через зазор и парного вихря в межлопаточном канале аэродинамически коротких и аэродинамически длинных лопаточных венцов в условиях их взаимодействия с воздухом, выдуваемым со стороны корпуса.
- 3) Получены результаты численного моделирования течения в турбинных ступенях, которые позволили сформулировать практические рекомендации по применению разработанного способа.

На защиту выносятся:

- 1) Способ повышения КПД ступени турбины высокого давления за счёт струйного наддува радиального зазора.
- 2) Результаты моделирования течения в турбинных ступенях с различ-

ной высотой проточной части в условиях наддува радиального зазора.

3) Практические рекомендации для возможности назначения параметров наддува радиального зазора на этапе предварительного проектирования.

4) Методика численного моделирования рабочего процесса в турбинной ступени с учетом наддува радиального зазора.

Практическая полезность и реализация результатов

Результаты работы формируют условия оценки возможности применения струйного наддува радиального зазора на начальном этапе проектирования турбины, что приведет к приросту ее КПД на величину до 1,45 % при сокращении сроков и стоимости доводочных работ. Разработанная методика численного моделирования позволяет избежать ошибок при проектных расчетах турбинной ступени с наддуваемым радиальным зазором. Результаты работы внедрены в виде методик численного моделирования рабочего процесса в ступенях турбин с учетом эффектов в радиальном зазоре и в качестве практических рекомендаций о возможности применения разработанного способа наддува зазора на ПАО «НПО «Сатурн».

Достоверность и обоснованность результатов обеспечивается корректностью используемых теоретических построений, допущений и ограничений, применением апробированных численных методов поиска решения, а также качественным и количественным согласованием теоретических результатов с экспериментальными данными, полученными другими исследователями.

Апробация работы

Результаты работы были представлены в докладах на следующих конференциях: Международной НТК «Климовские чтения - 2013. Перспективные направления развития авиадвигателестроения» (заочная), г. Санкт-Петербург, 2013 г.; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства» (заочная), г. Санкт-Петербург, 2014 г.; Научно-практической конференции к 100-летию со дня рождения ГК П.А. Колесова в рамках МТФ «Инновации. Технологии. Производство», г. Рыбинск, 2015 г.; XLII Международной молодежной научной конференции «Гагаринские чтения», приуроченной к 55-летию полёта Ю. А. Гагарина в космос, г. Москва, 2016 г.

Публикации

По теме диссертации опубликовано 9 работ, из них 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК, 1 статья в другом издании, 2 статьи в сборниках докладов, 2 статьи в сборниках тезисов докладов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 88 наименований. Полный объем диссертации составляет 138 страниц, которые содержат 69 рисунков и 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении изложены основные положения диссертационной работы, сформированы основные цели и задачи.

В первой главе проанализированы тенденции формирования облика проточной части турбин современных и перспективных ТРДД. Рассмотрены преимущества и недостатки применения одноступенчатой высокоперепадной ТВД. Анализируются основные проблемы аэродинамики проточной части перспективной охлаждаемой турбины. Рассматривается структура течения в межлопаточных каналах и влияние вторичных течений на аэродинамические характеристики лопаточного венца. Анализ литературных источников выполнен на основе работ Абианца В. Х., Речкоблита А. Я., Копелева С. З., Венедиктова В. Д., Богомолова Е. Н., Локая В. И., Ремизова А. Е., Thomas Behr, Anestis I. Kalfas, Reza S. Abhari и др.

Структура вторичных течений в рабочем колесе с радиальным зазором показана на рисунке 1. Следует отметить различную природу вторичных течений на втулке и периферии. На втулке формируется интенсивный каналный вихрь, который активно взаимодействует с парным вихрем. На периферии лопатки формируется парный вихрь и вихрь утечек. Все эти вторичные течения являются источником потерь энергии. Борьбой с утечками в радиальном зазоре занимались достаточно много, но большинство работ касаются бандажированных лопаток, которые невозможно применить в современной ТВД из-за высокого уровня температуры и окружной скорости.

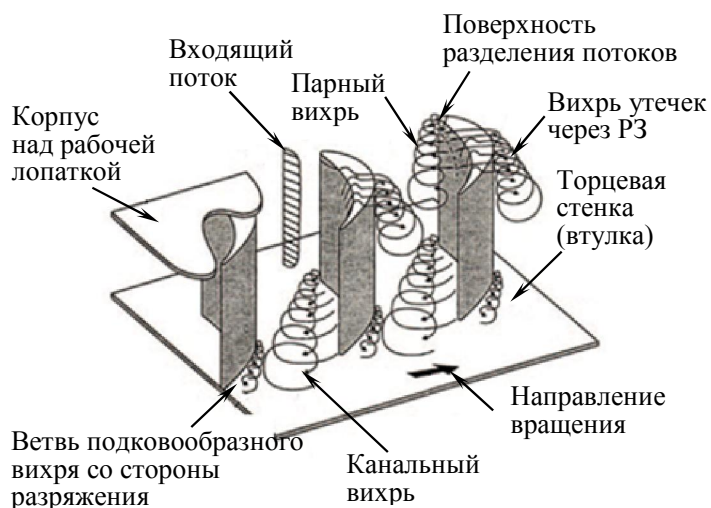


Рисунок 1 – Структура вторичных течений в решетке рабочего колеса с радиальным зазором (по Sjolander S. A.)

