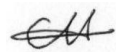


На правах рукописи



ИВАНОВ СЕРГЕЙ НИКОЛАЕВИЧ

**ТЕПЛООТДАЧА ПРИ СТРУЙНО-ДЕФЛЕКТОРНОМ
ОХЛАЖДЕНИИ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК
С ПОЛУСФЕРИЧЕСКИМИ ВЫСТУПАМИ И ВЫЕМКАМИ**

01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника

05.07.05 - Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки
летательных аппаратов

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань - 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования "Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н.Туполева - КАИ" на кафедре теплотехники и энергетического машиностроения.

Научные руководители: доктор технических наук, профессор
Щукин Андрей Викторович

кандидат технических наук
Ильинков Андрей Владиславович

Официальные оппоненты: **Лаптев Анатолий Григорьевич,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО "Казанский энергетический
университет, заведующий кафедрой
"Технология воды и топлива"

Горелов Юрий Генрихович,
кандидат технических наук,
ФГУП "НПЦ газотурбостроения "Салют"
(г. Москва), КБПР, начальник бюро

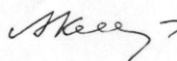
Ведущая организация: Исследовательский центр проблем
энергетики Казанского научного центра
РАН

Защита состоится "____" _____ 2014 г. в ____ часов на
заседании диссертационного совета Д 212.079.02 при ФГБОУ ВПО
"Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н.Туполева-КАИ" по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д.10.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО
"Казанский национальный исследовательский технический университет им.
А.Н.Туполева-КАИ" и на сайтах www.kai.ru, vak.ed.gov.ru.

Автореферат разослан "____" _____ 2014г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент

 А. Г. Каримова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Улучшение удельных параметров газовых турбин напрямую связано с повышением температуры ее термодинамического цикла. В связи с этим разработка эффективных систем охлаждения турбинных лопаток является одной из определяющих и неотъемлемых задач при разработке перспективных высокотемпературных ГТД и ГТУ. Повышение эффективности системы охлаждения позволяет уменьшить расход воздуха путем более рационального его использования и снизить тем самым наиболее ощутимые потери энергии от охлаждения, связанные с затратами работы сжатия воздуха в компрессоре.

Наибольшие трудности в обеспечении эффективного охлаждения турбинной лопатки возникают на участке входной кромки, где стесненные условия не позволяют успешно применять некоторые хорошо зарекомендовавшие себя способы интенсификации теплообмена. Так, в силу указанных обстоятельств вихревые матрицы могут обеспечить значение эффективности охлаждения в лобовой точке входной кромки лопатки в полтора раза меньшее, чем в средней части профиля.

Более компактны пристенные интенсификаторы теплообмена, которые наносятся на охлаждаемую поверхность в виде выступов или выемок различной формы. Но даже их 2,5-3-кратное увеличение теплоотдачи не обеспечивает заданного ресурса входной кромки турбинной лопатки и требует использования комбинированных способов интенсификации теплообмена.

Известно, что эффективность охлаждения поверхности может быть повышена использованием импактных воздушных струй, увеличивающих при оптимальных условиях теплоотдачу на охлаждаемой поверхности в 3-5 раз по сравнению с тангенциальным ее обтеканием. Однако требования по экономии охлаждающего воздуха и трудности, возникающие при компоновке системы охлаждения в стесненных условиях внутренних полостей турбинных лопаток, не всегда позволяют реализовать эти оптимальные условия. В этих случаях как раз и возможно дополнительное улучшение эффективности струйного охлаждения размещением на охлаждаемой струями поверхности сферических выступов или выемок. Речь идет как об участке входной кромки турбинной лопатки, так и о заднем участке спинки, где из-за особенностей обтекания горячим газом профиля лопатки внешняя теплоотдача скачкообразно увеличивается в несколько раз.

В настоящее время для интенсификации теплообмена на входной кромке и задней части спинки профиля применяют хорошо отработанный технологически струйно-дефлекторный способ охлаждения, в котором дефлектор может быть выполнен литьем, за одно целое с профилем лопатки. Его эффективность, по данным Г.П. Нагоги, на участке входной кромки при относительном расходе воздуха на венец лопаток $G_{\text{отн}} = 3,5\%$ для рабочей лопатки составляет $\Theta = 0,43$, а для сопловой – $\Theta = 0,51$. Однако ввиду того,

что входные температуры газа в современных турбинах превышают 1600 К, одного струйного охлаждения может оказаться недостаточно. Поэтому приходится принимать меры по тепловой защите стенки лопатки: проектировать систему пленочного охлаждения, более ушербную, чем внутреннее конвективное охлаждение, или наносить термобарьерное покрытие. В связи с этим тема настоящей диссертационной работы, посвященная исследованию комбинированной интенсификации теплоотдачи при струйно-дефлекторном охлаждении поверхности с полусферическими выступами или выемками, является актуальной.

Цель работы: Сформулировать рекомендации по расчету теплоотдачи в условиях струйно-дефлекторного охлаждения наиболее теплонапряженных участков профиля турбинной лопатки с полусферическими выступами или выемками.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальное исследование влияния на теплоотдачу числа Рейнольдса, высоты охлаждающего канала и плотности расположения выступов на модели входной кромки турбинной лопатки с полусферическими выступами.
2. Выполнить экспериментальное исследование влияния на среднюю теплоотдачу струйного обдува поверхности с полусферическими выемками со сносящим потоком применительно к заднему участку спинки лопатки.
3. Провести визуализационные эксперименты на охлаждаемых поверхностях моделей участков профиля лопатки для обоснования физических моделей исследуемых теплообменных процессов.
4. Получить критериальные уравнения, сформулировать физические модели, и на их основе разработать рекомендации по расчету теплоотдачи на входной кромке с полусферическими выступами и на заднем участке спинки с полусферическими выемками при струйно-дефлекторном их охлаждении.
5. По разработанным рекомендациям выполнить расчеты температурного состояния участка входной кромки, заднего участка спинки турбинной лопатки и сравнить их с другими способами их охлаждения.

Научная новизна:

1. Впервые получены и представлены критериальными уравнениями экспериментальные данные по теплоотдаче при струйном обдуве поверхности с полусферическими выступами.
2. Впервые установлено, что в исследованном диапазоне изменения режимных и геометрических параметров теплоотдача в области лобовой точки модели входной кромки при струйном охлаждении поверхности с полусферическими выступами возрастает в 1,5...2 раза по сравнению с гладкой охлаждаемой струями поверхностью.
3. Впервые обнаружено, что в лобовой точке модели входной кромки более предпочтительной, с точки зрения максимальной теплоотдачи,

является относительная плотность расположения выступов $f=0,485$, а на участке последствия - $f=0,85$.

4. Выявлено, что наличие матрицы полусферических выступов на охлаждаемой импактными струями поверхности модели входной кромки лопатки не изменяет оптимального значения относительной высоты канала H/d в области лобовой точки, а более высокая плотность расположения выступов f делает более консервативным значение максимума теплоотдачи к изменению H/d .

