НА ПРАВАХ
НЕ ВЫДАВАТЬ

На правах рукописи

УДК 536.24:621.375.826

Гущин Александр Владимирович

МОДЕЛИРОВАНИЕ СОПРЯЖЕННОГО ТЕПЛООБМЕНА В ПРОТОЧНЫХ ЧАСТЯХ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК С СЕКЦИОНИРОВАННЫМ ПОРИСТЫМ ВДУВОМ ОХЛАДИТЕЛЯ

05.04.12 – Турбомашины и комбинированные турбоустановки

01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2005

Работа выполнена в МГТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре "Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки".

Научный руководитель – заслуженный работник высшей школы РФ, к.т.н., профессор Осипов М.И.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор КУСТАРЕВ Ю.С.

– кандидат технических наук, доцент БУРКАЛЬЦЕВ В.А.

Ведущая организация – ФГУП ММПП "САЛЮТ"

Защита диссертации состоится "17" марта 2005 г. в "14" час. На заседании Диссертационного Совета Д 212.141.09 в Московском Государственном Техническом Университете им. Н.Э.Баумана по адресу: 105005, Москва, Рубцовская наб., д. 2/18, Учебно-лабораторный корпус, ауд. № 947.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ имени Н.Э.Баумана.

Ваши отзывы на автореферет в 2-х экземплярах, заверенные печатью, просьба высылать по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э.Баумана, ученому секретарю диссертационного совета 05.04.12.

Автореферат разослан "10" февраля 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного Совета, к.т.н., доцент Тумашев Р.З.

Расс в конце

Актуальность проблемы. Одним из путей улучшения эффективности газотурбинных двигателей и энергетических установок является повышение уровня температуры рабочих процессов с соответствующим ростом степени повышения давления в цикле, что невозможно без совершенствования тепловой защиты конструкционных элементов энергетических установок – сопловых и рабочих лопаток, камер сгорания и сопел газотурбинных двигателей и установок, а также стенок электродуговых плазмотронов при приемлемых значениях расходов охладителя и потерь энергии.

Одним из самых перспективных направлений тепловой защиты высокотемпературных газотурбинных установок является распределенный вдув охладителя в пограничный слой через пористую стенку, что отражено в работах Кутателадзе С.С. и Леонтьева А.И., Романенко П.Н., Харченко В.Н., Мугалева В.П., Мотулевича В.П., Кудрявцева В.П., Галицейского Б.М., Волчкова Э.П., Совершенного В.Д., Поляева В.М., Осипова М.И., Гольдштейна Р., Моффата П., Кейса В. и др.

Наряду с применением распределенного вдува через непрерывную пористую стенку эффективными и рациональным в силу конструктивно-технологических причин является использование вдува через пористые секции секционированной стенки. При этом создание равномерного распределения температуры по длине стенки всей конструкции и умеренного градиента температуры в стенке достигается при регулируемых расходах охладителя в каждой секции.

Для теплового и термопрочностного расчетов систем охлаждения проточных частей ГТУ с пористыми элементами необходимы данные о механизме и интенсивности теплопереноса, распределения коэффициентов трения и теплообмена при течениях рабочей среды, распределения температуры в секционированной стенке, включающей пористые элементы и непосредственно примыкающие к ним участки из непроницаемых материалов. Распределение параметров в пограничных слоях, тепловых потоков в стенку и тепловое состояние секционированной стенки можно получить, решив задачу сопряженного тепломассообмена при учете краевых условий, определяемых стыком пористых и непроницаемых секций.

Таким образом, исследование проблемы охлаждения конструкционных элементов газотурбинных двигателей и энергетических установок посредством вдува охлаждающего газа в пограничный слой через пористые секции стенки является одной из актуальных научно-технических задач.

Работа выполнялась на кафедре "Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки" МГТУ им. Н.Э. Баумана в соответствии с госбюджетными НИР по грантам РФФИ (00-15-99074 и 96-15-98143).

Цель исследования. Целью настоящей работы является дальнейшее развитие теоретического и экспериментального исследования комплексного сопряженного теплообмена, поставленного и проведенного на кафедре Э-3 Баумана, усовершенствование метода и разработка

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1708748
Гущин А.В. Моделирование с

программы расчета сопряженной задачи теплообмена для секционированной стенки со вдувом охладителя в пограничный слой применительно к проточным частям газотурбинных и энергетических установок.

Для достижения указанной цели поставлены следующие задачи:

- Разработка физической и математической моделей сопряженного тепломассообмена в стенке с секционированным вдувом охладителя в пограничный слой;
- Математическое моделирование в сопряженной постановке распределения тепловых потоков, локальных коэффициентов теплообмена и трения на секционированной стенке с пористым участками, а также теплового состояния секционированной стенки;
- Экспериментальные исследования сопряженного теплообмена при течении на стенках со вдувом через секции, изготовленные из высокотемпературных пористых материалов.

Научная новизна.

- Моделирование сопряженной задачи теплообмена для секционированной стенки с пористым вдувом при учете теплоизолированности или теплового сопротивления на стыках проницаемых и непроницаемых участков;
- Сопряжение внешней и внутренней задачи теплообмена на пористых участках по тепловому потоку и определяющей температуре наружной поверхности стенки, которая вычислялась как температура смешения газов из внешнего потока и охлаждающего воздуха из пористой матрицы на наружной поверхности стенки;
- Показана немонотонность распределения теплового потока, разности температур матрицы и охладителя на наружной поверхности пористой стенки и распределения температуры в пористых и непроницаемых участках в зависимости от интенсивности вдува, теплофизических свойств материалов, толщины стенки, скорости внешнего потока (при V_∞=const и $V_{\infty 2} > V_{\infty 1}$), шероховатости поверхности и различных граничных условий.

