

ВИХРЕВОЙ ЭФФЕКТ И ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА В ЭЛЕМЕНТАХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

©2011 Ш. А. Пиралишвили, С. В. Веретенников

Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьёва

Представлены результаты численного и экспериментального исследования теплообмена и газодинамики в вихревых энергоразделителях. Приведены примеры охлаждаемых сопловых лопаток со встроенными вихревыми энергоразделителями.

Вихревой эффект, теплообмен, закрутка потока, турбина.

Введение.

Особые свойства закрученных течений имеют широкий диапазон технических приложений.

В технических устройствах закрутка потока (сообщение потоку вращательного движения с помощью различных закручивающих устройств) приводит к крупномасштабному воздействию на все параметры поля течения, а следовательно, и на теплообмен. При этом характерные для закрученных течений трехмерность поля скорости и соизмеримость тангенциальной и осевой компонент скорости обуславливают формирование трехмерного поля давления с радиальным градиентом, превышающим продольный. Благодаря наличию поперечных составляющих скорости - тангенциальной и радиальной, усиливается конвективный перенос импульса, энергии и массы и изменяется вихревая структура закрученных потоков. С этим связаны столь необходимые в технических приложениях свойства закрученных течений, выражающиеся в их способности интенсифицировать процессы тепло- и массообмена, выравнивать локальные температурные неоднородности за счет конвективного перемешивания, подавлять или усиливать случайные возмущения, стабилизировать процессы течения в условиях сложного теплообмена при протекании химических реакций или процессов горения, обеспечивать рециркуляционное течение в камерах сгорания с более полным выгоранием топлива и др.

Необходимость исследования теплообмена при течении закрученного потока в

осесимметричных каналах вихревого энергоразделителя возникла в связи с задачей совершенствования систем охлаждения лопаток турбин. Закрутка потока интенсифицирует процесс теплообмена и приводит к увеличению коэффициента теплоотдачи по длине канала, а энергоразделение потока позволяет более эффективно охлаждать наиболее теплонапряжённые участки пера лопатки [1-3].

Еще одна не менее важная область применения закрученного течения с организацией эффекта энергоразделения – борьба с обледенением элементов конструкций входных устройств авиационных двигателей [3].

Применение вихревых энергоразделителей в системах охлаждения лопаток турбин. Развитие способов охлаждения лопаток высокотемпературных турбин требует повышения коэффициента теплоотдачи в охлаждаемых каналах за счет изменения их геометрии. Особый интерес с точки зрения обеспечения повышения изотермичности поверхности охлаждаемой лопатки представляет использование эффекта температурной стратификации (энергоразделения), позволяющего на выходе из задиафрагмированного в концевых сечениях канала с потоком закрученного газа получить два результирующих потока с большей и меньшей температурой (известный эффект Ранка-Хилша). Рациональное распределение охлаждающих потоков с различной температурой и сравнительно высокой остаточной закруткой позволит снизить неравномерность температуры по высоте пера лопатки и обеспечить необходимую степень охлаждения наиболее уязвимых по перегреву кромок лопатки.

Использовать микровихревой эффект (ВЭ) в лопатке впервые предложили японские инженеры [1]. Разработанная ими система охлаждения (рис. 1) предполагает подачу сжатого воздуха по вертикально расположенным запиточным каналам – коллекторам на вход закручивающих устройств микро ВЭ, размещенных в теле пера лопатки, охлажденные потоки которых через перфорацию подаются на выпуклую, а подогретые массы – на вогнутую поверхность, как показано на рис. 1. К сожалению, информации о такой системе охлаждения в литературе обнаружить не удалось. Очевидно, это связано с недостатками способа. Весьма сложная конструкция, чрезвычайно маленький диаметр энергоразделителя, существенно снижающий эффекты энергоразделения, нивелируют заявленные авторами эффекты.



Рис. 1. Рабочая лопатка с вихревыми микроэнергоделителями [1]

Более перспективна схема авторов [2,3], в которой два ВЭ встраиваются в лопатку пера, а их камеры энергоразделения расположены в средней по высоте пера части лопатки. Охлажденный поток отводится на охлаждение кромок (рис.2).