5. Установлено, что в условиях многорядного струйного охлаждения поверхности с полусферическими выемками и сносящим потоком теплоотдача с учетом увеличения поверхности теплообмена возрастает в 1,7 раза по сравнению со струйным охлаждением гладкой поверхности при прочих равных условиях.

6. Разработаны рекомендации по расчету теплоотдачи при струйном охлаждении поверхности с полусферическими выступами и выемками для наиболее теплонпряженных участков профиля турбинных лопаток.

Автор защищает:

1. Экспериментальные данные по средней и местной теплоотдаче при струйно-дефлекторном однорядном охлаждении поверхности модели входной кромки с полусферическими выступами при варьировании режимных и геометрических параметров.

2. Экспериментальные данные по средней теплоотдаче в условиях струйно-дефлекторного многорядного охлаждения поверхности с полусферическими выемками и сносящим потоком, характерных для заднего участка спинки турбинной лопатки.

3. Рекомендации по расчету теплоотдачи на обдуваемой струями поверхности с полусферическими выступами и выемками, для условий охлаждения наиболее теплонпряженных участков профиля турбинной лопатки.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют более детально понять механизм взаимодействия импактных воздушных струй с пристенными интенсификаторами теплообмена (выступами и выемками). Разработанные на основе экспериментальных исследований рекомендации для расчета теплоотдачи по основным геометрическим и режимным параметрам соответствуют диапазону их изменения в системах охлаждения натурных ГТД. Они позволяют рассчитать и спроектировать эффективную струйно-дефлекторную систему охлаждения входной кромки и спинки турбинной лопатки с дополнительной интенсификацией теплообмена полусферическими выступами и выемками.

Основные результаты работы вошли в отчет о НИР КНИТУ-КАИ по госзаказу 2012-2013 гг. (№ гос. регистрации 01201259883).

Достоверность и обоснованность полученных экспериментальных данных обеспечивается применением апробированных методов и

аттестованных средств измерения тепловых и гидродинамических параметров, многократным повторением проводимых измерений, расчетом погрешности полученных опытных данных, удовлетворительным согласованием полученных экспериментальных данных с опубликованными в литературе данными других авторов.

Личный вклад автора. Соискатель участвовал в создании экспериментальных стендов, лично выполнил основную программу экспериментов, провел обработку опытных данных. Анализ результатов экспериментов и разработка рекомендаций для расчета и проектирования систем охлаждения турбинных лопаток проведена совместно с научными руководителями.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы доложены и получили одобрение на XX Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения», КНИТУ-КАИ, г. Казань, 22-24 мая 2012 г.; на VIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов имени академика РАН В.Е. Алемасова «Проблемы теплообмена в гидродинамике в энергомашиностроении», КНИТУ-КАИ, г. Казань, 16-18 октября 2012 года; на XXI Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения», КНИТУ-КАИ, г. Казань, 19-21 ноября 2013 г.; на Всероссийской конференции по прикладным наукам, г. Москва, институт механики и экологии НАПН РФ, 3-4 марта 2014 года; на научных семинарах кафедры Теплотехники и энергетического машиностроения, КНИТУ-КАИ, г. Казань, 2011-2014гг.;

Публикации. По теме диссертации опубликовано 7 работ. Две научные статьи опубликованы в рекомендуемых ВАК журналах. Кроме этого, материалы диссертации вошли в монографию А.В. Щукина, А.В. Ильинкова «Пристенная интенсификация теплообмена при сложных граничных условиях», опубликованную издательством КНИТУ-КАИ в 2014 г., 252 с.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, выводов и списка использованных литературных источников. Работа изложена на 127 страницах машинописного текста, содержит 65 рисунков, 5 таблиц. Список использованных литературных источников включает 134 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертации обоснована актуальность темы исследования, отмечены ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе диссертации выполнен краткий обзор результатов исследований по следующим разделам: интенсифицированное охлаждение турбинных лопаток (по материалам А.А. Халатова, Г.П. Нагоги, Р.М. Ligrani и др.); по струйному охлаждению поверхности (монография Дыбана и Мазура, публикации Керчера и Табакова; Ю.Г. Горелова и др.), включая струйное охлаждение поверхности со сферическими выемками (Azad Gm. и

др., Ekkad S. др., Kanokjaruvijit K. и др.); по интенсификации теплообмена выступами и выемками – монографии и статьи В.М. Бузника; Ю.А. Быстрова, С.А. Исаева и др.; Ю.Ф. Гортышова, И.А. Попова, В.В. Олимпиева и др.; Б.В. Дзюбенко, Ю.А. Кузма-Кичта, А.И. Леонтьева и др.; Э.К. Калинина, Г.А. Дрейцера, С.А. Ярхо; В.К. Мигая; В.И. Терехова и др., А.А.Халатова и др.

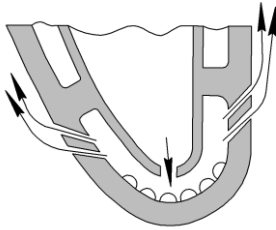
Как следует из анализа литературы, по исследуемой теме имеется три статьи, посвященные интенсификации теплообмена при струйном натекании воздуха на поверхность с выемками. Авторы не получили увеличения теплоотдачи за счет выемок и отмечают, что требуется проведение дополнительных исследований. Что же касается струйного обдува поверхности с полусферическими выступами, то в литературе отсутствуют какие-либо сведения по данному вопросу. Таким образом, анализ литературы показал, что процессы теплообмена и гидродинамики при взаимодействии струй с пристенными интенсификаторами до настоящего времени не изучались. Для исследования этих процессов и разработки рекомендаций по расчету и проектированию систем комбинированного охлаждения лопаток турбин ГТД и ГТУ требуется провести экспериментальное исследование струйного охлаждения поверхности с полусферическими выступами и выемками в широком диапазоне изменения режимных и геометрических параметров.

В конце первой главы диссертации сформулированы задачи исследования.

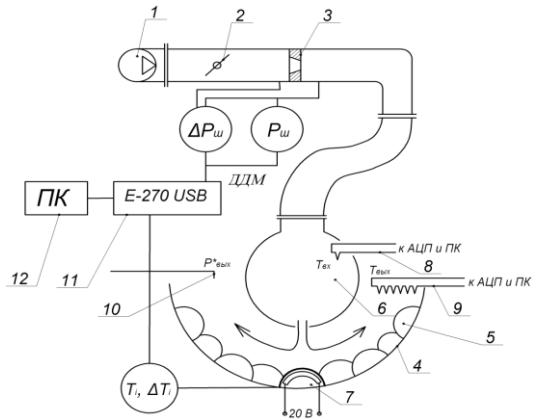
Во второй главе дано описание экспериментальных стендов и объектов исследований, методик проведения экспериментов и обработки опытных данных. Сделана оценка относительных погрешностей получаемых опытных данных.