Практическое значение и реализация результатов. Предложенный метод расчетов процессов теплообмена в секционированной стенке с охлаждаемой пористой секцией и выполненные эксперименты дают возможность:

- Моделировать процессы переноса импульса и энергии, распределения локальных коэффициентов трения и теплообмена, прогнозировать тепловое состояние элементов проточной части энергетических установок с пористым охлаждением.
- Применить предложенную методику к широкому классу пористых материалов, элементам различной геометрии и для различных режимов течения.
- Обосновать возможность применения пористых материалов и композитов с целью обеспечения повышения КПД и удельной мощности газотурбинных двигателей и энергетических установок за счет

уменьшения отборов воздуха за компрессором для тепловой защиты проточной части.

На защиту выносятся:

- Моделирование и методика расчета сопряженной задачи теплообмена и трения в двумерной постановке для секционированной стенки с пористой секцией и вдувом охладителя в пограничный слой.
- Результаты численных расчетов теплового состояния для секционированной стенки с пористой секцией, выполненных для различных значений интенсивности вдува, теплофизических параметров пористой матрицы и непроницаемых секций, а также различных краевых условий и геометрии стенки.
- Результаты экспериментов, полученных на специальном высокотемпературном стенде кафедры Э3 МГТУ им. Н.Э. Баумана и специально спроектированных экспериментальных участков, изготовленных из пористых материалов.
- Результаты, показывающие эффективность применения секционированного пористого охлаждения в газовых турбинах.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были доложены на:

- ✓ Всероссийской Межвузовской Научно-технической конференции Газотурбинные и Комбинированные установки и двигатели, посвященной 150-летию Н.Е. Жуковского (г. Москва, 1996 г.);
- ✓ Всероссийском научно-техническом семинаре им. проф. Уварова, г. Москва, 1997 г., 2003 г.;
- ✓ Второй Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 1998 г.);
- ✓ Всероссийской Межвузовской Научно-технической конференции Газотурбинные и Комбинированные установки и двигатели (г. Москва, 2000 г.);
- ✓ Int. Conference on Heat Exchangers for Sustainable Development, Portugal, 1998;
- ✓ Millenium Int. Symposium on Thermal and Fluid Sciences (Thermal & Fluid 2000), China, 2000.

Диссертационная работа была заслушана и одобрена на заседании кафедры "Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки". МГТУ им. Н.Э.Баумана (2003 г.)

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 5 печатных работах.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Она содержит 138 страниц основного текста, 90 рисунков, 5 таблиц и 4 страницы со списком использованной литературы, включающим 62 наименования.

Содержание работы. Во введении приведено обоснование актуальности проблемы, как результат анализа влияния эффективности системы охлаждения и расхода охладителя на К.П.Д. и мощность энергетических ГТУ открытого типа, используемых в промышленности. Показано, что для ГТУ мощностью 24,7 МВт (типа GT10B, π_k=14, $T_г^*$=1385 К)

уменьшение расхода воздуха на охлаждение с 16 до 6% приводит к увеличению К.П.Д. до 36,0% (на 1,4% абс.) и мощности до 28,6 МВт (на ~16%). Для ГТУ мощностью 30,5 МВт (типа GT10C, $\pi_к$=18, $T_г^*$=1417 К) уменьшение расхода охладителя с 18% до 7% повышает К.П.Д. до 37,6% (больше на 1,3% абс.) и мощность до 38,2 МВт (на ~25%). На примере сравнения эффективностей охлаждения, реализованных в лопатках газовых турбин с системами охлаждения различных типов, подтверждено существенное преимущество распределенного вдува через проницаемую стенку в пограничный слой по сравнению с другими системами охлаждения (включая конвективно-пленочное охлаждение).

Формулируются цель и задачи исследования, характеризуется научная новизна, достоверность и практическая значимость полученных результатов, указываются вопросы, которые выносятся на защиту.

В первой главе рассматривается история вопроса и анализируются работы в области сопряженного теплообмена, внешней и внутренней задачи расчета теплообмена для пористой секции, методы определения коэффициента внутреннего теплообмена в пористой стенке и расчета гидравлических характеристик пористых материалов. Исследованиям в области сопряженной задачи теплообмена посвящены работы Никитенко Н.И., Эммонса Г.В., Перельмана Т.Л., Лыкова А.В., Дорфмана А.Ш., Аккуратова Ю.Н., Купцовой В.С., Цыганка А.П., Карвинена П., Эккерта Е.Р.Г., Чо Х.Х., Леонтьева А.И., Полякова А.Ф., Осипова М.И., Битюрина В.А., и др. Отмечено отсутствие работ по сопряженному теплообмену на секционированной пористой стенке при отсутствии теплоизоляции между пористыми и непроницаемыми участками.

В результате анализа работ в области сопряженного теплообмена сделаны следующие выводы:

1. Сопряженная задача для секционированной стенки с пористым участком и вдувом охладителя в пограничный слой в двумерной постановке требует дополнительного исследования;
2. Сопряженную задачу теплообмена для секционированной стенки со вдувом следует решать с разделением на две краевые задачи и с выполнением условия сопряжения на границе контакта.
3. Для внешней задачи возможно использование численного и интегрального метода расчета пограничного слоя.
4. Решение внутренней задачи теплообмена необходимо выполнять при совместном расчете течения охладителя и теплообмена в матрице (двух-температурная модель).
5. Корректные краевые и граничные условия исключительно важны для достоверности расчетов.
6. Необходимы дополнительные теоретические и экспериментальные исследования, подтверждающие преимущества системы охлаждения с секционированным пористым вдувом.

Во второй главе обоснована постановка задачи сопряженного теплообмена, которая предусматривает решение внешней и внутренней задач теплообмена при соответствующих граничных условиях и решение комплексной задачи теплообмена с учетом сопряжения внешней и

внутренней задач для секционированной стенки. Физическая модель задачи сопряженного теплообмена приведена на рис. 1.

