

ОТЗЫВ

официального оппонента к.т.н., начальника бюро Ю.Г. Горелова
на диссертацию **Иванова Сергея Николаевича** «Теплоотдача при струйно-
дефлекторном охлаждении турбинных лопаток с полусферическими выступами и
выемками», представленную на соискание ученой степени кандидата технических
наук

Актуальность темы. Альтернативой ребрам для внутренней интенсификации теплоотдачи в профилях газотурбинных лопаток являются углубления и выпуклости в виде полусферических лунок. Лунки гарантированно снижают потери давления относительно ребер и могут увеличить суммарную теплопроизводительность канала. Они хорошо показали себя при создании компактных и эффективных теплообменников, в системах охлаждения лопаток ГТД.

Наибольшие трудности в обеспечении эффективного охлаждения турбинной лопатки возникают на участке входной кромки, где стесненные условия затрудняют использование некоторых способов интенсификации теплообмена. Эффективность охлаждения поверхности входной кромки может быть повышена использованием импактных воздушных струй, однако трудности генерации каналов охлаждения в стесненных условиях полости входной кромки лопаток, не всегда позволяют реализовать оптимальные геометрические условия каналов. В подобном случае возможно дополнительное улучшение эффективности струйного охлаждения размещением на охлаждаемой струями поверхности сферических выступов.

Скачкообразное увеличение коэффициентов теплоотдачи от газа в зоне ламинарно-турбулентного перехода потока на спинке лопаток турбин требует дополнительной интенсификации теплоотдачи от воздуха к имеющемуся обычно в этой зоне струйно-дефлекторному способу охлаждения. Таким способом с высокой теплопроизводительностью является способ охлаждения со сфероидальными выемками в этой области.

Отсутствуют сведения по полусферическим выступам со струйным обдувом. Опубликованные научные результаты по полусферическим лункам при струйном

обдуве имеют частный характер и не отвечают на вопросы, являющиеся предметом исследований С.Н. Иванова. В связи с этим исследование теплообменных и гидродинамических процессов в стесненных каналах со сферическими выпуклостями, выемками является жизненно важной задачей. Поэтому исследование способов повышения интенсификации теплоотдачи с минимальными потерями давления на основе расчетных и экспериментальных исследований является важной и актуальной задачей, решение которой ведет к повышению эффективности охлаждения лопаток ГТД и ГТУ.

Научная новизна диссертационной работы С.Н. Иванова состоит в том, что автор впервые получил и обобщил комплекс опытных данных по влиянию на теплообмен и сопротивление геометрических и режимных параметров полусферических выступов и выемок в модельных условиях полости входных кромок лопаток турбин и на спинной части лопаток, соответственно.

С.Н. Ивановым 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 последствий за ним - $f=0,85$.

Автор выполнил анализ и представил обобщенную картину теплогидравлической эффективности исследованных каналов в контексте совокупности имеющихся у него данных.

Практическая значимость полученных в диссертационной работе результатов заключается в том, что С.Н. Иванов установил обобщенные закономерности изменения теплогидравлических параметров в стесненных каналах охлаждения входной кромки и в области ламинарно-турбулентного перехода газового потока на спинке с поверхностными интенсификаторами теплообмена в виде сферических выступов и выемок, соответственно. Получены научные результаты, которые позволят разработать методику расчета температурного состояния сопловых и рабочих лопаток турбин ГТД и ГТУ, потерь давления в каналах со сферическими выступами и впадинами.

Сформулированные в диссертационной работе выводы расширяют представления о механизме конвективного теплопереноса в сферических выступах и впадинах, о теплогидравлической эффективности исследованных теплообменных поверхностей.

Это позволяет установить приоритеты в выборе геометрических параметров систем охлаждения лопаток турбин различного назначения с полусферическими выступами, впадинами и определить целесообразные режимы их эксплуатации.

Замечания по диссертации состоят в следующем.