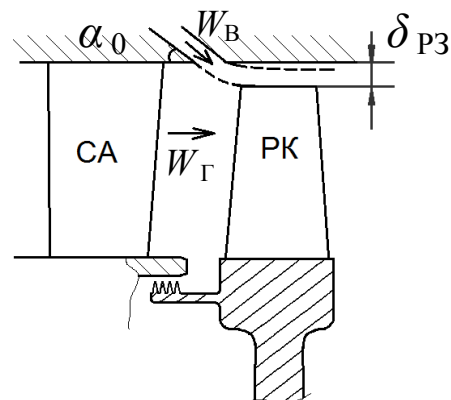


Рисунок 2 – Схема выдува воздуха в радиальный зазор над рабочим колесом турбины

Рассматриваются известные системы управления радиальным зазором. Показано, что одних систем управления зазором недостаточно, и необходимо искать способы управления течением внутри зазора.

Во второй главе приводится описание способа струйного наддува радиального зазора. Он заключается в выдуве в радиальный зазор воздуха со стороны корпуса (рисунок 2). Для одноступенчатой ТВД возможно применение воздуха из промежуточных ступеней компрессора. Чем выше степень понижения давления в турбинной ступени и ниже степень ее реактивности, тем возможен более ранний отбор воздуха из компрессора для осуществления наддува зазора.

Для предварительной оценки было проведено и описано исследование влияния струйного наддува на КПД ступени.

Параметры взаимодействия вдуваемого воздуха с потоком в радиальном зазоре определялись на основе решения задачи о проникновении струи в основной поток, решенную Е. Н. Богомолковым. Определялась максимальная глубина проникновения y_m струи диаметром d , вдуваемой в сносящий поток под углом α_0 относительно вектора скорости потока W_{Γ} .

Доказано, что для высоконагруженной ТВД (параметр нагруженности 0,75...0,85) при условии $y_m/d = 0,5$ выдуваемый воздух образует слой толщиной d . Для типичной турбинной ступени при $d \approx (0,5..0,6)$ мм будет происходить замещение газа в радиальном зазоре выдуваемым воздухом. На начальном этапе проектирования турбинной ступени шаг перфораций можно определить по соотношению

$$\frac{t}{d} = \frac{\pi/4}{0,5 + y_m/d} \quad (1)$$

По данным Центрального котлостроительного института уменьшение коэффициента полезного действия ступени при отсутствии бандажной полки $\Delta \bar{\eta}^*$ соответствует изменению перетечки газа через радиальный зазор $\bar{G}_{\Gamma, \text{РЗ}}$. В проведенных расчетах учитывалось, что вдуваемый воздух не полностью попадает в радиальный зазор. Замещение горячего газа холодным воздухом зависит от типа наддува (щелевого или через поясок отверстий) и от соотношения между глубиной проникновения струи и величиной радиального зазора.

На рисунке 3 показано влияние струйного наддува на термодинамический КПД турбины. При расчете учитывалось место отбора воздуха. Эффективность применения струйного наддува радиального зазора будет возрастать с увеличением степени понижения давления в турбине и с уменьшением степени реактивности ступени. Показано, что наддув радиального зазора будет эффективным практически для любой ступени в каскаде многоступенчатых турбин, но способ

является актуальным только для безбандажной ступени.

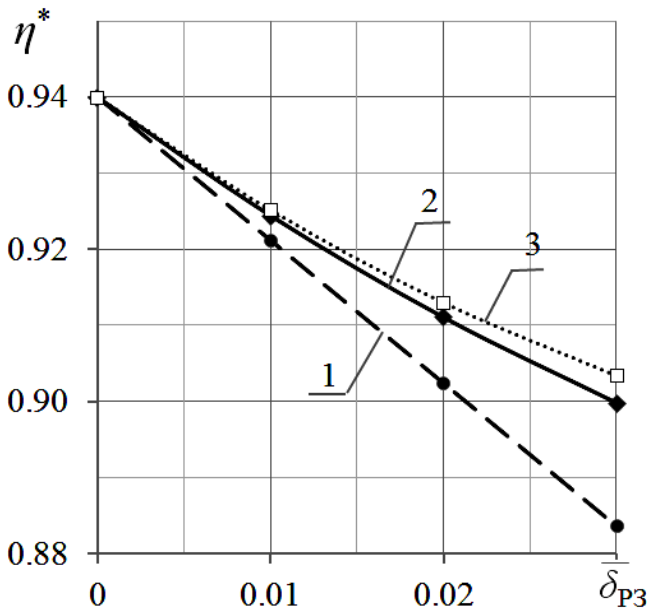


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента полезного действия от относительной величины радиального зазора и относительного расхода воздуха на наддув РЗ (1 – при отсутствии наддува $\bar{G}_B = 0$; 2 – при отборе воздуха за компрессором $\bar{G}_B = 0,02$; 3 – при отборе воздуха из промежуточных ступеней компрессора $\bar{G}_B = 0,02$)

В третьей главе рассматривается моделирование течения в турбинной ступени с учетом радиального зазора. Соответствующие публикации в открытой печати существуют, но в них отсутствуют рекомендации по численному моделированию.