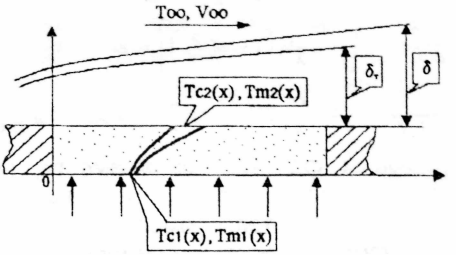

Рис. 1. Физическая модель задачи сопряженного теплообмена, где δ_T и δ, соответственно толщины теплового и динамического пограничного слоев

Для пограничного слоя на плоской стенке расчет проводится дифференциальным и интегральным методами.

$$\rho \cdot V_x \frac{\partial V_x}{\partial x} + \rho \cdot V_y \frac{\partial V_x}{\partial y} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y}\left(\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} - \rho \cdot \overline{V'_y \cdot V'_x}\right);$$

$$C_p\left(\rho \cdot V_x \frac{\partial T}{\partial x} + \rho \cdot V_y \frac{\partial T}{\partial y}\right) =$$

$$= \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - \rho \cdot C_p \cdot \overline{v'_y \cdot T'}\right) + V_x \frac{\partial p}{\partial x} + \mu\left(\frac{\partial V_x}{\partial y}\right)^2; \qquad (1)$$

$$\rho \cdot V_x \frac{\partial C}{\partial x} + \rho \cdot V_y \frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y}\left(\rho \cdot D \frac{\partial C}{\partial y} - \rho \cdot \overline{v'_y \cdot C'}\right);$$

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} = 0;$$

где V_x, V_y, V'_x, V'_y осредненные и пульсационные скорости потока по x и y.

Система дифференциальных уравнений в форме (1) является незамкнутой, что обуславливает использование моделей турбулентности. Численный метод решения внешней задачи с применением в качестве замыкания модификации модели турбулентности **RNG** $\kappa - \varepsilon$, предложенной Беллеттре, использовался для тестовых расчетов пограничных слоев на гладкой секционированной стенки со вдувом и не может распространяться на течение с учетом шероховатости.

При обосновании способа решения внешней задачи интегральным или дифференциальным методом, в качестве основного метода был принят интегральный, позволяющий с достаточной точностью учитывать комплексное влияние на тепломассообмен возмущающих факторов: неизотермичность, сжимаемость, градиентность течения, шероховатость и вдув газа в пограничный слой. Интегральные соотношения импульса, энергии и диффузии представлены в виде:

$$\frac{d\,\mathrm{Re}^{**}}{d\,\overline{X}} + f\cdot \mathrm{Re}_L\left(1 + H - M_\infty^2\right) = \mathrm{Re}_L\,\frac{C_{f0}}{2}\left(\Psi_\Sigma + b\right)$$

$$\frac{d\,\mathrm{Re}_T^{**}}{d\,\overline{X}} + \mathrm{Re}_T^{**}\left[\frac{1}{\Delta T}\frac{d\Delta T}{d\,\overline{X}} + \frac{1}{V_\infty}\frac{dV_\infty}{d\,\overline{X}}\left(1 - M_\infty^2\right)\right] = \mathrm{Re}_L\cdot St_0\left(\Psi_{\Sigma S} + b_T\right) \qquad (2)$$

$$\frac{d\,\mathrm{Re}_D^{**}}{d\,\overline{X}} + \mathrm{Re}_D^{**}\left[\frac{1}{\Delta \tilde{C}_i}\frac{d\Delta \tilde{C}_i}{d\,\overline{X}} + \frac{1}{V_\infty}\frac{dV_\infty}{d\,\overline{X}}\left(1 - M_\infty^2\right)\right] = \mathrm{Re}_L\cdot St_{D0}\left(\Psi_{\Sigma D} + b_D\right)$$

где влияние возмущающих факторов сжимаемости, неизотермичности, градиента давления, шероховатости и вдува определяются относительными законами трения, теплообмена и диффузии.

Учет влияния неизотермичности, сжимаемости и градиентности течения выполнен по относительным законам трения и теплообмена Кутателадзе С.С. - Леонтьева А.И., а комплексное влияние вдува и шероховатости учитывались по относительным законам трения и теплообмена, полученным Осиповым М.И.:

$$\Psi_{ШВДS} = \Psi_{ШS}\cdot\left(1 - \frac{b_T}{b_{кр}\cdot\Psi_{ШS}}\right)^2, \quad где \quad \Psi_{ШS} = f\left(\frac{k_S}{\delta_T^{**}}\right);\ f\left(\frac{k_S}{\delta^{**}}\right)$$

Распределение скорости в пограничном слое на проницаемой шероховатой стенке принималось в следующем виде:

$$\omega = \frac{u}{u_\infty} = \left(1 - \frac{b_0}{b_{кр}\cdot\Psi_{Ш}}\right)\cdot\omega_{0ш} + \frac{b_0}{b_{кр}\cdot\Psi_{Ш}}\cdot\omega_{0ш}^2,$$

где $\omega_{0Ш}$ - профиль скорости на непроницаемой шероховатой стенке.

Помимо предвключенного непроницаемого участка и участка со вдувом охладителя в пограничный слой расчет теплообмена (газовая завеса) на непроницаемом участке за пористой секцией выполнялся с помощью методов, предложенных Волчковым Э.П. и Лебедевым В.П.