Экспериментальная установка для исследования теплоотдачи при струйном натекании на поверхность с полусферическими выступами (рисунок 1) представляла собой короб длиной 1000 мм, шириной 400 мм и высотой 450 мм, нижняя стенка которого была криволинейной (радиус кривизны 350 мм) и имитировала внутреннюю поверхность входной кромки охлаждаемой турбинной лопатки. На ее трапезной поверхности располагались полусферические выступы с относительной плотностью расположения $f=0,485$ и $f=0,85$ (рисунок 2, а, б). Сверху на короб устанавливался цилиндрический барабан, имитирующий дефлектор лопатки (рисунок 2, в), с одним рядом душирующих отверстий ($d=35$ мм, $t/d=1,14$).

Для исследования влияния высоты H охлаждающего канала на теплоотдачу использовались барабаны трех различных диаметров, что обеспечило диапазон изменения относительных высот охлаждающего канала (с учетом стеснения выступами) $H/d=1,66...5,31$ для $f=0,485$ и $H/d=1,60...5,09$ для $f=0,85$.



а



б

Рисунок 1 – Исследуемая схема охлаждения входной кромки турбинной лопатки (а) и схема экспериментальной установки для исследования теплоотдачи при струйном натекании на вогнутую поверхность с полусферическими выступами (б): 1 – компрессор, 2 – регулирующая заслонка, 3 – расходомерная шайба, 4 – обдуваемая поверхность, 5 – полусферический выступ, 6 – теплообменная модель, 8 – термопара для замера температуры воздуха на входе в опытный участок, 9 – гребенка термопар для замера температуры воздуха на выходе из опытного участка, 10 – трубка Пито-Прандтля для замера скорости потока на выходе из участка, 11 – АЦП, 12 – компьютер



а



б

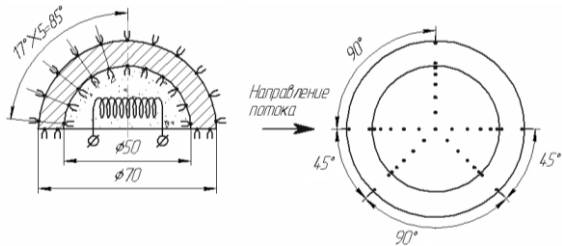


в

Рисунок 2 – Исследованные варианты плотности расположения выступов (а, б) и сменные дефлекторы (в)



а



б

Рисунок 3 – Объект исследования: а, б – внешний вид и схема теплообменной модели выступа с нагревателем

В качестве объекта исследования служила модель выступа (рисунок 3), препарированная термопарами (62 штуки) по меридиональным сечениям, данные с термопар поступали через аналого-цифровой преобразователь в компьютер. На основе комплекса программ ANSYS градиентным методом проводился расчет температурного поля модели выступа, распределения местных коэффициентов теплоотдачи по его поверхности и средней по поверхности выступа теплоотдачи. Для исследования теплоотдачи как в зоне лобового натекания струй, так и на участке последствий теплообменной модели устанавливалась в различных рядах выступов. Средние по ряду коэффициенты теплоотдачи рассчитывались интегрированием распределения местных значений теплоотдачи по поверхности.

Экспериментальные исследования проводились при числах Рейнольдса $Re_H = (3...40) \cdot 10^4$ для участка лобовой точки и $Re_x = (1...60) \cdot 10^3$ для участка последствий, что соответствует натурным условиям. Полученные опытные данные по теплоотдаче на поверхности с полусферическими выступами представлялись в виде критериальных уравнений.

Опытное исследование теплоотдачи при струйном обдуве поверхности с полусферическими выемками проводилось на стенде, схема которого представлена на рисунке 4, а. Опытный участок установки представлял собой цилиндрический ресивер, набранный из текстолитовых колец. Внутри ресивера устанавливалась теплообменная модель, нагрев которой осуществлялся высокочастотной установкой (индуктором) ЛЗ-13 (рисунок 4, б).

Для организации многорядной системы воздушных струй в ресивере устанавливалась пластина диаметром 130 мм с коридорно расположенными отверстиями ($d=3$ мм, $t/d=3$), имитирующая дефлектор, обеспечивающий душирование заднего участка спинки охлаждаемой лопатки (рисунок 4, в). Пластина устанавливалась на расстоянии 6 мм от теплообменной модели, обеспечивая относительную высоту охлаждающего канала $H/d=2$ (без учета наличия выемок). Боковой отвод отработанного воздуха из опытного участка осуществлялся через щель площадью 360 мм².

Теплообменная модель представляла собой диск из легированной стали 1X18H9T толщиной 15 мм и диаметром 130 мм (рисунок 5). Для сравнительного анализа эксперименты проводились как с гладкой моделью, так и с моделью с полусферическими выемками (диаметр выемки 10 мм, относительная плотность расположения выемок $f=0,35$). В продольной плоскости симметрии теплообменной пластины теплообменные модели препарировались термопарами (22 штуки), плоскость прямоугольного контура, образованного спаями термопар, совпадала с направлением сносящего потока воздуха. На модели с выемками термометрировались еще и ближайшие к плоскости симметрии выемки.

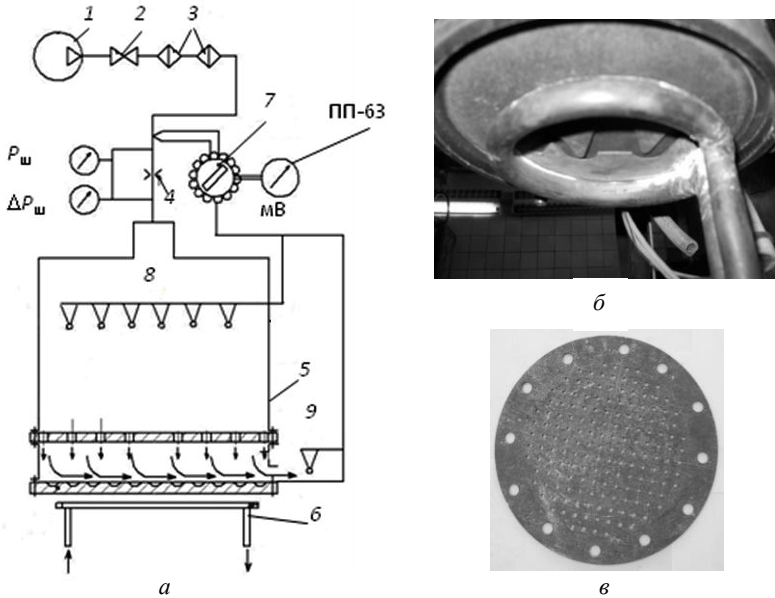


Рисунок 4 - Схема экспериментального стенда (а) для исследования теплоотдачи при струйном охлаждении поверхности с полусферическими выемками, внешний вид индуктора (б) и дефлекторной пластины (в): 1 – компрессор, 2 – регулирующая заслонка, 3 – фильтры, 4 – расходомерная шайба, 5 – опытный участок, 6 – водоохлаждаемый индуктор, 7 – переключатель, 8 – гребенка термпар для замера температуры воздуха на входе в опытный участок, 9 – термопара для замера температуры воздуха на выходе из опытного участка