Методика моделирования течения в ступени турбины с выдувом воздуха в радиальный зазор была разработана в связи с имеющимися проблемами по созданию структурированной сетки при моделировании выдувов, особенно при организации струйного наддува в область над рабочей лопаткой, с проблемами при обработке данных при моделировании подвода дополнительной массы и энергии в ступень. Исходными данными для исследования являются

спрофилированная ступень (СА+РК), величина радиального зазора, геометрия проточной части и термогазодинамические параметры. Все действия, предложенные в данной методике можно разделить на три основных этапа: 1) исследование спрофилированной ступени на гексагональной сетке в рабочем диапазоне радиального зазора; 2) выбор оптимальной тетрагональной сетки с призматическим слоем в пристеночной области, получение зависимости КПД от величины радиального зазора на том же уровне; 3) исследование ступени с наддувом. Результаты первого и второго этапов методики следует подтверждать сравнением с экспериментом. Выходными данными всего процесса исследования ступеней турбины с наддувом радиального зазора являются термогазодинамические параметры ступени, КПД ступени, расход охлаждающего воздуха, визуализация течения в расчетной области.

Инструментом являлся программный комплекс численной газовой динамики ANSYS CFX-14.5. При моделировании течения в элементах охлаждаемых турбин целесообразно использовать модель SST, т. к. она предназначена для решения широкого круга задач аэродинамики и теплообмена, течения потока при

положительном градиенте давления, отрыве пограничного слоя от поверхности.

Таблица 1 – Параметры исследуемых ступеней ТВД

Параметр	Модель № 1	Модель № 2
$H_{л}$, м	0,028	0,052
π^*	3,018	3,791
$G_{г}$, кг/с	5,30	52,85
β_1 , град	38,67	49,49
β_2 , град	29,45	35,60
$\delta_{рз}$, мм	0,45	0,8
$U/C_{ад}$	0,5343	0,553
ρ	0,216	0,315

$H_{л}$ – длина пера рабочей лопатки, π^* – степень понижения давления в ступени, $G_{г}$ – расход газа через ступень, β_1, β_2 – углы входа и выхода потока из рабочего колеса, $\delta_{рз}$ – величина радиального зазора, $U/C_{ад}$ – параметр нагруженности ступени, ρ – степень реактивности.

В качестве объекта исследования были выбраны две ступени турбины с параметрами, которые представлены в таблице 1.

Модель № 1 по своим свойствам относится к так называемым аэродинамически коротким решеткам, в которых уже практически весь межлопаточный канал занят вторичными течениями, и они во многом определяют структуру потока. Модель № 2 соответствует ТВД для газогенератора семейства ТРДД. Вторичные течения в рабочем колесе такой ступени имеют место только в приторцевых областях и их влияние на потери в лопаточном венце значительно меньше.

На рисунке 5 представлены результаты расчета потерь по высоте для обеих ступеней. Видно различие в эпюрах потерь для аэродинамически длинной и аэродинамически короткой лопаток. В короткой лопатке (модель № 1) имеется два ярко выраженных максимума потерь. Верхний максимум соответствует вихрю утечек через радиальный зазор. Нижний максимум соответствует парному вихрю. В короткой лопатке рабочего колеса видно активное взаимодействие вихря утечек с парным вихрем в канале.

Выявлена достаточно четкая тенденция поднятия канального вихря и сближения максимумов потерь.

В длинной лопатке (модель № 2) можно говорить об одной значительной области больших потерь. Сложно выделить влияние парного вихря и утечек. С ростом радиального зазора преобладающее влияние начинает оказывать

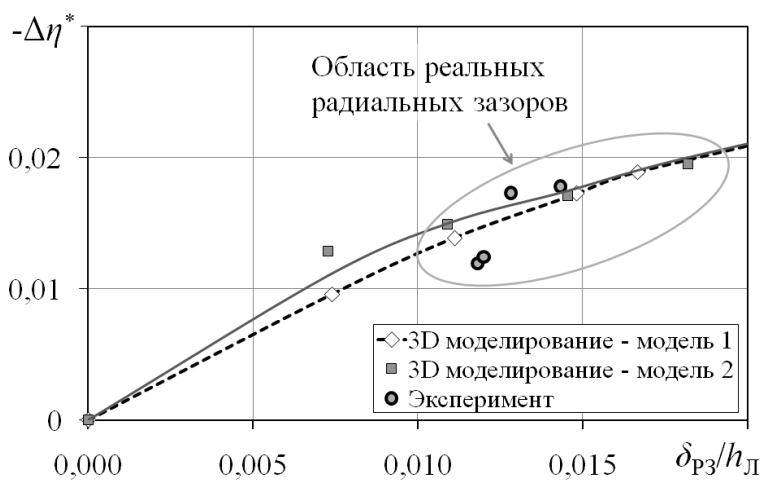


Рисунок 4 – Изменение относительного КПД турбины от относительной величины радиального зазора

вихрь утечек, который и является основным источником потерь.