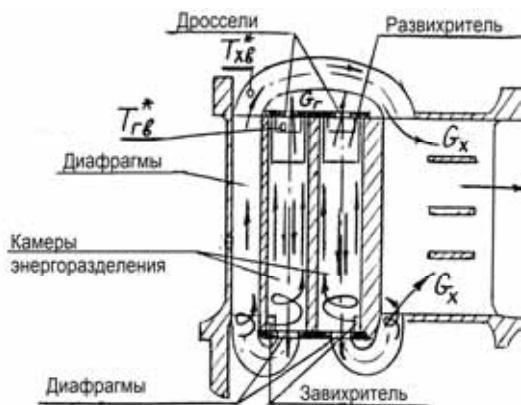


Рис. 2. Схема течения воздуха в сопловой лопатке, охлаждаемой двумя ВЭ [2, 3]

Относительно “холодные” выпуклая и вогнутая поверхности пера охлаждаются нагретым потоком, что приводит к некоторому росту температуры средней части лопатки.

Примечательно, что в лопатке с конвективным петлевым охлаждением весь воздух идет на охлаждение входной кромки, а в лопатке с ВЭ - не больше половины от всего расхода, однако теплосъем с входной кромки от корня до $\bar{h} = 1/3$ высоты пера у лопатки с ВЭ выше.

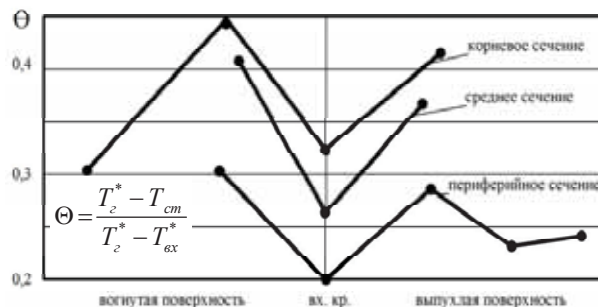


Рис. 3. Эффективность охлаждения лопатки с ВЭ при $\pi_{охл}^* = 2$ и $\mu = 0,8$

Температурная неравномерность по высоте входной кромки (рис. 4) для лопатки с вихревым охлаждением оказалась ниже, чем у лопатки с конвективно-петлевой схемой и лишь на 1/3 части высоты пера лопатка с ВЭ начинает несколько уступать лопатке с конвективно-петлевой схемой. Это связано со снижением степени закрутки и падением коэффициентов теплоотдачи.

Уменьшить неравномерность температуры по высоте входной кромки можно увеличением расхода воздуха в кромочном канале при сохранении суммарного расхода через лопатку, подавая дополнительный воздух через иглу-эжектор (рис.5, а), и используя известный ВЭ с дополнительным потоком, имеющий самую большую холодопроизводительность.

Свежая порция воздуха повышенного давления, эжектируя охлажденный поток компенсирует потери давления и, смешиваясь с охлажденным потоком, участвует в охлаждении средней части и периферии входной кромки. Эксперименты подтвердили увеличение расхода воздуха в кромочном канале на 25%. Эффективность охлаждения входной кромки на периферии возросла на 12% при сохранении относительного расхода воздуха через лопатку и некотором снижении перепада давления ($\pi^* = 1,8$).

При $T_r^* > 1650$ К, когда традиционные конвективные схемы недостаточно эффективны, для охлаждения кромки рекомендуются лопатки комбинированной схемой охлаждения (рис.5, б), входная кромка, которой защищена пленочной завесой охладителя, выпускаемого из переднего дефлекторного канала ($\bar{G} = 3,3\%$). Второй и третий каналы выполнены в виде камер энергоразделения с противоположным подводом охладителя $\bar{G} = 3,6\%$, что обеспечивает снижение температурной неравномерности по высоте средней части пера.

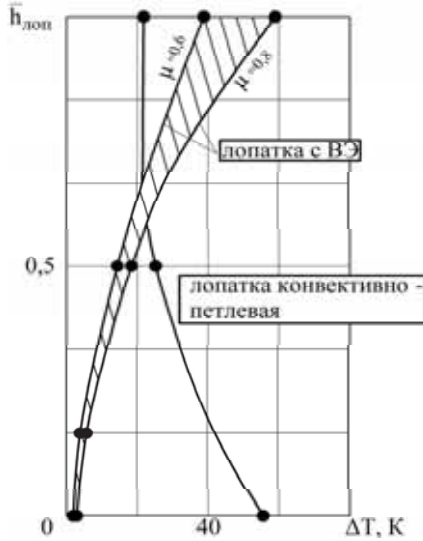


Рис 4. Температурная неравномерность по высоте входной кромки лопаток: $\Delta T = T_{cm} - T_{cm0}$, где T_{cm0} — температура средней части корневого сечения лопатки с ВЭ