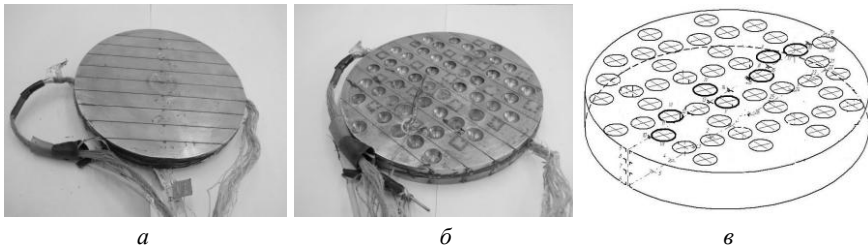


Рисунок 5 - Теплообменная модель: а - гладкая, б - с выемками, в - схема препарирования

Измеренное температурное поле по внешнему контуру теплообменной модели позволяет определить численным методом местные значения плотности теплового потока и коэффициента теплоотдачи на охлаждаемой струями поверхности. Средние значения коэффициента теплоотдачи определялись по местным их значениям как среднеинтегральные по длине охлаждаемой поверхности.

Эксперименты проводились при числах Рейнольдса $Re_d = (1 \dots 6,5) \cdot 10^3$, что находится в диапазоне их натуральных значений. Опытные данные представлялись в виде критериальных уравнений.

Тестовые опыты проводились на плоском опытном участке с односторонним расположением полусферических выступов, используемых далее в программных экспериментах. Числа Рейнольдса, относительные значения плотности расположения выступов и относительная высота канала также соответствовали условиям проведения программных экспериментов. В визуализационных экспериментах использовалась сажа.

В третьей главе представлены результаты тестовых опытов, а также результаты программных экспериментов по исследованию струйного охлаждения поверхности с полусферическими выступами; приведено описание физической модели конвективного теплообмена в исследованных условиях.

Тестовые опыты проводились в два этапа. На первом этапе тестировались термодатчики, установленные на поверхности полусферического выступа, и на пластине с полусферическими выемками, помещенные в термостат. На втором этапе полусферические выступы, установленные в плоском канале с исходно тангенциальным их обтеканием, сопоставлялись по распределению местных коэффициентов теплоотдачи по поверхности выступа с результатами аналогичных экспериментов Hwang S.D., Cho H.H. Эти результаты приведены на рисунке 6.

Моделировался участок входной кромки турбинной лопатки. Рассматривался наиболее широко используемый вариант однорядного расположения отверстий в дефлекторе. Известно, что теплоотдача от горячего газа к профильной части турбинной лопатки в области передней критической точки примерно в 1,6 раза превышает среднюю теплоотдачу на участке радиусного обвода профиля. Эта точка анализировалась автономно от участка последствия охлаждаемой поверхности входной кромки, поскольку происходящие в лобовой области гидродинамические процессы взаимодействия охлаждающего воздуха с поверхностью характеризуются струйной моделью. Кроме того, в числах Рейнольдса для области лобовой точки и для ее окрестностей использовались различные характерные скорости и характерные линейные размеры.

На рисунке 7 представлены результаты исследования теплоотдачи в области лобовой точки («нулевой» ряд выступов) модели входной кромки. Здесь в числе Рейнольдса использована среднерасходная скорость воздуха в отверстиях дефлектора w_d , а характерный линейный размер - высота охлаждающего канала H между дефлектором и охлаждаемой стенкой (с учетом стесняющего воздействия выступов).

Показатель степени при числе Рейнольдса в зависимости $Nu = A Re^m$, когда струи натекают на выступы в лобовой точке, находится в диапазоне $m = 0,5 \dots 0,65$. Эти значения соответствуют опытными данным Е.П. Дыбана, А.И. Мазура по теплоотдаче в области лобовой точки осесимметричной

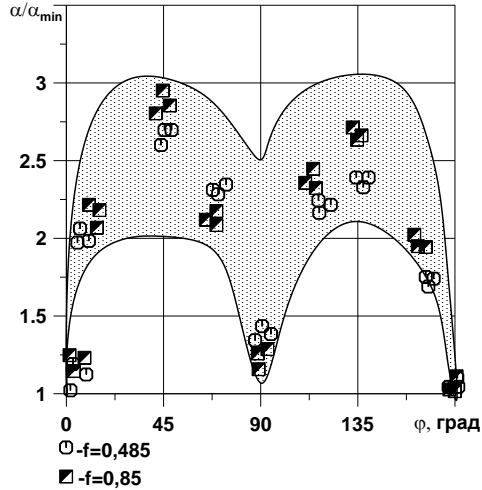


Рисунок 6 - Результаты тестовых экспериментов (заштрихованная область - данные Hwang, Cho), $Re=10^5$

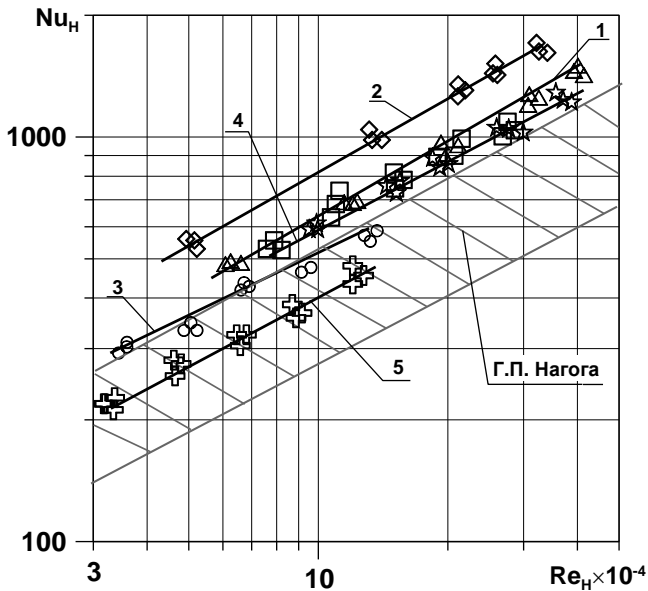


Рисунок 7 – Теплоотдача в области лобовой точки модели входной кромки лопатки (условные обозначения – в таблице 1; критериальные уравнения – в таблице 2)

Таблица 1

	f=0,485			f=0,85		
H/d	1,66	3,91	5,31	1,60	3,71	5,09
0-й ряд	○	◇	△	⊕	□	☆
H/d _{сф}	0,83	1,95	2,66	0,80	1,86	2,55
1-й ряд	⊕	◇	▽	⊕	⊗	☆
2-й ряд	◐	◑	▲	⊕	◑	✱
3-й ряд	◑	◑	▲	-	-	-
4-й ряд	-	-	-	⊗	◑	✱
Осредн.	●	◆	▲	⊕	■	★

Таблица 2

$Nu_H = A Re_H^m$							
f=0,485				f=0,85			
№ линии	H/d	A	m	№ линии	H/d	A	m
1	5,31	0,453	0,63	4	5,09	0,564	0,57
2	3,91	1,01	0,58		3,71		
3	1,66	1,63	0,5	5	1,60	0,933	0,56

импактной струи, натекающей на плоскую поверхность ($m=0,45\dots0,7$). В случае однорядного струйного натекания воздуха в области лобовой точки модели гладкой поверхности входной кромки турбинной лопатки по данным Г.П. Нагоги $m=0,75$.