Система уравнений внутреннего теплообмена включала:

<u>Предвключенный непроницаемый участок</u>:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{M0}\cdot\frac{\partial T_{M0}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{M0}\cdot\frac{\partial T_{M0}}{\partial y}\right) + q_{v0} = 0; \quad (3)$$

<u>Пористые участки со вдувом</u>, уравнения конвективно-кондуктивного теплообмена для проницаемой стенки со вдувом:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_M\cdot\frac{\partial T_M}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_M\cdot\frac{\partial T_M}{\partial y}\right) = \alpha_V\cdot(T_M - T_C); \\ &-\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_C\cdot\frac{\partial T_C}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_C\cdot\frac{\partial T_C}{\partial y}\right) + j\cdot C_P\cdot\frac{\partial}{\partial y}(T_C) = \alpha_v\cdot(T_M - T_C); \end{aligned} \qquad (4)$$

<u>Непроницаемые участки за пористой секцией</u>:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_{M1}\cdot\frac{\partial T_{M1}}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{M1}\cdot\frac{\partial T_{M1}}{\partial y}\right) + q_{v1} = 0; \quad (5)$$

где T_{M0}, T_{M1}, T_M, T_C – температура непроницаемого участка перед и за

проницаемой секцией, пористого участка и охладителя соответственно; λ_{M0}, λ_M, λ_{M1} – теплопроводность непроницаемого участка перед пористой секцией, проницаемого участка и участка за пористой секцией; α_v - объемный коэффициент теплоотдачи от матрице к охладителю; $j=\rho_c V_c$ – удельный расход вдуваемого газа; Ср – удельная теплоемкость вдуваемого газа; q_v – объемное тепловыделение в пористом каркасе.

Для вычисления объемного коэффициента теплоотдачи α_v от матрицы к охладителю принята аппроксимация Белова С.В. и др. ($Nu=2{,}5\cdot10^{-3}\Pi^{-0{,}92}xRe^{1{,}2}\delta^{-1}$; $\alpha_v=\frac{Nu\cdot\lambda}{(\beta/\alpha)^2}$; $Re=\frac{m(\beta/\alpha)}{\mu}$), и метод вычисления объемного коэффициента теплоотдачи α_v, предложенный Галицейским, Поляевым и Можаевым, учитывающий режим течения в проницаемой стенке. Трение внутри пористой стенки учитывались согласно уравнениям сохранения количества движения (обобщенный закон Дарси).

Граничные условия для внутренней задачи: для торцевых поверхностей непроницаемых участков и пористой матрицы - граничные условия второго рода, для внутренних и внешних поверхностей - граничные условия третьего рода. Для охладителя – граничные условия второго рода для торцевых поверхностей, граничное условие третьего рода на наружной и первого рода (температура) на внутренней поверхности (с учетом прогрева охладителя до входа в стенку согласно методике Поляева В.М. и Сухова А.В.).

Сопряжение внешней и внутренней задачи выполнялось по температуре стенки и тепловому потоку. При анализе методов расчета определяющей температуры стенки на пористых участках сделан вывод, что наиболее физически корректной представляется методика, предложенная Осиповым М.И., где для вычисления определяющей температуры стенки совместно решаются интегральные уравнения импульса, энергии и диффузии.

В третьей главе "Математическое моделирование сопряженной задачи теплообмена и анализ результатов расчетов" рассматривается конечно-элементный метод Галеркина, используемый для решения внутренней задачи. Область решения разбивается на множество трехузловых непересекающихся треугольных подобластей (201x51 узловых точек) двух типов (см. рис.2). Конечные элементы окружают узловую точку j (см. схему на рис. 3).

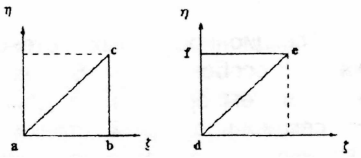

Рис. 2

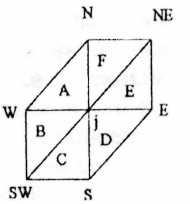

Рис. 3. Конечные элементы и узловая точка

Интегрированием по области (рис. 3) выполнена аппроксимация искомых дифференциальных уравнений внутренней задачи в алгебраические. Для решения внешней задачи в интегральной постановке использовался конечно-разностный метод.

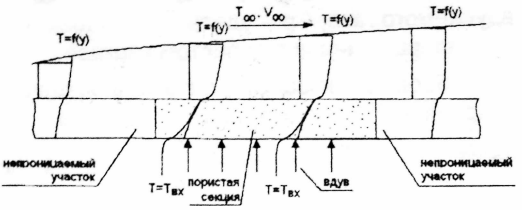

Рис. 4. Физическая модель расчетов

Расчеты выполнены для высокотемпературного турбулентного течения на секционированной стенке, состоящей из предвключенного непроницаемого участка, пористой секции и непроницаемого участка, а также для стенки, включающей чередующиеся непроницаемые и пористые участки, что моделирует стенку камеры сгорания, секционированную сопловую лопатку или элементы статора.

Условия расчетов соответствуют расчетным и экспериментальным параметрам, близким к реальным условиям в проточных частях ГТУ. Начало развития динамического и теплового пограничных слоев задается исходя из конструкции проточной части стенки, либо оно соответствует началу предвключенного непроницаемого участка. Режим течения на пористой секции соответствует $10^3<Re_T^{**}<10^4$ ($0 \le Re_T^{**}<10^4$ для расчетов с начальным динамическим участком). Анализируется течение на гладкой стенке и на стенке с заданной шероховатостью, соответствующей реальным условиям технологии изготовления металлических и керамических пористых материалов. В расчетах принимался уровень шероховатости поверхностей соответствующий K_S=10 мкм. Температура торможения газа в ядре потока (начальное сечение) в расчетах составляла 1773-1873 К, скорость по оси 0X 50, 400 и 100 – 400 м/с, полное давление 2 МПА. Пористость проницаемой секции – 40%, диаметр пор – 60 мкм. Интенсивность вдува по длине пористых участков задавалась постоянной $\bar{j} = const$ и варьировалась от $\bar{j} = 0{,}0001$ до $0{,}005$. Толщина стенок варьировалась в диапазоне 1, 5, 20 мм, что определяется геометрией различных элементов проточной части газовых турбин. Длина непроницаемых и пористого участка либо задавалась неизменной – 20 мм, либо варьировалась