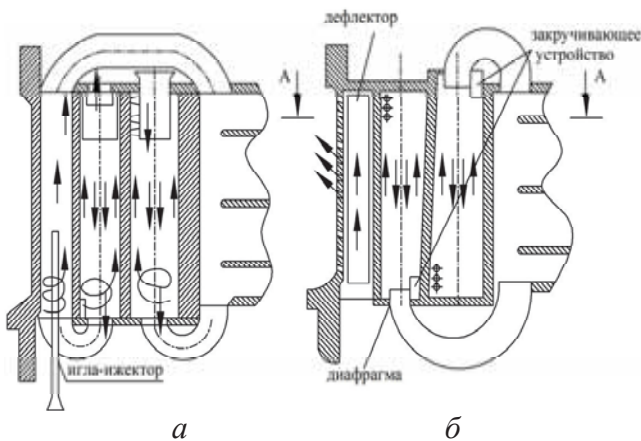


Рис. 5. Оптимизированные конструкции лопатки с ВЭ [1,2]: а - с эжекцией воздуха в кромочном канале и дополнительным потоком; б - со встречным подводом охладителя

В результате предложенных мероприятий удалось понизить максимальную разность температуры между серединой лопатки и выходной кромкой до 15%.

Экспериментальное исследование процессов теплообмена в вихревом энергоразделителе. Эффективность применения вихревых труб, а, следовательно, и эффективность охлаждения лопаток турбин, во многом зависят от оптимальных соотношений геометрических и режимных параметров (рис. 6). Использование ВЭ в системе охлаждения турбины вызывает ряд трудностей, связанных с отсутствием опытных данных и практических рекомендаций.

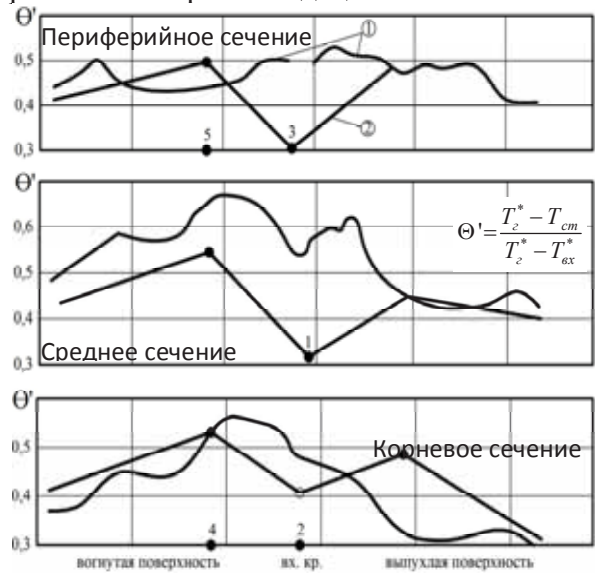


Рис 6. Эффективность охлаждения лопаток: 1- дефлекторная лопатка с конвективно-пленочным охлаждением; $\bar{G} = 6,7\%$; 2- лопатка с двумя ВЭ $\mu = 0,6$ с эжекцией; $\bar{G} = 3,4\%$

Для анализа путей использования вихревого эффекта в системах охлаждения сопловых лопаток турбин разработана и изготовлена модель вихревой трубы (рис. 7). Основная цель исследования - получение опытных данных по коэффициентам теплоотдачи на внутренних поверхностях каналов.



Рис. 7. Модель вихревого энергоразделителя

Геометрические параметры: диаметр камеры энергоразделения $d = 10$ мм, относительная площадь сопла $\bar{f}_c = 0,1$, относительный диаметр диафрагмы $\bar{d}_d = 0,5$, относи-

тельная длина до закручивающего устройства $\bar{\Gamma}=8$. В закручивающем устройстве применено двухзаходное тангенциальное сопло прямоугольного сечения с отношением сторон 1:2. На «горячем» конце установлен регулируемый щелевой диффузор.

В ходе эксперимента определялись характеристики вихревого энергоразделителя, с целью выявления наиболее эффективных режимов его работы.