На рисунке 8 показано влияние относительной высоты канала H/d на теплоотдачу в области лобовой точки. Как видно из графиков, при наличии на охлаждаемой поверхности системы полусферических выступов с плотностью расположения $f=0,485$ тенденция немоного изменения теплоотдачи в зависимости от относительной высоты канала сохраняется такой же, как и при отсутствии выступов. При этом независимо от числа Re_H максимум теплоотдачи располагается в области $H/d = 3\dots4$ и находится в области значений Холлурта и Куупмана, полученных при струйном обдуве гладких пластин. С уменьшением числа Re_H этот максимум, характеризующий оптимальное значение H/d, становится менее выраженным. При $f=0,85$ этот максимум становится более протяженным, наподобие результатов, полученных Фрейдманом (где он охватывает диапазон значений $H/d=4\dots6$), хотя при этом уровень теплоотдачи составляет 80% от варианта расположения выступов с относительной плотностью $f=0,485$.

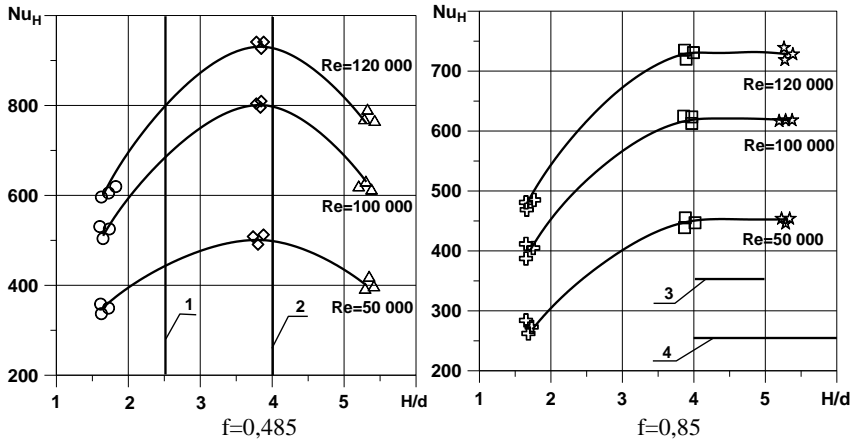


Рисунок 8 – Зависимость теплоотдачи в лобовой точке модели входной кромки в зависимости от относительной высоты канала: 1 – данные Холлуорта, 2 – Куупмана, 3 – Хилла, 4 – Фрейдмана

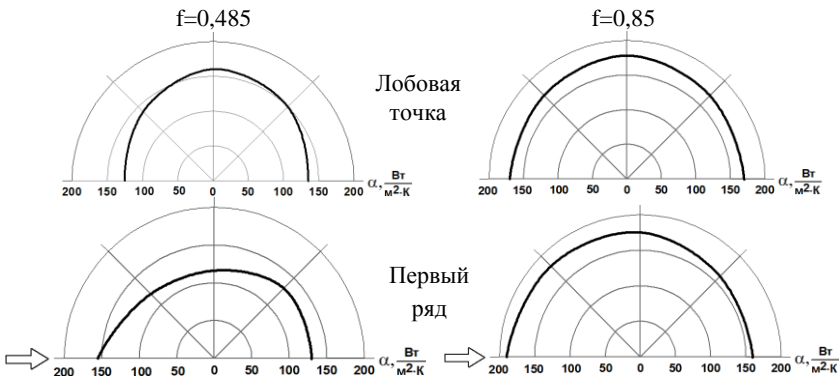


Рисунок 9 – Эпюры распределения по поверхности выступа коэффициентов теплоотдачи, осредненных по меридиональным сечениям

По мере удаления от области лобовой точки уже первый ряд выступов начинает взаимодействовать с потоком воздуха в условиях, приближающихся к тангенциальному их обтеканию, что следует из деформации эпюры распределения местных коэффициентов теплоотдачи по окружности выступа (рисунок 9). На рисунке 10 показано изменение осредненного по поверхности выступов относительного коэффициента теплоотдачи на участке последствия импактных струй. Для сопоставления с данными Р. Гардона, К. Акфирата при выдуве из сплошной щели наши данные были пересчитаны на сплошную эквивалентную щель. Для всех исследованных значений H/d характер изменения относительного коэффициента теплоотдачи α/α_0 по относительной длине охлаждаемой

поверхности x/b качественно близок к аналогичному распределению α/α_0 при выдуве из сплошной щели на гладкую плоскую поверхность. Количественно же есть различие: на поверхности с выступами относительная теплоотдача снижается до более низкого уровня, нежели на гладкой поверхности. Одна из причин – повышенный уровень турбулентности и вихреобразования при взаимодействии соседних струй в наших исследованиях, что увеличивает α_0 .

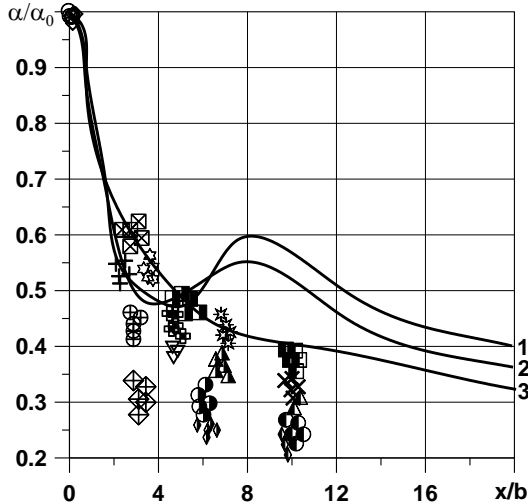


Рисунок 10 - Сопоставление полученных опытных данных по относительной теплоотдаче на участке последействия (значки, усл. обозн. см. в табл.1) с распределением локального относительного коэффициента теплоотдачи для плоской импактной струи (Р.Гардон, К.Акфират): 1 - $N/b=2$, 2 - 5, 3 – 6

Отметим, что влияние шага отверстий в дефлекторе на теплоотдачу не исследовалось. В первом приближении его можно учесть по рекомендациям Г.П.Нагоги.