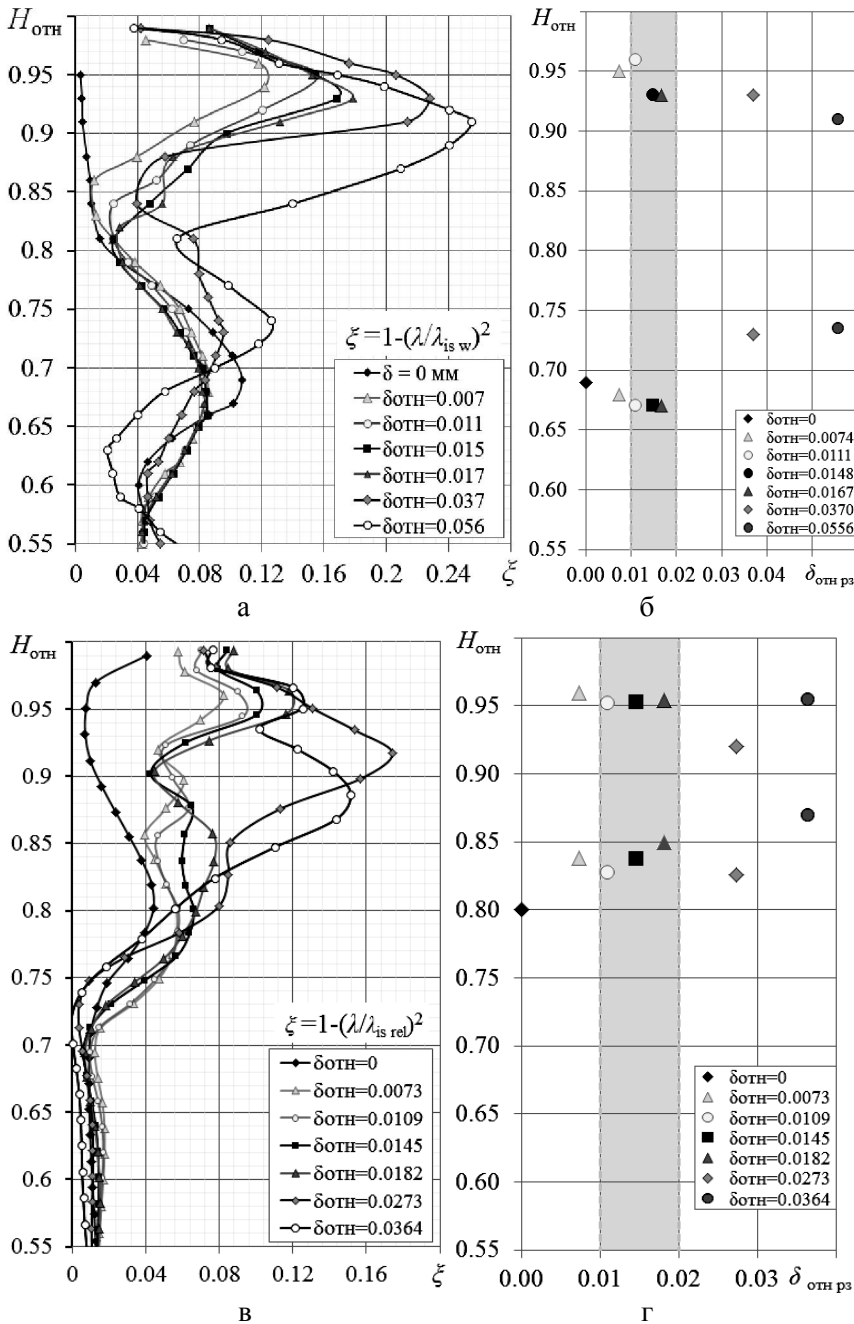


Рисунок 5 – Эпюра потерь кинетической энергии по высоте пера рабочей лопатки ξ (а – модель № 1, в – модель № 2); положение локальных максимумов потерь по высоте рабочего колеса (б – модель № 1, г – модель № 2)

моделирование течений в ступени с наддувом радиального зазора. В качестве ограничения автор принимал максимально возможный расход воздуха, отбираемый на наддув 2 %. Более высокие значения для современного ТРДД следует признать нецелесообразными по соображениям обеспечения требуемой эффективности двигателя. Варьировались геометрические параметры места выдува воздуха (исследовался наддув через щель и через ряд отверстий) и осевая координата места

Физическая картина течения и результаты, полученные при помощи разработанной методики, соответствуют устоявшимся представлениям о структуре течения за рабочим колесом турбинной ступени. Для полной верификации разработанной методики было проведено сравнение расчетов с экспериментом на натурном газогенераторе с работающей системой управления радиальными зазорами, которое приведено на рисунке 4. Данные рисунка 4 позволяют говорить об адекватности полученных результатов и возможности применения численного моделирования для решения подобных задач.

В четвертой главе представлено модели-

наддува над лопаткой. На рисунке 6 показана численная визуализация течения в аэродинамически коротком лопаточном венце (модель № 1).