На каждом из девяти положений диффузора ($\mu=0,9; 0,85; 0,67; 0,56; 0,4; 0,37; 0,25; 0,13; 0,08$) измеряемые параметры фиксировались по пяти давлениям ($P^*_{вх}=0,12; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3$ (МПа)). Температуры воздуха фиксировались при помощи ХК термомпар.

Необходимый баланс между расходом охлаждённого потока и эффектом энергоразделения достигается при $\mu=0,5 \div 0,7$. Эти режимы позволяют реализовать как достаточно высокие эффекты энергоразделения, так и значительную скорость потока в камере энергоразделения и патрубке охлаждённого потока.

В ходе нестационарного эксперимента при помощи метода регулярного режима определялись коэффициенты теплоотдачи.

Ниже приведены (рис. 8–9) наиболее характерные экспериментально полученные распределения коэффициентов теплоотдачи по внутренней поверхности камеры энергоразделения и патрубка охлаждённого потока.

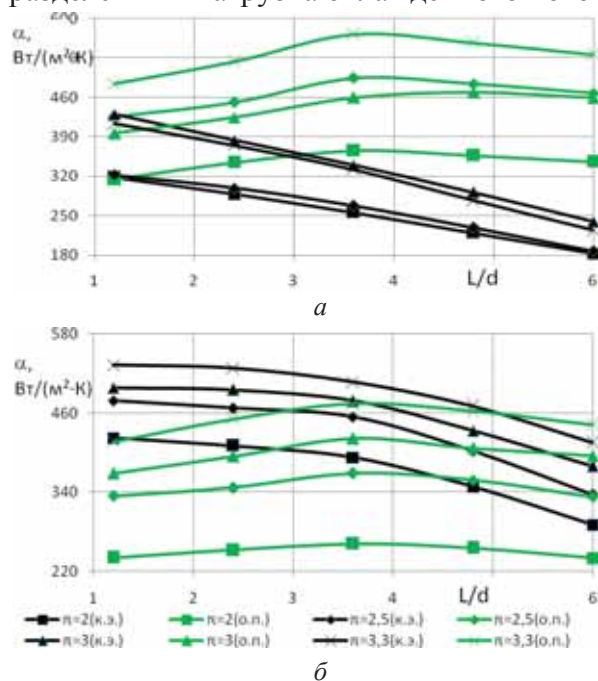


Рис. 8. Распределение коэффициентов теплоотдачи по длине камеры энергоразделения и длине патрубка охлаждённого потока (воздух): а- $\mu=0,74$; б - $\mu=0,32$

Анализ экспериментальных данных позволил выявить наиболее эффективные режимы работы вихревого энергоразделителя, характеризующиеся высокими коэффициентами теплоотдачи на поверхностях каналов. При доле охлаждённого потока $\mu=0,48$ и перепаде давления $\pi=3,3$ коэффициент теплоотдачи на поверхности камеры энергоразделения достигал максимального значения $\alpha=578$ $Вт/м^2·К$. На поверхности патрубка охлаждённого потока максимальное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha=572$ $Вт/м^2·К$ достигается при $\mu=0,74$ и $\pi=3,3$.

Следует отметить, что для распределения коэффициентов теплоотдачи по длине камеры энергоразделения (рис. 8) в направлении – от закручивающего устройства на всех исследуемых режимах характерно снижение α на 25 – 50%. В свою очередь, распределение α по длине патрубка охлаждённого потока в том же направлении на всех исследуемых режимах имеет совершенно противоположный характер - α увеличивается на 2...10%.

Дальнейшие эксперименты проводились с использованием водяного пара ($T=383К$) в качестве охладителя. Исследование проводилось при доле охлаждённого потока - $\mu=0,6$ и перепаде давления - $\pi=2$. На рис. 3 приведены графики распределения критериев подобия Нуссельта по длине охлаждаемых каналов для пара и воздуха. Видно, что значения коэффициентов теплоотдачи при использовании пара значительно превышают (более чем на 200%) значения α при использовании воздуха.

Настолько резкое снижение коэффициента теплоотдачи по длине каналов при использовании в качестве хладагента водяного пара можно объяснить тем, что из-за столь высокой эффективности теплосъёма на начальных участках каналов хладагент резко повышает свою температуру, а также немалую роль в этом играет затухание закрутки потока.