Анализ результатов расчетов для секционированных стенок (рис. 5-8) позволяет отметить следующие особенности. Большая неравномерность критерия St и распределения температуры по длине секционированной стенки характерна для секционированной стенки с теплоизолированными участками (рис. 5). Особенно это заметно на стыках пористой секции и непроницаемых участков. У секционированной стенки с теплоизоляцией значение St и температура на стыках изменяется

скачкообразно, тогда как в стенке без теплоизоляции изменение St и температуры стенки на стыках достаточно плавно. Установлено: более равномерное распределение температуры в продольном направлении секционированной стенки и увеличение температуры пористого участка достигается при отсутствии теплоизоляции между участками за счет перетоков тепла между пористой секцией и непроницаемыми участками.

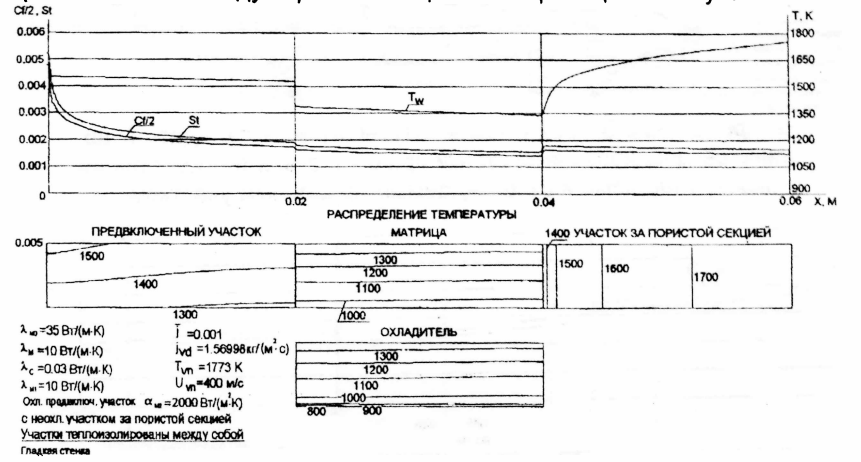

Рис. 5. Распределение St, Cf/2 и температуры стенки и охладителя по длине секционированной стенки с начальным охлаждаемым участком при теплоизоляции боковых стенок участков и с охлаждаемым начальным участком

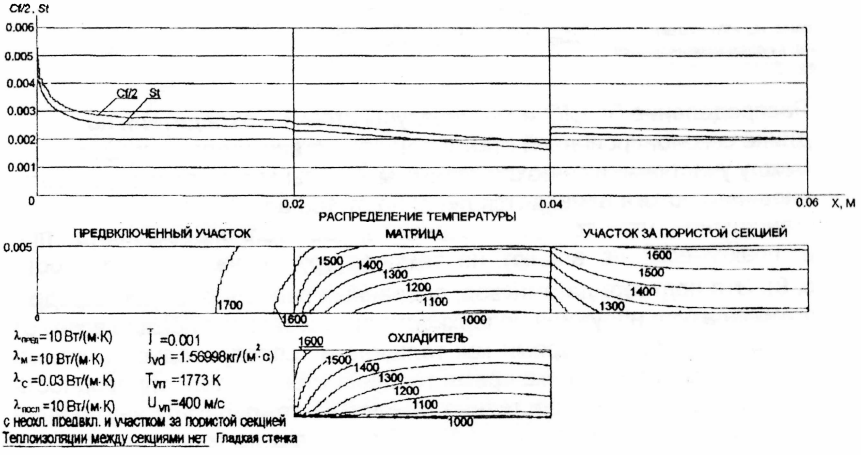

Рис. 6. Распределение St, Cf/2 по длине секционированной стенки и распределение температуры в секциях и охладителе при отсутствии теплоизоляции между участками и с неохлаждаемым начальным участком

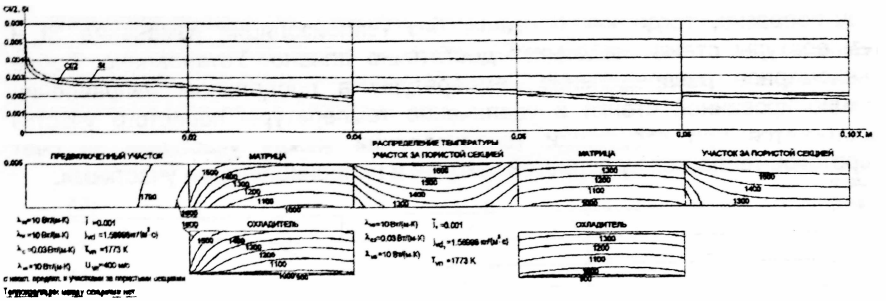

Рис. 7. Распределение St, Cf/2 и температуры стенки и охладителя по длине секционированной стенки при отсутствии теплоизоляции между участками и с охлаждаемым начальным участком