Из опытных данных, представленных на рисунке 11 следует, что в исследованных условиях на участке последействия теплоотдача на поверхности канала с выступами по мере уменьшения высоты канала увеличивается, что соответствует физическим представлениям о конвективном турбулентном теплопереносе в каналах. Кроме этого, можно видеть, что увеличение относительной высоты канала $H/d_{сф}$ при более плотной компоновке выступов в матрице приводит к более медленному снижению теплоотдачи по мере увеличения x/L . Поэтому с точки зрения дополнительной интенсификации теплообмена выступами на участке последействия предпочтительной является максимальная плотность их расположения ($f=0,85$).

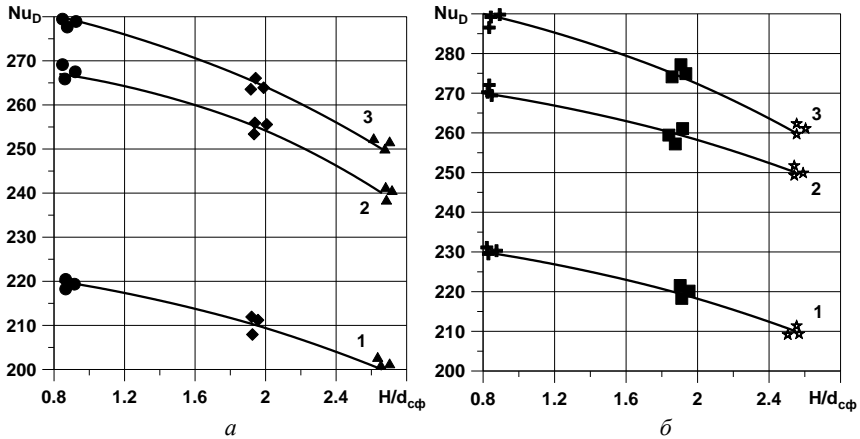


Рисунок 11 - Графики изменения средней теплоотдачи на участке последствия в зависимости от относительной высоты канала: 1 - $Re_D=20000$, 2 - $Re_D=30000$, 3 - $Re_D=40000$

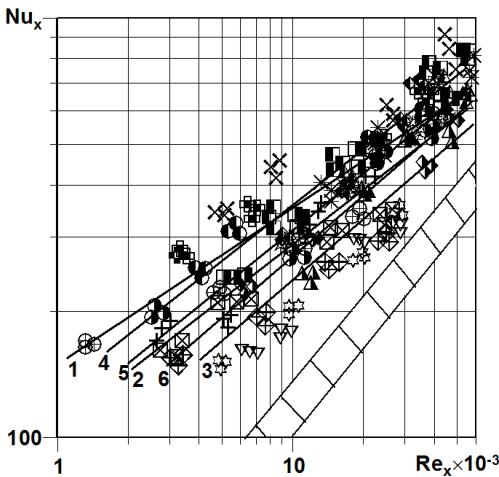


Таблица 3

f	$Nu_x = A Re_x^m$	
0,485	A	$0,329 \left(\frac{H}{d} \right)^2 - 4,01 \frac{H}{d} + 15,105$
	m	$-0,006 \left(\frac{H}{d} \right)^2 + 0,068 \frac{H}{d} + 0,273$
0,85	A	$-0,199 \left(\frac{H}{d} \right)^2 + 0,402 \frac{H}{d} + 6,036$
	m	$0,0256 \frac{H}{d} + 0,358$

Рисунок 12 - Зависимости для практических расчетов местной теплоотдачи на участке последствия: 1 - $f=0,485$, $H/d_{cф}=0,83$; 2 - $f=0,485$, $H/d_{cф}=1,96$; 3 - $f=0,485$, $H/d_{cф}=2,66$; 4 - $f=0,85$, $H/d_{cф}=0,8$; 5 - $f=0,85$, $H/d_{cф}=1,86$; 6 - $f=0,85$, $H/d_{cф}=2,55$; заштрихованная область - теплоотдача при тангенциальном обтекании полусферических выступов: $\Psi_{сф.выст} Nu_{x0}$, $Nu_{x0}=0,0296 Re_x^{0,8} Pr^{0,43}$, $\Psi_{сф.выст}$ — поправка, учитывающая влияние матрицы выступов в канале на теплоотдачу (Ю.Ф.Гортышов, И.А.Попов, А.А.Халатов)

Для инженерных расчетов теплоотдачи на участке последействия экспериментальные данные представлены в виде зависимостей $Nu_x = A \cdot Re_x^m$ (рисунок 12), соотношения для расчета констант A и m приведены в таблице 3. В качестве характерной скорости в числе Re_x использовалась среднерасходная скорость воздуха в канале. Как видно, интенсифицирующее влияние струйного охлаждения на участке последействия составляет примерно 1,9-2,5 раза по сравнению с теплоотдачей на стенке канала при исходно тангенциальном обтекании матрицы выступов.

Таким образом, можно констатировать, что изменение высоты модели охлаждающего канала участка входной кромки турбинной лопатки с полусферическими выступами неодинаково влияет на теплоотдачу: так, в области лобового натекания воздуха на охлаждаемую поверхность наблюдается максимум теплоотдачи, характеризуемый при относительной плотности расположения выступов $f=0,485$ значением относительной высоты канала $H/d=3,91$. При $f=0,85$ максимум теплоотдачи более консервативен к изменению H/d . На участке же последействия с уменьшением $H/d_{сф}$ теплоотдача на поверхности с выступами возрастает. При этом для практического использования более предпочтительным является вариант $f=0,85$ ввиду более медленного темпа снижения теплоотдачи по длине участка последействия.

В четвертой главе приведены результаты исследования теплоотдачи при многорядном струйном натекании воздуха на поверхность с полусферическими выемками в условиях образования сносящего потока. Установлен вклад в интенсификацию теплообмена полусферических выемок. Проанализированы результаты визуализации течений в исследуемых условиях (с выступами и выемками). Сформулированы рекомендации по расчету и конструированию струйно-дефлекторных систем охлаждения с полусферическими выступами и выемками. Результаты расчетов температурного состояния входной кромки и заднего участка спинки лопатки с исследованным в диссертации комбинированным охлаждением сопоставлены с другими способами их охлаждения.

Полученные экспериментальные данные по струйному охлаждению поверхности с полусферическими выемками приведены на рисунке 13. Согласно данным Е.П. Дыбана и А.И. Мазура, при относительном шаге дефлекторных отверстий $t/d=3$ струйный характер обтекания охлаждаемой пластины реализуется наряду с течением типа пограничного слоя. Этим объясняется характер распределения местных коэффициентов теплоотдачи в направлении сносящего потока. Синусоидальная форма распределения коэффициентов теплоотдачи связано с локальным воздействием натекающих дискретных струй воздуха на охлаждаемую поверхность, а тенденция уменьшения теплоотдачи в направлении сносящего потока – с экранирующим действием развивающегося около охлаждаемой стенки

сносящего потока. Последнее качественно согласуется с данными Е.П. Дыбана, А.И. Мазура и Ю.Г. Горелова.