1. Желательно выполнить сравнение для выступов в полости входной кромки на участке последствий не только с данными для струйного обдува вогнутой поверхности из плоской щели Р. Гардона и К. Акфирата, но и с данными Е. П. Дыбана, А. И. Мазура для струйного обдува из отверстий.
2. Автор предполагает, что причиной того, что на поверхности с выступами относительная теплоотдача (α/α_0) снижается до более низкого уровня, чем на обдуваемой гладкой поверхности, является повышенный уровень турбулентности и вихреобразования при взаимодействии струй, что увеличивает α_0 . В дальнейшем следовало бы подтвердить это сравнительными расчетными исследованиями. А также объяснить физический механизм явления того, что на участке последствий предпочтительным является максимальная плотность расположения выступов $f=0,85$.
3. Преимущество струйного обтекания над поперечным (тангенциальным) течением в гладком канале оценивается в 1,9 – 2,5 раза, желательно оценить вклад лунок в интенсификацию теплообмена, разделив влияние лунок и струй для Nu_x . В диссертации указывается на то, что при $H/d = 1,6...1,66$ данные по теплоотдаче при струйном (дефлекторном) способе совпадают с данными при струйном обдуве с полусферическими выступами при $f = 0,485$ и $0,985$, однако относительное расстояние ($H/d=1,6...1,66$) довольно часто применяется в дефлекторных лопатках авиационных ГТД.

4. Вызывает некоторое недоумение несоответствие эффективности охлаждения входной кромки - температуре стенки на рисунке 4.8 диссертации, а также несоответствие авторов исследований на рисунке 15 автореферата и рисунке 4.8 диссертации. Данные по температуре охлаждаемой стенки входной кромки представляются несколько заниженными. Так, для условий, представленных в диссертации: $T_r^* = 1600\text{K}$, а $T_{\text{охл. вх.}}^* = 800\text{K}$; $G_{\text{охл.}} = 3,5\%$ по результатам определения $\theta_{\text{вх.кр.}}$ в работе Ю.Г. Горелова, М.В. Сухова (Теплоэнергетика, №3, 2000г.) температура стенки входной кромки при струйно-дефлекторном способе охлаждения с выпуклостями на вогнутой поверхности (если $T_{\text{дефл.}} - T_{\text{дефл. с выпукл.}} = 60\text{ K}$) ниже, чем при вихревом способе на $\sim 100^\circ$, по данным автора эта величина составляет $(150 - 160)^\circ\text{C}$. Непонятно также в какую сторону отложено 60° относительно лобовой точки 0° на рисунке 15 автореферата для циклонного способа охлаждения, т.к. для циклонного способа симметричности в теплоотдаче относительно 0° не существует.

5. В дальнейшем хотелось бы пожелать автору исследовать влияние шага полусферических выступов, а также вариант расположения выпуклостей на входной кромке при одновременном их размещении с $f = 0,485$ - в лобовой точке и с $f = 0,985$ - на участке последействия.

Оформление диссертации выполнено качественно и на высоком уровне.

Заключение. Из анализа работы в целом следует, что диссертация С.Н. Иванова выполнена на актуальную тему. Она посвящена экспериментальному комплексному исследованию конвективного теплообмена и гидродинамики в стесненных условиях входной кромки и в спинных каналах лопаток между дефлектором и стенкой лопатки с нанесенной на охлаждаемую поверхность макрошероховатостью в виде выступов и выемок сферической формы, соответственно. Для проведения этих исследований автором был создан опытный стенд, выполнена обширная программа экспериментов.

На основе анализа гидродинамической картины течения он выявил новые типы крупномасштабных вихревых структур, образующихся в сферических выступах и выемках, установил обобщенные закономерности конвективного

теплообмена и гидравлического сопротивления в каналах со сферическими выпуклостями и впадинами.

Диссертационная работа С.Н. Иванова является законченной научной работой, посвященной важным разделам теплофизики и теоретической теплотехники. Вынесенный на защиту материал обладает научной новизной и практической значимостью. Основные результаты диссертации опубликованы в печати и в полной мере обсуждались на различных конференциях и семинарах. Автореферат отражает содержание диссертации. Сделанные замечания по диссертации не влияют на общую положительную оценку рецензируемой работы.

Таким образом, на основе вышесказанного можно полагать, что диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям, а ее автор **Иванов Сергей Николаевич** достоин присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника и 05.07.05 – тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов.

Официальный оппонент
кандидат технических наук,
начальник бюро КБПР
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»



Ю.Г. Горелов

Подпись официального оппонента, кандидата технических наук, начальника бюро КБПР ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют» Ю.Г. Горелова заверяю:

Генеральный конструктор
ФГУП «НПЦ газотурбостроения «Салют»



Г.П. Скирдов