

Щучкин Вячеслав Всеволодович

**КОНВЕКТИВНО-ПЛЁНОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ В
СВЕРХЗВУКОВОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ ПОТОКЕ,
ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ СОПРЯЖЁННОЙ ЗАДАЧИ**

01.04.14 - Теплофизика и теоретические основы теплотехники

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва - 2005

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом Университете имени Н.Э.Баумана на кафедре «Газотурбинные и нетрадиционные энергоустановки», часть расчётных работ выполнена на базе аэрокосмического факультета Университета Флориды (UF) США в рамках программы президента РФ для учебы за рубежом.

Научный руководитель:

заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, к.т.н., профессор Осипов М.И.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Сухов А.В.
кандидат технических наук, Ермолаев И.К.

Ведущая организация:

Объединённый институт высоких температур РАН

Защита состоится "14" декабря 2005 года в "14" часов на заседании диссертационного совета Д.212.141.08 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская наб., д.1, корпус факультета "Энергомашиностроение", ауд. 6113

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

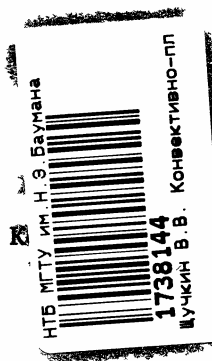
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просьба посылать по адресу: 107005, Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Ученому секретарю диссертационного совета Д.212.141.08.

Автореферат разослан "9" декабря 2005 года

Ученый секретарь

диссертационного совета,

к.т.н., доцент



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка и создание перспективных энергетических установок и двигателей, развитие ядерной энергетики, плазменных энергетических и химических технологий неразрывно связано с повышением уровня температур рабочих процессов, что ставит задачу усовершенствования и создания новых систем тепловой защиты проточных частей от высокотемпературного и химического воздействий рабочих сред. Среди существующих методов необходимо выделить завесное охлаждение с локальным вдувом охладителя через перфорацию, секционированные пористые участки и тангенциальные щели, а также комбинированную газовую завесу, создаваемую внутренним охлаждением с использованием пористой матрицы и тангенциального вдува через пористую ступеньку. Указанные методы тепловой защиты нашли широкое применение в камерах сгорания, лопатках газовых турбин, соплах ракетных двигателей, МГД генераторах, могут применяться для защиты поверхностей возвращаемых космических аппаратов и в высокотемпературных технологических процессах. Преимущества газовых завес наиболее ярко проявляются на транзвуковых, сверхзвуковых и гиперзвуковых режимах течения, обеспечивая эффективное охлаждение при уменьшении локального коэффициента трения и наименьших потерях при смешении с основным потоком.

Повышение эффективности при комбинации внутреннего и завесного охлаждения стенок, предложенное на кафедре Э-3 МГТУ им. Н.Э.Баумана Осиповым М.И., состоит в секционированном расположении пористых секций с непроницаемой границей со стороны основного потока и вдувом охладителя в основной поток через тангенциальный проницаемый уступ. Мелкий масштаб вихрей и струйная природа течения при «пористом вдуве» снижают турбулентность и затрудняют процесс смешения и разрушения завесы. Эффективность охлаждения также растёт за счёт повышения скорости, формируемой тангенциальным «пористым вдувом» газовой завесы, благодаря передачи теплоты от основного потока через непроницаемое покрытие к пористым вставкам и охладителю. Несмотря на ряд исследований в этом направлении, разработка расчётной методики сопряжённого определения эффективности завесы и теплового состояния стенок конструкции при использовании рассматриваемой системы охлаждения представляет научный и практический интерес. В известных работах недостаточно внимания уделено рассмотрению сопряжённого теплообмена. В диссертационной работе ставится задача численного моделирования процессов локального теплообмена и газовой динамики в сопряжённой постановке при сверхзвуковом течении с дозвуковыми газовыми завесами и верификацией результатов расчёта по данным эксперимента, проведённого на кафедре Э-3 МГТУ им. Н.Э.Баумана.

Цель работы: разработка физической и математической модели сопряжённого расчёта течения и теплообмена в сверхзвуковом высокотемпературном потоке с тангенциальными газовыми завесами при внутреннем пористом охлаждении стенок с учётом изменяемых теплофизических свойств газов и материалов.

Исходя из поставленной цели определены следующие задачи численного исследования комбинированной системы тепловой защиты:

МГТУ

ИМ. Н. Э. БАУМАНА

1

БИБЛИОТЕКА

- анализ и расчётная оценка применимости перспективных моделей турбулентности к расчёту пристенного течения и теплообмена в условия поставленной задачи конвективно-плёночного охлаждения в сопряжённой постановке;

- разработка программы расчёта пространственного течения с учётом теплообмена в пористых средах в сопряжённой постановке при использовании двухтемпературной модели и известных критериальных законов;

Научная новизна работы:

- разработана физико-математическая модель и дополнительные подпрограммы расчёта сопряжённого теплообмена в каналах с комбинированной системой тепловой защиты, сочетающей газовую завесу и внутреннее пористое охлаждения стенок;