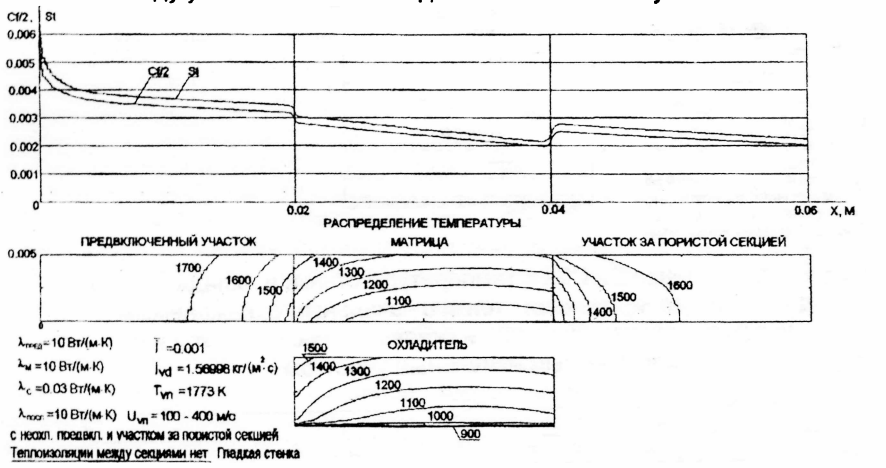

Рис. 8. Распределение St, Cf/2 и температуры стенки и охладителя по длине секционированной стенки при отсутствии теплоизоляции между участками и с неохлаждаемым начальным участком, скорость внешнего потока изменяется линейно от 100 до 400 м/с

Установлено, что толщина стенки и ее теплопроводность при $\bar{j} = const$ практически не влияют на температуру наружной поверхности (см. рис. 9). Это подтверждает вывод, сделанный ранее в работах кафедры Э-3, что температура наружной поверхности стенки зависит прежде всего от интенсивности вдува, в то время как толщина и теплопроводность стенки влияют намного слабее. В то же время толщина стенки и теплопроводность пористой матрицы очень существенно влияют на температуру внутренней поверхности стенки и на распределение температуры по толщине пористой матрицы и охладителя. Это влияние наиболее существенно при δ от 1 до 5 мм.

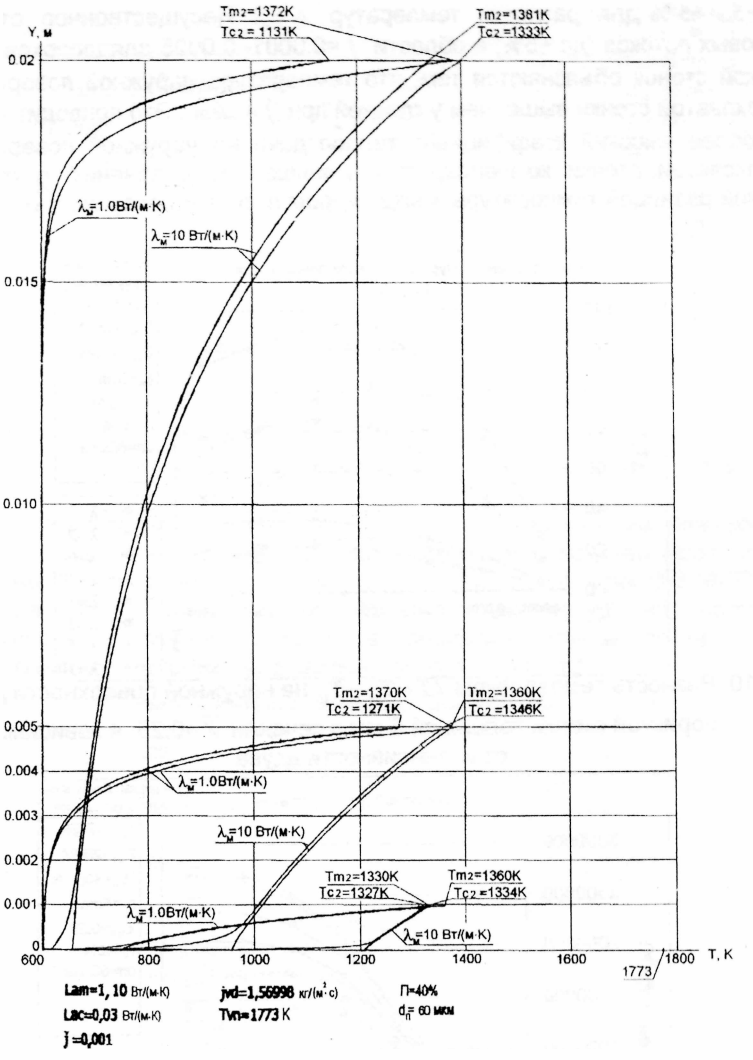

Рис. 9. Распределение температур по толщине проницаемой стенки в зависимости от коэффициента теплопроводности (λ_M) и толщины стенки T^*_r=1773К

Анализ влияния шероховатости поверхности стенки на St, тепловой поток и $\Delta T_{ст}$ на наружной поверхности показал (рис. 10-12), что при эквивалентной песочной шероховатости k_S=10 мкм St, тепловой поток и разность температур матрицы и охладителя на наружной поверхности (ΔT) шероховатой стенки превосходят те же параметры для гладкой стенки

при $\bar{j}$ >0.001 на ~ $70 \div 90$ % для St, на ~ $20 \div 60$ % для теплового потока и на ~ $5 \div 65$ % для разности температур $\Delta T_{ст}$. Несущественное отличие тепловых потоков (до ~5%) в области $\bar{j}$ =0.0001- 0.0005 для шероховатой и гладкой стенок объясняются тем, что температура наружной поверхности шероховатой стенки выше, чем у гладкой при $\bar{j} = idem$. Это приводит к тому, что более высокий коэффициент теплоотдачи на наружной поверхности шероховатой стенки компенсируется меньшей по сравнению с гладкой стенкой разницей температуры между ядром потока и поверхностью стенки $\Delta T = T_\infty - T_W$.