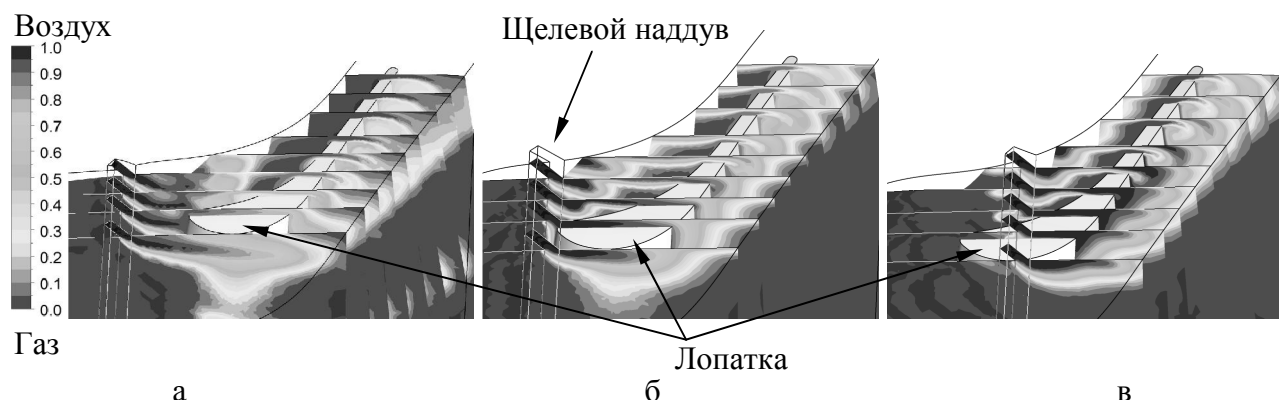


Рисунок 6 – Численная визуализация заполнения радиального зазора воздухом при различном исполнении наддува (модель № 1): а – выдув перед рабочей лопаткой; б – выдув на кромку рабочей лопатки; в – выдув над рабочей лопаткой

При наддуве зазора перед входной кромкой лопатки часть надувочного воздуха сворачивается в вихрь на входной кромке и активно взаимодействует с развитым вторичным течением в канале, что способствует проникновению вдуваемого воздуха глубоко в основной поток, т. е. выдуваемый воздух в данном случае не выполняет свою задачу (заполнение радиального зазора). При выдуве воздуха непосредственно на входную кромку зазор закрывается более плотно, но все равно имеются значительные перетечки воздуха в область основного потока. Объясняется этот факт активным взаимодействием вихря утечек с парным вихрем в межлопаточном канале. Активный парный вихрь захватывает массы вдуваемого воздуха, что проявляется в росте потерь в середине межлопаточного канала. Это видно из рисунка 7, где представлены поля полных давлений за ступенью без наддува зазора (7а) и с наддувом (7б). С точки зрения неравномерности потока наддув зазора оказывает благоприятное влияние (Уменьшение областей пониженного давления от вихря утечек – область А, и от канального вихря – область Б). Но с точки зрения термодинамического КПД ступени (с учетом вдуваемого воздуха) все рассмотренные варианты геометрии выдува привели к его снижению, по сравнению со ступенью с ненадуваемым радиальным зазором (рисунок 8).

Объясняется это двумя причинами. Малые размеры ступени приводят к тому, что для закрытия зазора требуется значительное количество воздуха (более 2 %). Поэтому при определении термодинамического КПД значительно увеличивается знаменатель. Таким образом, в ступенях ТВД с аэродинамически короткими лопатками рабочего колеса наддув радиального зазора может быть по-

лезен только с точки зрения снижения неравномерности потока за ступенью, что благоприятно скажется на аэродинамической эффективности последующих элементов проточной части.

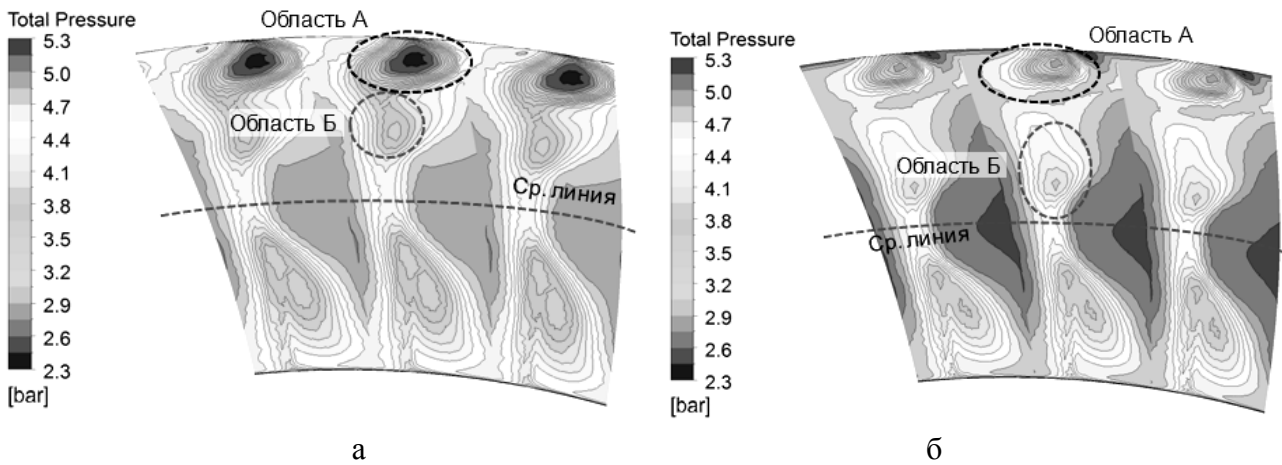


Рисунок 7 – Поля полного давления на выходе из ступени (модель № 1):
а – вариант без наддува; б – вариант с наддувом радиального зазора