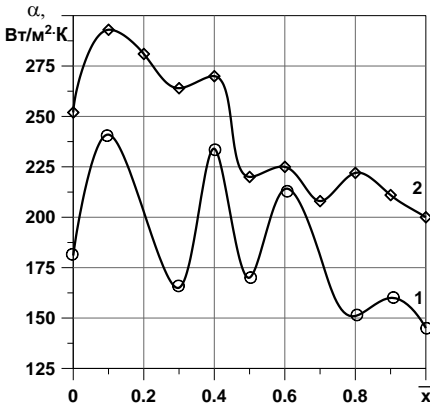


Рисунок 13 — Изменение местных коэффициентов теплоотдачи вдоль теплообменной модели ($Re_d=5000$): 1 — гладкая поверхность, 2 — поверхность с полусферическими выемками

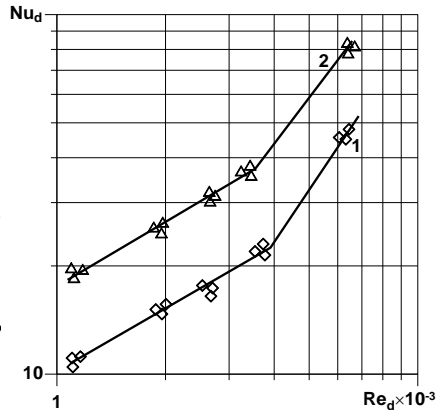


Рисунок 14 — Данные по средней теплоотдаче при струйном обдуве: 1 — гладкой поверхности, 2 — поверхности с полусферическими выемками

На рисунке 14 представлены сравнительные результаты исследования теплоотдачи при струйном обдуве воздухом гладкой поверхности и поверхности с полусферическими выемками. Аппроксимирующие линии в обоих случаях имеют «излом» в точке $Re_d=3300 \dots 3500$, что говорит о том, что при данном значении Re_d изменяется режим взаимодействия теплообменной поверхности с натекающим на нее потоком. Аналогичный «излом» наблюдали Керчер и Табаков для случая струйного обдува гладкой поверхности при значении числа Рейнольдса $Re_d \approx 3000$.

Из рисунка 14 видно, что наличие на охлаждаемой поверхности полусферических выемок с плотностью их расположения $f=0,35$ позволяет увеличить теплоотдачу в 1,7 раза по сравнению с охлаждаемой струями гладкой поверхностью. В исследованном случае прирост площади теплообменной поверхности составил 30%; остальные 40% прироста теплоотдачи обеспечиваются за счет гидродинамических интенсифицирующих эффектов.

Для того чтобы сформулировать физические модели взаимодействия струйных потоков с выступами и выемками полусферической формы, объяснить тенденции в изменении теплоотдачи в исследованных условиях, были проведены визуализационные эксперименты натекания однорядной системы струй на поверхность с матрицами выступов и многорядной системы струй для матрицы выемок, которые представлены в диссертации.

Они показали, что при натекании однорядной системы струй на нулевой ряд выступов характер обтекания первого ряда выступов соответствует струйно-канальной модели. Начиная со 2-го ряда выступов и далее - вниз по потоку наблюдается канальная модель обтекания выступов. Выполненные нами визуализационные исследования ($Re_{отв}=1100...4200$) струйно-канального режима обтекания системы выемок показали, что образующийся от системы натекающих на поверхность струй сносящий поток способствует формированию возвратных течений в полостях выемок с нестационарным характером, сопровождающимся крупномасштабными низкочастотными колебаниями. В результате этого в полусферической выемке происходит регулярное чередование двух процессов: периодического обновления образующегося возвратного течения с одной стороны и дискретного во времени и пространстве струйного потока, периодически достигающего донной области выемки – с другой. Установленный механизм регулярного нестационарного воздействия потоков на течение в полусферической выемке позволяет объяснить причину дополнительного увеличения теплоотдачи в ней по сравнению с гладкой поверхностью. Так, в исследованных условиях струйного натекания потока при замене гладкой поверхности на поверхность с полусферическими выемками теплоотдача за счет гидродинамического взаимодействия потока с поверхностью возрастает на 40%, а за счет увеличения площади теплообменной поверхности – на 30%.

Изложенные в диссертации физические модели взаимодействия струйного потока с поверхностями теплообмена, формованными выступами или выемками, учитывают особенности, которые отличают исследованные поверхности с выступами и выемками от исходно гладких прототипов.

Сформулированные на основе полученных результатов рекомендации по расчету теплоотдачи при струйно-дефлекторном способе охлаждения поверхностей с выступами или выемками были использованы для проведения сравнительных демонстрационных расчетов. Выполнена сравнительная оценка эффективности охлаждения Θ исследованного комбинированного способа охлаждения на основе сравнительных расчетов температурного состояния охлаждаемой стенки турбинной лопатки на участке входной кромки и заднего участка спинки ($T^*_{г}=1600$ К; $T^*_{охл.вх}=800$ К). Как следует из рисунка 15, одновременное применение на участке входной кромки струйно-дефлекторной интенсификации теплообмена совместно с полусферическими выступами позволяет понизить температуру стенки лопатки на 50...60 К по сравнению со струйно-дефлекторным способом; на 80...90 К - по сравнению с циклонным охлаждением и на 215 К - по сравнению с использованием "вихревой матрицы". Применение полусферических выемок на спинке позволяет снизить температуру стенки лопатки со стороны газа на 90...100 К по сравнению со струйным охлаждением гладкой поверхности.

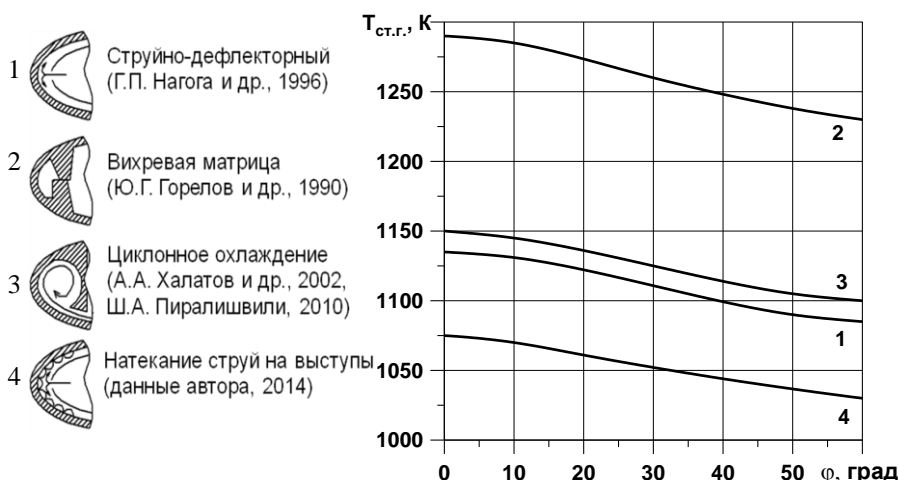


Рисунок 15 - Результаты сравнительной оценки температуры входной кромки турбинной лопатки со стороны газа при применении различных способов охлаждения ($T^*=1600 K$, $T^*_{охл.вх.}=800 K$; $G_{охл.отн} = 3,5\%$)

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Установлено, что в исследованном диапазоне изменения относительной высоты канала и с учетом увеличения площади теплообменной поверхности выступами теплоотдача в области лобовой точки при $f=0,85$ увеличивается по сравнению со струйным обдувом гладкой поверхности входной кромки до 1,7 раза, а при $f=0,485$ – до 2 раз.