Экспериментальное исследование теплового состояния охлаждаемой лопатки турбины. При получении экспериментальных данных, необходимых для проектирования охлаждаемой лопатки с ВЭ, использовалась удобообтекаемая модель (рис. 9). В модели имеется два охлаждающих канала: канал по оси модели выполняет функции камеры энергоразделения, а канал во входной

кроме служит для отвода охлажденного потока. Геометрические параметры ВЭ: диаметр камеры энергоразделения $d=16\text{мм}$, относительная площадь сопла $\bar{f}_c = 0,1$, относительный диаметр диафрагмы $\bar{d}_d = 0,5$, относительная длина до закручивающего устройства $\bar{l} = 5$. В закручивающем устройстве применено тангенциальное сопло прямоугольного сечения с отношением сторон 1:2. На «горячем» конце установлен развихритель в виде плоской пластины. Для максимально возможного сохранения закрутки и

полного давления отверстие диафрагмы соединено с охлаждающим каналом входной кромки плавным круглым каналом.

Оптимизация процесса охлаждения определяется правильным выбором режима работы трубы.

Оптимальный по эффективности охлаждения режим работы на воздухе соответствует значению доли охлаждающего потока $\mu=0,6$ [3], для реализации которого на выходе горячего потока устанавливался специальный дроссель.

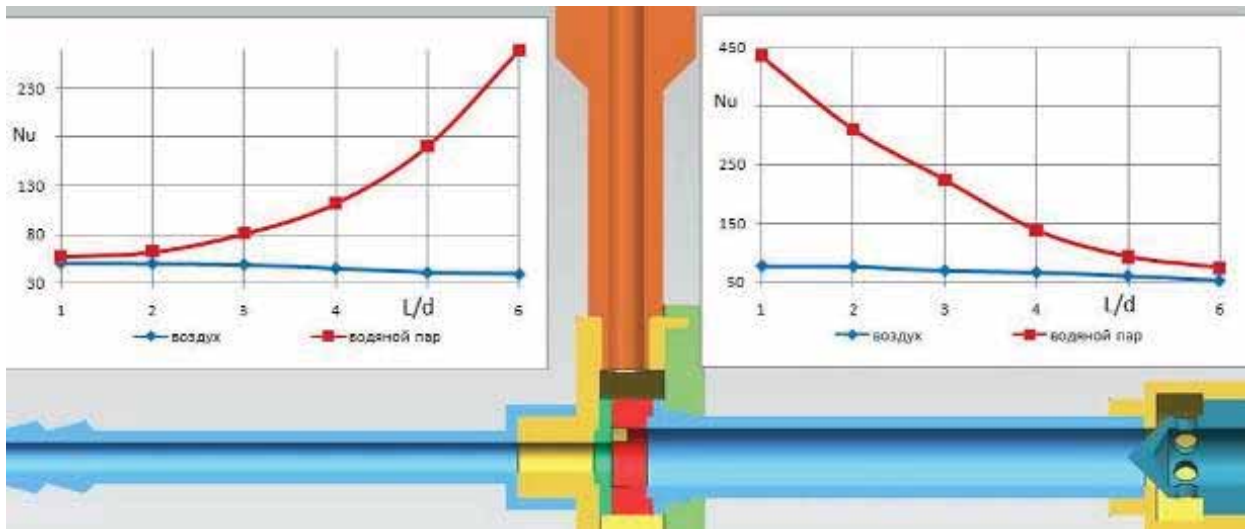


Рис. 9. Распределение критерия Нуссельта по длине камеры энергоразделения и патрубка охлаждённого потока ($\mu=0,6$)

Принцип работы лопатки с ВЭ (рис.10) состоит в следующем. Охладитель поступает из ресивера через сопло закручивающего устройства в центральный канал модели, делится на два потока – периферийный нагретый и центральный охлажденный. Нагретый поток охлаждает центральную часть модели и выбрасывается через отверстие дросселя в газовый тракт. Охлажденный в ВЭ центральный поток через диафрагму и плавный поворотный канал входной кромки охлаждает её и выпускается в газовый поток.

В ходе эксперимента были проведены 2 серии продувок при охлаждении воздухом и перегретым водяным паром. В результате обработки полученных данных получено распределение темпа охлаждения по длине канала (рис. 11). Видно, что значения темпов охлаждения при использовании перегретого водяного пара в качестве хладагента превышают значения при использовании в качестве хладагента воздуха на 200%.