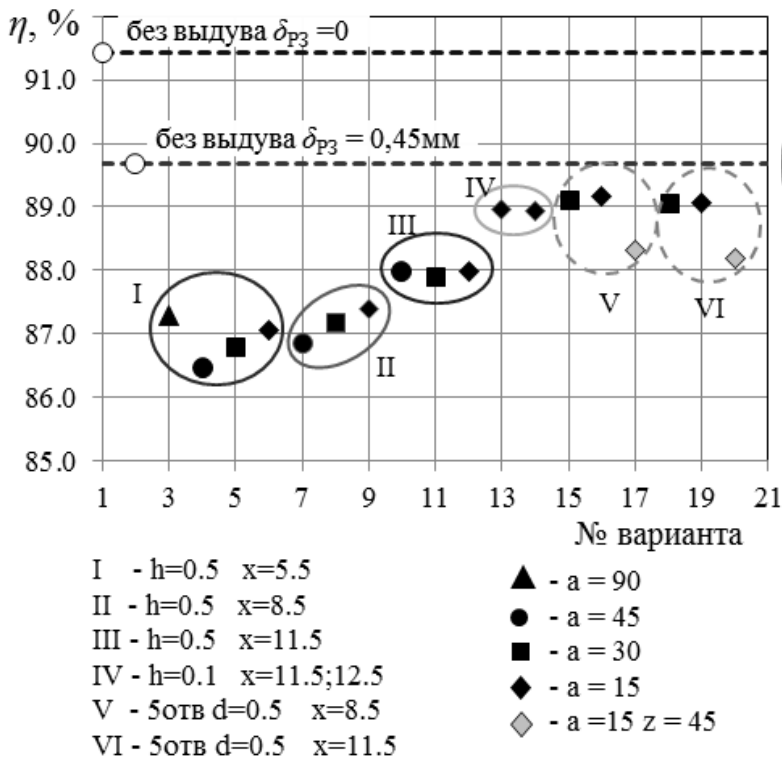


Рисунок 8 – Распределение КПД ступени ТВД
для исследованных вариантов (модель № 1)

говорить только об одном вихре, а именно вихре утечек (область А на рисунке 9 б), который замещается выдуваемым воздухом, тем самым уменьшая потери кинетической энергии в периферийной области в целом. Отсутствие значительных утечек наддувочного воздуха в межлопаточный канал видно и на рисун-

Для модели № 2 исследовался наддув только непосредственно над лопаткой. Увеличение высоты проточной части благоприятно сказалось на снижении требуемого расхода наддувочного воздуха. Он находился на уровне 0,8 – 1,4 % от расхода газа через ступень G_T .

Наддув благоприятно сказался на неравномерности потока за колесом (рисунок 9 б). Но так как в данном случае область воздействия вторичных течений гораздо меньше, то можно

ке 10, где показана численная визуализация течения при различных расходах наддувочного воздуха.

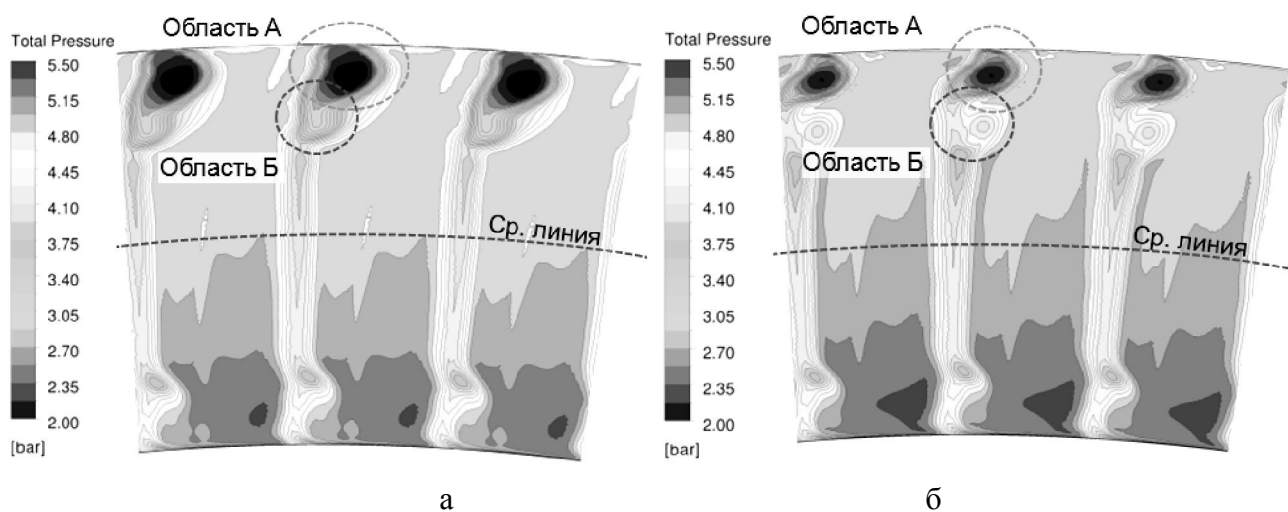


Рисунок 9 – Поля полного давления на выходе из ступени (модель № 2):
а – вариант без наддува; б – вариант с наддувом радиального зазора