- исследована модифицированная версия модели турбулентности $k-\epsilon$, учитывающая неравновесность процессов генерации и диссипации турбулентной кинетической энергии и обеспечивающая хорошее соответствие расчётных и экспериментальных распределений температур на стенке с газовой завесой в сопряжённой постановке;

- показан характер изменения структуры пристенного течения при различной интенсивности вдува охладителя, распределение эффективности газовой завесы на охлаждаемой и неохлаждаемой стенках в сопряжённой постановке, распределения коэффициента трения и числа Стантона на секциях стенки с внутренним пористым охлаждением и тангенциальной газовой завесой;

- проведено сравнение решения поставленной задачи с адиабатическими граничными условиями на неохлаждаемой стенке и показаны преимущества сопряжённого подхода;

- получены двумерные поля распределений динамических характеристик течения и теплообмена в пористых матрицах секционированной стенки канала в сопряжённой постановке;

Практическая ценность работы состоит в том, что

- разработанная методика позволяет рассчитывать комбинированные системы конвективно-плёночного охлаждения, включающие завесное и внутреннее пористое охлаждение стенок для различных случаев практического применения;

- математическая модель позволяет учесть геометрию охлаждаемых элементов, теплофизические свойства материалов, толщины термобарьерных покрытий, состав газовой смеси и оценить влияние расхода охладителя на эффективность охлаждения и тепловое состояние стенок;

- даны рекомендации по области применимости стандартной, двухслойной и неравновесной модификаций модели турбулентности $k-\epsilon$ в расчётах эффективности плёночного охлаждения в сопряжённой постановке;

Достоверность результатов подтверждается применением в расчётных исследованиях фундаментальных законов гидродинамики и теплообмена, анализом большого массива известных работ по данной тематике, а также сопоставлением результатов расчёта с имеющимися экспериментальными данными, полученными в ходе экспериментов, проведённых в лаборатории кафедры Э-3 МГТУ им. Н.Э.Баумана и позволяющих верифицировать расчётную методику.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- физико-математическая модель расчёта сопряжённой задачи конвективно-плёночного охлаждения при сверхзвуковом течении в канале с внутренним пористым охлаждением стенок и тангенциальным пористым вдувом, с учётом зависимости теплофизических свойств газов и материалов от температуры;

- результаты анализа применимости различных моделей турбулентности и способов расчёта краевых условий на секционированной стенке с завесным и внутренним пористым охлаждением;

- анализ структуры пристенного течения и эффективности газовой завесы на секциях стенки с внутренним пористым охлаждением и тангенциальной газовой завесой при различной интенсивности вдува охладителя;

Апробация работы. Основные положения работы были доложены на Второй российской конференции по теплообмену (1998, Москва), XII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (1999, Москва), научной конференции «Студенческая весна - 99» (1999, Москва), Международной конференции стран СНГ «Молодые ученые - науке, технологиям и профессиональному образованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения» (1999, Москва), на 2-м и на 3-м совещаниях по Магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях в ИВТ РАН (2000-2001, Москва), на семинаре группы газодинамических и тепловых расчётов Аэрокосмического факультета Университета Флориды (2001, США), на научно-техническом семинаре кафедры Э-3 МГТУ им Н.Э.Баумана (2001, Москва), на XII Всероссийской межвузовской научно-технической конференции «Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели» (2004, Москва). Работа заслушана и одобрена на заседании кафедры Э-3 МГТУ им Н.Э.Баумана от 9 Марта 2005 г. Работа выполнена в соответствии с грантом РФФИ №02-02-17454 и темой №00-15-99074.

Публикации. По теме диссертации имеется 8 работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, общего заключения и списка литературы. Работа включает 164 страницы, из них 90 страниц печатного текста, 91 рисунок, 8 таблиц и список литературы из 221 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана новизна и актуальность решаемой проблемы, её практическая значимость, кратко изложены основные результаты исследования.

В первой главе дан анализ состояния проблемы, представлены результаты экспериментальных и расчётно-теоретических исследований газодинамики и теплообмена при газовых завесах, приведён краткий обзор наиболее известных работ по теплообмену и потерям давления в пористых средах, рассмотрены известные работы по решению сопряжённых задач течения и теплообмена с твёрдыми стенками.

Впервые исследование газовой завесы проведено в 1946 году Wieghardt и несколько позже Scesa, Seban, Chin. Исследования газовых завес в конце 1960-х отражены в работах Hartnett J.P., Eckert E.R., Birkebak R.C., Papell, Back L.H., Skirvin S.C., Hayes L.E., Burggraf F., Crawford M.E., из отечественных исследова-

ний необходимо выделить работы Кутателадзе С.С., Леонтьева А.И., Волчкова Э.П., Швайковского Ю.В., Лебедева А.В., Левченко В.Я., Жесткова Б.А., Глазкова В.В., Гусевой М.Д., Репухова В.М.. Рассмотрение физической картины течения при завесном охлаждении показывает, что на границе раздела основного и вторичного потоков формируется область смешения, растущая вниз по течению и постепенно разрушающая газовую завесу. В конце 1970-х и на протяжении 1980-х годов исследования концентрировались на изучении конвективно-плёночного охлаждения в сверхзвуковых и гиперзвуковых потоках, что отражено в работах Schetz J.A., Kenworthy M., Goldstein R.J., Gilreath H.E., Zakkay V., Wang C.R., Holden M.S., Леонтьева А.И., Волчкова Э.П., Лебедева В.А., Осипова М.И., Поляева В.М., Губертова А.Н., показавших значительно более высокую эффективность газовой завесы в сверхзвуковых потоках по сравнению с дозвуковыми.