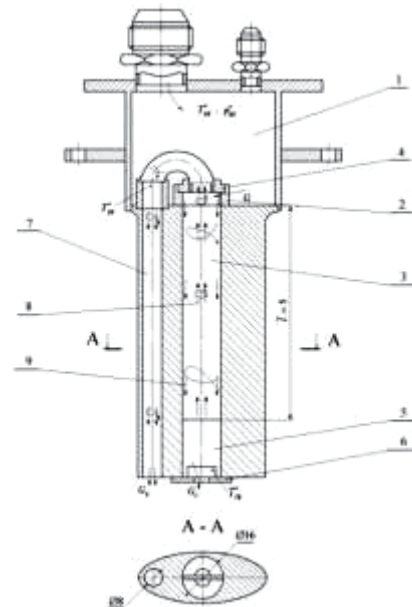


Рис. 10. Схема модели охлаждаемой лопатки с ВЭ: 1 – ресивер, 2 – закручивающее устройство, 3 – камера энергоразделения, 4 – диафрагма, 5 – развихритель, 6 – дроссель, 7 – канал входной кромки, 8 – осевой охлажденный поток, 9 – периферийный нагретый поток

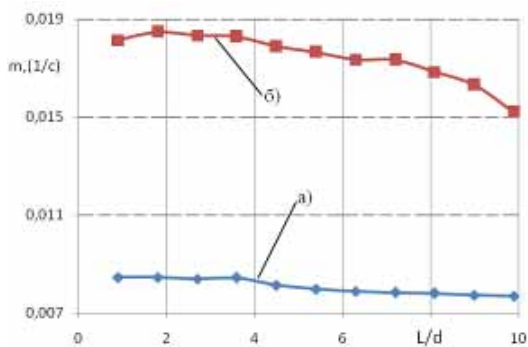


Рис. 11. Распределение темпа охлаждения по длине охлаждающего канала: а – воздух; б – перегретый водяной пар

Численное моделирование теплового состояния охлаждаемой лопатки турбины с вихревым энергоразделителем. По чертежам модели охлаждаемой лопатки турбины создана 3D модель расчётной области. Геометрия расчётной области представлена на рис. 12.

При расчёте задавались давление, расход и температура пара на входе в охлаждающий канал: $p=147,8\text{кПа}$; $G=0,0033\text{кг/с}$; $T=384\text{К}$. В межлопаточном канале задавались условия естественной конвекции. Система уравнений Рейнольдса замыкалась SST – моделью турбулентности. Теплофизические свойства водяного пара определялись по международной формуляции IAPWS IF 97.

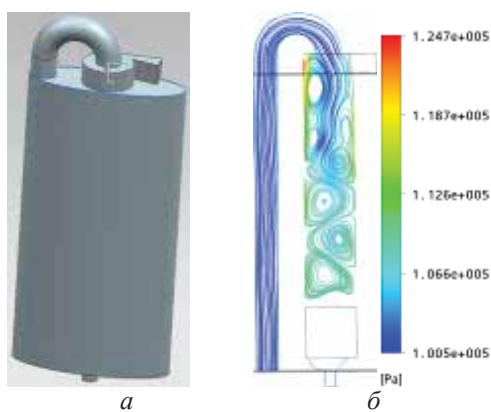


Рис. 12. Геометрия расчётной области (а) и линии тока в осевом сечении (цвет соответствует полному давлению потока) (б)

Центробежные силы, действующие на элементы газа в закрученном потоке, приводят к образованию радиального градиента статического давления, который под воздействием диссипативных моментов уменьшается по мере удаления от соплового ввода к дросселю. В результате в приосевой области

камеры энергоразделения устанавливается осевой градиент давления, направленный от дросселя к диафрагме, формирующий возвратное течение.

Закрутка потока интенсифицирует процесс теплоотдачи от стенок канала. Коэффициент теплоотдачи значительно увеличивается в области тангенциального сопла, достигая значения $\alpha=1300\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$, и снижается по длине канала на 40% (рис. 13).

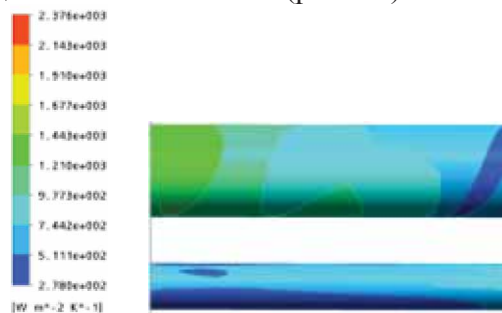


Рис. 13. Распределение коэффициентов теплоотдачи по поверхности канала

Заключение. Выполнен анализ возможности повышения эффективности охлаждения лопаток высокотемпературных турбин ГТД за счет использования в качестве хладагента перегретого водяного пара и закрутки потока. Проведены опытные исследования системы охлаждения для получения необходимых данных по теплообмену в охлаждающих каналах при использовании перегретого водяного пара и эффекта энергоразделения.