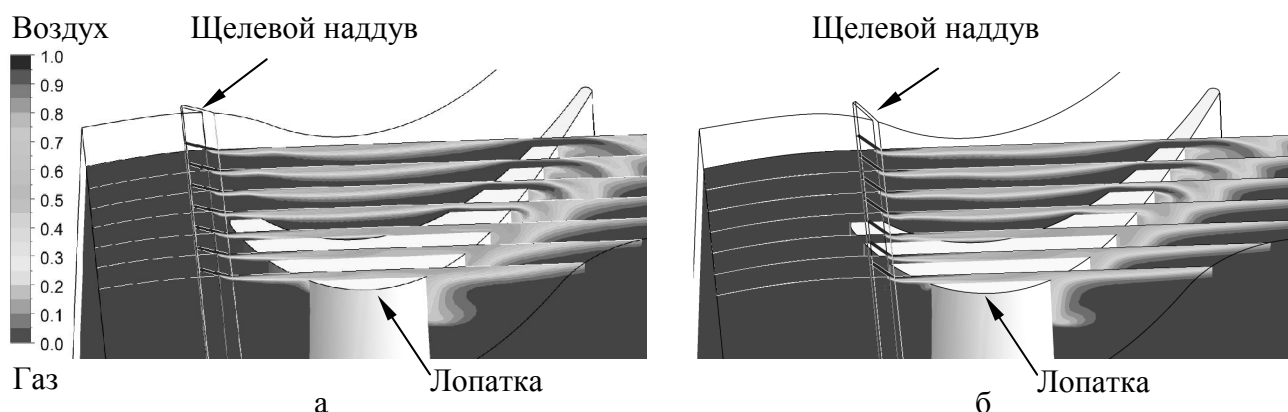


Рисунок 10 – Численная визуализация заполнения радиального зазора воздухом при различном исполнении наддува (модель № 2):
а – выдув на кромку лопатки; б – выдув над лопаткой

Низкий расход наддувочного воздуха и отсутствие активного взаимодействия между составляющими вторичных течений привело к росту термодинамического КПД ступени практически для всех рассмотренных вариантов геометрии места выдува (рисунок 11). Поэтому в ступенях с аэродинамически длинными лопатками применение щелевого наддува радиального зазора оправдано со всех точек зрения.

В качестве практических рекомендаций можно отметить, что наддув радиального зазора целесообразно реализовывать в области от входной кромки до максимальной толщины профиля лопатки.

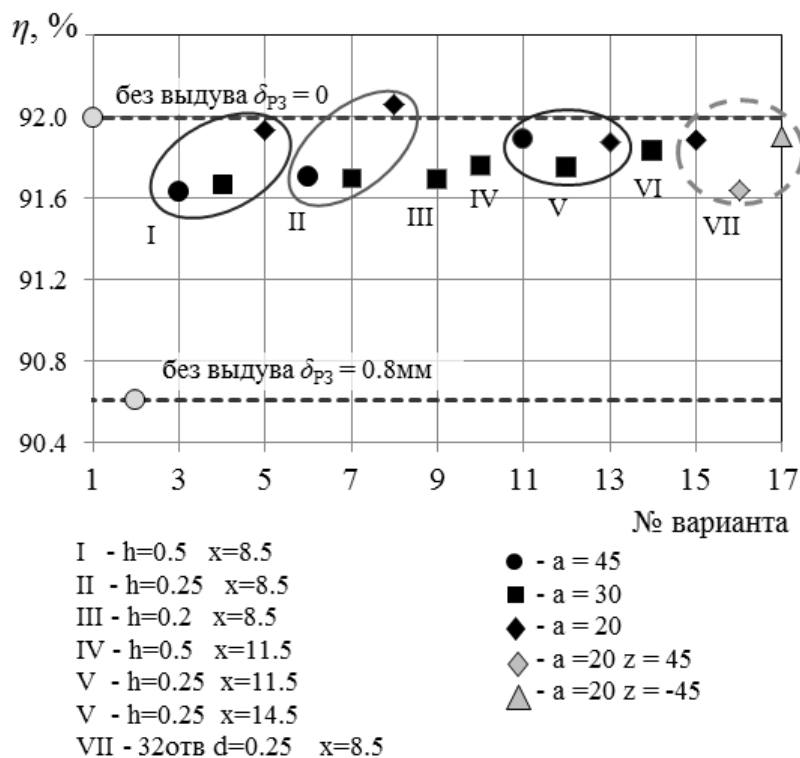


Рисунок 11 – Распределение КПД ступени ТВД для исследованных вариантов (модель № 2)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1) Условия работы современных турбин высокого давления стали причиной увеличения негативного влияния радиального зазора над рабочей лопаткой на КПД ступени. Для ступени ТВД с рабочей лопаткой без бандажной полки необходима разработка способов снижения утечки горячего газа через радиальный зазор.