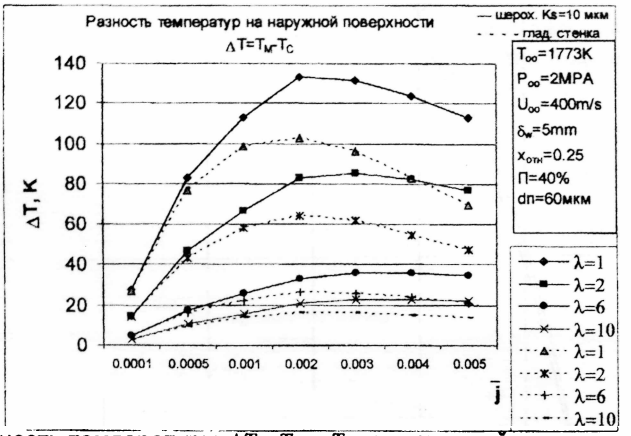

Рис. 10. Разность температуры $\Delta T = T_M - T_C$ на наружной поверхности для пористой стенки толщиной 5 мм в сечении $\bar{X}$=0.25, в зависимости от интенсивности вдува

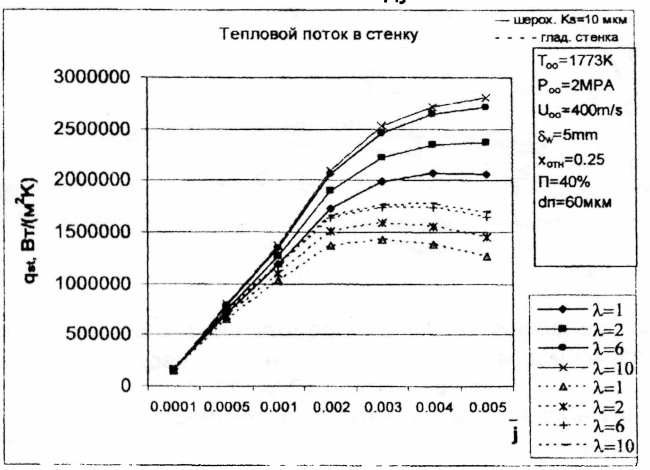

Рис. 11. Тепловой поток в пористую стенку толщиной 5 мм в сечении $\bar{X}$=0.25, в зависимости от интенсивности вдува

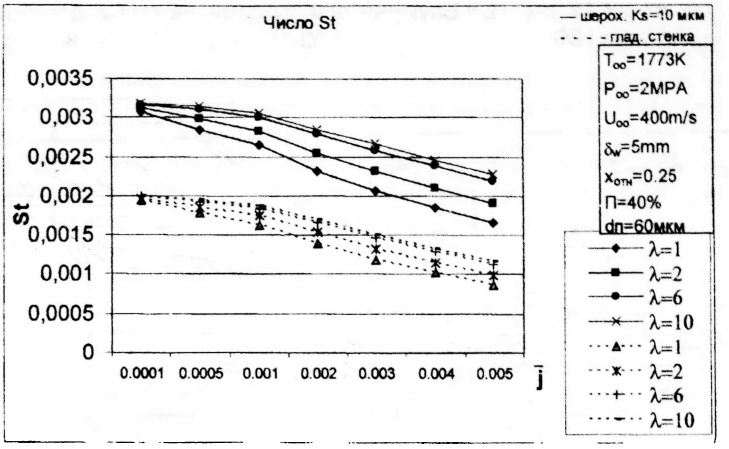

Рис. 12. Число St на наружной поверхности пористой стенки толщиной 5 мм в сечении $\overline{X}$=0.25, в зависимости от интенсивности вдува

Анализ результатов зависимости разности температуры на поверхности пористой стенки от теплового параметра вдува подтверждает вывод сделанный ранее в исследованиях ИТ СО РАН и кафедры Э-3 МГТУ им. Н.Э. Баумана: максимальная разность температур на наружной поверхности и тепловой поток в пористые стенки соответствуют определенному значению b_T в интервале ~1-1,5 (рис. 13).

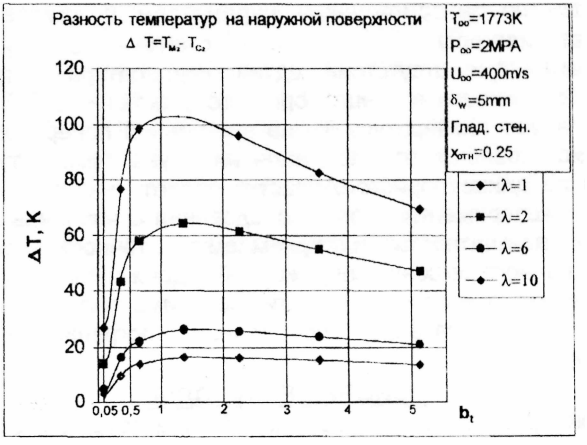

Рис. 13. Разность температуры на наружной поверхности для гладкой пористой стенки толщиной 5 мм в сечении $\overline{X}$=0.25, в зависимости от теплового параметра вдува

В <u>четвертой главе</u> приведены описание экспериментальной установки (рис. 14), экспериментальной модели, свойства керамических материалов, и основные результаты экспериментальных исследований, выполненных на

кафедре Э3 МГТУ им. Н.Э.Баумана при участии автора в соответствии с госбюджетными НИР по грантам РФФИ 00-15-99074 и 96-15-98143 (рис. 15).