Выполнены исследования теплоотдачи в каналах вихревого энергоразделителя с использованием в качестве хладагента воздуха и водяного пара. Получены данные по коэффициентам теплоотдачи на внутренних поверхностях вихревого энергоразделителя. При доле охлажденного потока воздуха $\mu=0,48$ и перепаде давления $\pi=3,3$ коэффициент теплоотдачи на поверхности камеры энергоразделения достигал максимального значения $\alpha=578\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$. На поверхности патрубка охлажденного потока максимальное значение коэффициента теплоотдачи $\alpha=572\text{Вт/м}^2\cdot\text{К}$ достигается при $\mu=0,74$ и $\pi=3,3$. Область наиболее эффективных режимов (для воздуха) по эффективности энергоразделения и по коэффициентам теплоотдачи лежит в области $\mu=0,5\div 0,7$ и перепаде давления $\pi=2\div 3,3$. При использовании для охлаждения пара коэффициенты теплоотда-

чи на поверхности каналов увеличиваются и достигают значений $\alpha=1380$ Вт/м²·К.

Также проводились исследования вихревого энергоразделителя, встроенного в лопатку. Эксперимент показал, что темп охлаждения лопатки при использовании перегретого водяного пара более чем в два раза превышает темп охлаждения лопатки при использовании воздуха. По результатам численного расчёта коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности охлаждающего канала лопатки достигает значения $\alpha = 1300$ Вт/м²К, что хорошо согласуется с данными, полученными ранее.

Полученные экспериментальные данные не являются исчерпывающими в вопросе теплообмена от закрученного потока перегретого водяного пара в каналах, поэтому в настоящее время исследования в этой области

продолжаются.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-6371.2010.8.

Библиографический список

1. Пат. Японии №57-45881 МКИ Г 01D5/18. Схема охлаждения лопаток газовых турбин [Текст] / С. Кобаяси.- 1982
2. Пат. РФ №2133850, МПК F02C7/045. Лопатка входного устройства ГТД [Текст] / И.В. Жорник, Ш.А. Пиралишвили. -Приоритет от 27.01.1998.
3. Пиралишвили, Ш. А. Вихревой эффект. Эксперимент, теория, технические решения [Текст] / Ш. А. Пиралишвили, В. М. Поляев, М. Н. Сергеев. -М.: УНПЦ энергомаш, 2000. - 412 с.

VORTEX EFFECT AND INTENSIFICATION OF HEAT AND MASS TRANSFER IN CELL ENERGY TECHNOLOGY

©2011 Sh. A. Piralishvili, S. V. Veretennikov

Rybinsk State Academy of Aviation Technology named after P.A. Solovyev

The results of numerical and experimental study of heat transfer and gas dynamics in the vortex energy separator were presented. Examples of the cooled nozzle blades with built-in vortex tube.

Vortex effect, heat transfer, swirl flow, turbine.

Информация об авторах

Пиралишвили Шота Александрович, доктор технических наук, заведующий кафедрой общей и технической физики Рыбинской государственной авиационной технологической академии. E-mail: piral@list.ru. Область научных интересов: теплообмен, вихревой эффект.

Веретенников Сергей Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры общей и технической физики Рыбинской государственной авиационной технологической академии. E-mail: serveret@yandex.ru. Область научных интересов: теплообмен, газовая динамика.

Piralishvily Shota Alexandrovich, Doctor of Engineering science, professor, the head of the department «General and Technical Physics» of the Rybinsk State Academy of Aviation Technology named P.A. Solovjov. Phone: 8(4855) 21-90-64. E-mail: piral@list.ru. Area of research: heat transfer, vortex tubes, gas dynamics, heat transfer, vortex tubes.

Veretennikov Sergey Vladimirovich, Candidate of Engineering science, docent of the department «General and Technical Physics» of the Rybinsk State Academy of Aviation Technology named P.A. Solovjov. E-mail: serveret@yandex.ru. Area of research: heat transfer, gas dynamics.