2) Разработан и теоретически обоснован способ повышения КПД путем воздействия на поток в области радиального зазора ступени газовой турбины без бандажной полки за счет струйного наддува воздухом, отбираемым из компрессора. Расчетным путем доказана термодинамическая эффективность предлагаемого способа.

3) Эффективность наддува радиального зазора будет возрастать с увеличением степени понижения давления в ступени и с уменьшением степени реактивности. Более эффективен щелевой выдув, при реализации которого возникают конструктивные и технологические трудности. Переход от плоской струи к выдуву через систему отверстий не меняет физической картины течений, и также приводит к возрастанию термодинамического КПД. Рост гидравлического сопротивления в системе отбора воздуха при организации выдува через отверстия затрудняет смещение места отбора к входу в компрессор.

4) Для применения предлагаемого способа необходимо иметь ступень, в которой рабочее колесо работает при отсутствии взаимодействия вторичных

Параметры выдува зависят от величины степени понижения давления в ступени, которая определяется по условиям согласования параметров газогенератора и степени реактивности, назначение которой также зависит от распределения работ и параметров системы охлаждения. Поэтому поиск наиболее подходящего варианта необходимо производить индивидуально для каждой ступени с учетом предложенных рекомендаций.

течений в межлопаточном канале. Высота проточной части должна превышать высоту смыкания вторичных вихрей в межлопаточном канале. Реально возможный отбор до 1,5 % воздуха из промежуточных ступеней компрессора на наддув радиального зазора с аэродинамически длинными лопатками может обеспечить прирост термодинамического КПД ступени на 1,45 %.

5) Для практической реализации предлагаемого способа разработана методика численного моделирования течения в безбандажной ступени турбины, которая может быть использована при решении оптимизационных задач при выборе рационального варианта ступени ТВД конкретного двигателя.

СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В изданиях ВАК:

1) **Богомолов, Е. Н.** Снижение располагаемой энергии рабочего тела в газовой турбине за счет передачи тепла и работы охлаждающему воздуху [Текст] / Е. Н. Богомолов, С. Ю. Яковлева // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012. – №1. (22) – С.53 – 58.

2) **Богомолов, Е. Н.** К вопросу взаимовлияния параметров ТРДД для перспективного пассажирского самолета [Текст] / Е. Н. Богомолов, С. Ю. Яковлева // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2012. – №2. (23) – С.102 – 109.

3) **Вятков, В. В.** Численное исследование вторичных течений в области радиального зазора рабочего колеса газовой турбины [Текст] / В. В. Вятков, С. Ю. Яковлева // Вестник РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2014. – №3. (30) – С.9 – 13.

4) **Богомолов, Е. Н.** О газодинамической эффективности струйного наддува радиального зазора одноступенчатой ТВД ТРДД [Текст] /Е. Н. Богомолов, В. В. Вятков, С. Ю. Яковлева // Омский научный вестник. Серия: Приборы, машины и технологии, 2014. – № 3 (133). – С. 55 – 59.

В других изданиях:

5) **Белова, С. Е.** Расчет предельной газодинамической нагрузки одноступенчатой турбины высокого давления двухконтурного двигателя [Текст] / С. Е. Белова, Е. Н. Богомолов, С. Ю. Яковлева, И. А. Немтырева // Вестник ПНИПУ. «Аэрокосмическая техника», 2014. – № 36. – С. 6 – 21.

6) **Яковлева, С. Ю.** Особенности проектирования высоконагруженный одноступенчатых турбин высокого давления двухконтурного двигателя [Текст] / Е. Н. Богомолов, С. Е. Белова, С. Ю. Яковлева, И. А. Немтырева // Сборник докладов международной научно-технической конференции «Климовские чтения -

2013. Перспективные направления развития авиадвигателестроения». СПб.: Изд-во политехн. унив-та, 2013. – С. 64 – 73.

7) **Вятков, В. В.** Численное исследование вторичных течений в области радиального зазора рабочего колеса осевой турбины [Текст] / В. В. Вятков, С. Ю. Яковлева // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, технологии и производства». СПб, 2014. – 1/2014.– С. 90 – 94.

8) **Яковлева, С. Ю.** Верификация численного расчета течения в рабочем колесе газовой турбины с учетом радиального зазора [Текст] / В. В. Вятков, С. Ю. Яковлева // Сборник материалов научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения главного конструктора П.А. Колосова в рамках Международного технического форума «Инновации. Технологии. Производство». – Т.1. - Рыбинск: РГАТУ имени П.А. Соловьева, 2015. – с.186 – 187.

9) **Яковлева, С. Ю.** Исследование струйного наддува радиального зазора рабочего колеса турбины высокого давления без бандажной полки [Текст] / С. Ю. Яковлева // Сборник тезисов докладов XLII Международной молодежной конференции «Гагаринские чтения 2016». М, 2016. – том 3.– С. 659 – 660.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 19.07.2016.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд. л. 1 Тираж 100. Заказ

Рыбинский государственный авиационный технический университет
имени П.А. Соловьева (РГАТУ имени П.А. Соловьева)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П.А. Соловьева
152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53