2. Выявлено, что полусферические выступы на охлаждаемой импактными струями поверхности модели входной кромки лопатки сохраняют оптимальные значения относительной высоты канала H/d в области лобовой точки, а более высокая плотность расположения выступов f делает более консервативным значение максимума теплоотдачи к изменению H/d . Уровень теплоотдачи при $f=0,85$ составляет примерно 80% от теплоотдачи при $f=0,485$.

3. Получено, что на участке последствий (1-4 ряда матрицы выступов) при уменьшении $H/d_{сф}$ средняя теплоотдача увеличивается; кроме этого, с точки зрения повышения теплоотдачи на участке последствий более предпочтительным является вариант $f=0,85$.

4. Обнаружено, что на участке последствий струйного однорядного охлаждения поверхности с выступами средняя теплоотдача увеличивается в 1,9...2,5 раза по сравнению с исходно тангенциальным обтеканием исследованных матриц выступов.

5. Установлено, что применение полусферических выемок с $f=0,35$ на обдуваемой системой струй плоской поверхности может увеличить теплоотдачу в 1,7 раза по сравнению с гладкой поверхностью.

6. Визуализация течений показала, что при исследованных значениях f и H/d уже в 1-м ряду выступов начинает преобладать канальная модель течения. В выемках чередуются процессы обновления возвратного течения со струйным потоком, периодически достигающим дна выемки.

7. Результаты сравнительных расчетов по разработанным рекомендациям для натуральных условий работы сопловой лопатки турбины высокого давления показали, что при $T^*_{г} = 1600\text{K}$; $T^*_{\text{охл.вх}} = 800\text{K}$ и $G_{\text{отн.охл}} = 3,5\%$ средняя температура входной кромки при струйно-дефлекторном охлаждении с интенсификацией полусферическими выступами на 60 К ниже, чем при традиционном струйно-дефлекторном охлаждении; на 80 К ниже, чем при циклонном охлаждении и на 215 К ниже, чем при охлаждении при помощи вихревой матрицы. Применение полусферических выемок на заднем участке спинки лопатки позволит уменьшает температуру лопатки на 100 К по сравнению с традиционным струйно-дефлекторным охлаждением.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

D - гидравлический диаметр; d - диаметр отверстия в дефлекторе; $d_{\text{сф}}$ - диаметр полусферического выступа; f - относительная плотность расположения выступов или выемок; $G_{\text{отн.охл}}$ - относительный расход охлаждающего воздуха; H - высота охлаждающего канала; L - длина охлаждаемого участка; t - шаг между отверстиями в дефлекторе; $T^*_{г}$, $T^*_{\text{охл.вх}}$ - температуры газа перед турбиной и охлаждающего воздуха соответственно; $T_{\text{ст.г}}$ - температура стенки лопатки со стороны газа; x - криволинейная координата вдоль охлаждаемой поверхности (от лобовой точки в модели входной кромки, от первого ряда отверстий в дефлекторе на спинке лопатки); Re_H , Nu_H - числа Рейнольдса, Нуссельта, вычисленные по высоте канала; Re_x , Nu_x - по криволинейной координате; Re_D , Nu_D - по гидравлическому диаметру; Re_d , Nu_d - по диаметру отверстия в дефлекторе; α - коэффициент теплоотдачи; α_0 - коэффициент теплоотдачи в лобовой точке; Θ - эффективность охлаждения, $\Theta = (T^*_{г} - T_{\text{ст.г}}) / (T^*_{г} - T^*_{\text{охл.вх}})$; φ - угол, отмеряемый от лобовой точки модели входной кромки вдоль охлаждаемой поверхности, с левой стороны выступа в поперечном его сечении.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

Научные статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК:

1. Иванов С.Н. Теплоотдача при струйном охлаждении поверхности с выемками / Щукин А.В., Ильинков А.В., Дезидерьев С.Г., Иванов С.Н. // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева - Казань: изд-во КНИТУ-КАИ, 2013, №2, вып. 1, с. 43-48.

2. Иванов С.Н. Интенсификация теплообмена при комбинированном охлаждении входной кромки турбинной лопатки / Щукин А.В.,

Ильинков А.В., Дезидерьев С.Г., Иванов С.Н. // "ИВУЗ Авиационная техника", №4, 2013 г., с.47-50.

Работы, опубликованные в других изданиях:

3. *Иванов С.Н.* Визуализация течений при натекании струй на поверхность, формованную сферическими выемками / Иванов С.Н. // Материалы XV Международной молодежной научной конференции "Туполевские чтения", т. 1, г. Казань, 2007 г., с. 329-330.

4. *Иванов С.Н.* Теплоотдача при струйном натекании потока на поверхность / Иванов С.Н. // Материалы XVI Международной молодежной научной конференции "Туполевские чтения", т. 1, ч. 2, г. Казань, 2008 г., с. 283.

5. *Иванов С.Н.* Теплоотдача при струйном охлаждении поверхности со сферическими выемками / Иванов С.Н., Ильинков А.В., Щукин А.В. // Труды VIII школы-семинара молодых ученых и специалистов академика РАН В.Е. Алемасова, г. Казань, 2012 г., с. 363-366.

6. *Иванов С.Н.* Особенности теплоотдачи на поверхности со сферическими выемками при струйном ее обдуве / Иванов С.Н., Титов С.С. // Материалы XX Международной молодежной научной конференции "Туполевские чтения", т. 1, г. Казань, 2013 г., с. 212-213.

7. *Иванов С.Н.* Интенсификация теплообмена сферическими выступами в условиях струйного охлаждения входной кромки турбинной лопатки / Иванов С.Н., Миназов Р.И. // Материалы XXI Международной молодежной научной конференции "Туполевские чтения", т. 2, г. Казань, 2013 г., с. 264-265.

Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Печ. л. 1,25. Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд. л. 1,0.

Тираж 120. Заказ Г33.

Копи-центр КНИТУ-КАИ. 420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10