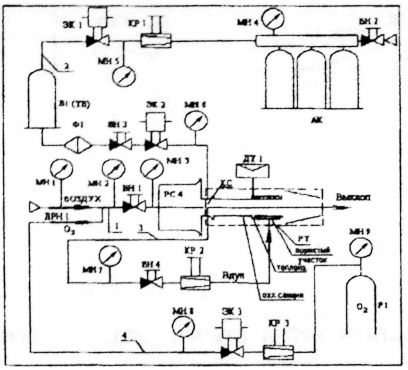

Рис. 14. Пневмогидравлическая схема экспериментального стенда

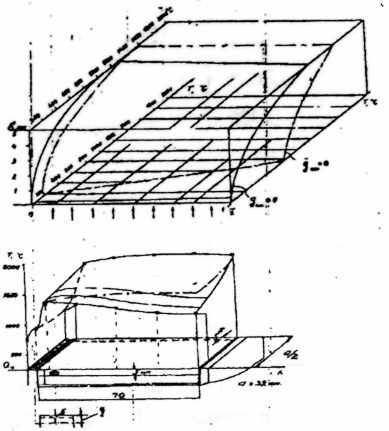

Рис. 15. Распределение температуры по поверхности и по толщине каркаса и охладителя

Эксперимент (рис. 15) проведен при температуре газа в ядре потока – 1923 К, скорости газа – 550 м/с, удельном расходе охладителя – 0.2 кг/(м^2·с), давлении газа по заторможенным параметрам в камере сгорания – 0.20 МПа, материал исследуемой пористой стенки – $TiC+TiB_2$ (δ=5мм, l=70 мм, a=32 мм). При отсутствии вдува температура матрицы T_M на внутренней поверхности в конце пористого участка ~700 К выше, чем в начале. При вдуве температура T_M на внутренней поверхности примерно постоянна. Установлено, что при наличии вдува температура наружной поверхности по длине пористого участка падает на ~100 К. Сравнение результатов экспериментального исследования с численными расчетами подтвердило адекватность и приемлемую точность разработанной методики численного решения сопряженной задачи.

Приведенная оценка погрешности экспериментального исследования показывает, что значение предельной погрешности измерения температуры: $\Delta t_K = \pm 14^\circ C$.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ:

1. Обоснована физическая модель, разработана математическая модель и программа численного моделирования сопряженного теплообмена и трения при турбулентных течениях на секционированных стенках с пористыми участками вдува охладителя в пограничный слой, позволяющая анализировать тепловое состояние стенок при учете интенсивности вдува, теплофизических свойств материалов секций, шероховатости поверхности, градиентности течения, краевых условий.
2. Показано, что при секционированном вдуве охладителя в пограничный

слой распределение критерия Стэнтона, локального коэффициента трения и температуры в секционированной стенке немонотонны и зависят от интенсивности вдува, свойств материалов секций, наличия или отсутствия теплоизоляции между секциями стенки, внутреннего охлаждения и ряда других факторов.

3. Установлено, что максимальная разность температур матрицы и охладителя на внешней поверхности пористой стенки и максимальный тепловой поток в пористую стенку соответствует параметру вдува b_T=1 ÷ 1.5.
4. Проанализировано влияние отсутствия теплоизоляции между секциями стенки, которое приводит к изменению распределения критерия Стэнтона, тепловых потоков и выравниванию температуры по длине и толщине секций стенки, изменению фактора неизотермичности по длине стенки, а также повышению температуры поверхности стенки и уменьшению разности температуры матрицы и охладителя.
5. Показано, что в ускоренных течениях в сравнении с $U_\infty = const$ меняется характер изменения температуры стенки каждой секции и тепловое состояние стенок.
6. Экспериментально подтвержден характер распределения температуры по толщине пористой стенки при изменении теплопроводности матрицы и толщины стенки. Корректность разработанной методики расчета сопряженного тепломассообмена для секционированной стенки с пористым участком и вдувом охладителя в пограничный слой подтверждена экспериментом.
7. Установлено, что учет комплексного влияния шероховатости при интенсивности вдува $\bar{j}$ >0.001 приводит к увеличению на ~ $70 \div 90$ % для St и на ~ $20 \div 60$ % для теплового потока в пористую секцию.
8. Показано преимущество применения секционированного вдува с использованием высокотемпературных пористых материалов, обеспечивающего повышение КПД энергетических ГТУ при температуре газа перед турбиной $T^*_Г$ =1385 - 1417К и π_k=14 - 18 на 1.3 – 1.5% абс. из-за снижения расхода воздуха на охлаждение проточной части ГТУ в 1.5-3 раза по сравнению с существующими системами конвективно-пленочного охлаждения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Осипов М.И., Гущин А.В., Чиненова И.В. Теоретическое и экспериментальное исследование теплообмена в высокотемпературной пористой керамике элементов ГТУ // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: Сборник докладов 10-ой Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 150-летию Н.Е. Жуковского – М., 1996. – С. 91 – 92.
2. Осипов М.И., Гущин А.В., Дадонова Р.Н. Сопряженный тепло и массообмен в пористой стенке со вдувом охладителя // Сборник трудов 2-ой Российской национальной конференции по теплообмену - М., 1998. – Т.2. – С. 200 –207.
3. Osipov M.I., Gushchin A.V. The conjugate problem of heat and mass transfer in a porous media section with blowing of coolant // Proc. of Int. Conference on Heat Exchangers for Sustainable Development. - Lisbon (Portugal), 1998. – V.1. – P. 497 – 504.
4. Osipov M.I., Gushchin A.V. The investigation of conjugate heat and mass transfer on a wall with porous section // Millenium Int. Symposium on Thermal and Fluid Sciences (Thermal & Fluid 2000). - Beijing (China), 2000. – V.1. – P. 86.
5. Осипов М.И., Гущин А.В. Сопряженный теплообмен на стенке с поперечным и тангециальным секционированным вдувом // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели: Сборник тезисов докладов 11-ой Всероссийской научно-технической конференции. – М., 2000. – С. 60.

У1708748

Гущин А.В.
Моделирование сопряженного теплообмена в проточных частях газотурбинных установок с...
2005 0-00

У 1708748

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ

обозначенного здесь срока

Отпечатано в ООО «Компания Спутник+»
ПД № 1-00007 от 25.06.2000 г.
Подписано в печать 13.01.2005
Тираж 100 экз. Усл. печ. л. 1

Печать авторефератов 730-47-74, 778-45-60