В последние два десятилетия в зарубежных работах Aupoix B., Kassimatis P.G., Alvares J., Kenichi Takita и Goro Masuya, Kanda T., Lam C.K.J. и Bremhorst K., O'Connor и Haji-Sheikh, и отечественных исследованиях Лушника В.Г., Якубенко А.Е., Секундова А.Н., Исаева С.А. показаны возможности численных подходов при анализе течения и теплообмена в газовых завесах. В результате численных исследований показано, что скорость роста слоя смешения завышается в расчётах с использованием модельных подходов $k-w$ и $k-\epsilon$ в одинаковой степени. Поправки на сжимаемость снижают скорость роста слоя смешения, но не приводят к удовлетворительному результату при расчёте температуры газовой завесы. Результаты расчёта с использованием четырёхпараметрической модификации модели турбулентности $k-\epsilon$ So R.M.C., также показали её неспособность адекватно отражать картину изменения турбулентного числа Прандтля в слое смешения. В непосредственной близости от щели ни одна из существующих моделей замыкания, оперирующих осреднёнными параметрами турбулентности, не позволила достоверно описать начало процесса смешения потоков. Обобщая результаты, можно сделать вывод: необходима дальнейшая работа по разработке и верификации численных моделей на базе модели $k-\epsilon$ для расчёта смешения и теплообмена в газовых завесах.

Исследования внутреннего теплообмена при пористом охлаждении, представленные в работах Белова С.В., Майорова В.А., Поляева В.М., Галицейского Б.М., Страдомского М.В., Пелевина Ф.В., Галицейского Б.М., Полежаева Ю.В., Сухова А.В., Щукина В.К., Ерошенко В.М., Яскина Л.А., Тимофеева В.Н., Семёнова Г.А., Дьяконова Г.К., Дружинина С.А., Харченко В.Н., Бойко А.Н., Grootenhuis P., Bayley F.J., Turner A.B. и др. показывают, что на интенсивность внутреннего теплообмена помимо структуры образца, типа охладителя и материала, оказывает влияние геометрия пористого тела и пространственный характер течения в нём. Установлено, что интенсивность теплообмена изменяется в объёме пористого тела и зависит от пространственной природы процесса. Исследования не позволили выработать чёткой физической модели теплообмена в пористом теле, однако, из сопоставления экспериментальных данных очевидно, что большинство эмпирических законов теплообмена имеет близкую форму:

$$Nu_{\gamma} = A \left(Re_{\beta l \alpha} \cdot Pr \right)^n = A \cdot Pe^n, \quad (1)$$

Показатель степени при числе Пекле, в известных работах, принимает значения от 0.65 до 1.84. При анализе динамической картины течения и потерь давления в пористом теле, большинство авторов приходят к заключению о том, что общая форма выражений, предложенных Darcy H. и развитых Forchheimer P. и Ergun S., удовлетворительно описывают экспериментальные данные и могут быть использованы в расчётах потерь давления в пористых керамических и металлических материалах с характерным размером частиц 50 микрон.

Важность сопряжённого рассмотрения задачи газовой динамики и теплообмена показана в работах Никитенко Н.И., Лыкова А.В., Аккуратова Ю.Н., Купцовой В.С., Леонтьева А.И., Полякова А.Ф., Осипова М.И., описывающих особенности физико-математического моделирования процессов сопряжённого теплообмена в потоке и материале при тепловой изоляции и наличии систем внутреннего конвективного охлаждения стенок. Численные исследования в этом направлении, начатые в 1990-х Durst F., Fotiadis D.I., Wilson K.S., Bohn D. и Bonhoff B., Papanicolaou E., Kusterer K., Montomoli F., подтвердили существенное влияние сопряжённого рассмотрения задачи на интенсивность теплообмена между газовым потоком и стенкой. Сопряжённое рассмотрение задачи также вносит весомые коррективы и в результаты расчёта эффективности газовой завесы и теплового состояния стенки. В связи с этим, рассматриваемая в диссертационной работе задача теплообмена и трения в течении с конвективно-плёночным охлаждением стенок требует решения в сопряжённой постановке.



Рис.1. Схематический вид экспериментального канала.

Во второй главе развита задача разработки уточнённой модели сопряжённого расчёта течения и конвективного теплообмена при сверхзвуковом высокотемпературном течении продуктов сгорания в канале с тангенциальным вдувом газовых завес и внутренним охлаждением стенок. Рассматриваемая схема охлаждения представляет собой комбинированный метод тепловой защиты: плёночное охлаждение поверхности стенок дополняется пористым внутренним охлаждением секционированных элементов канала (рис.1). Пористые вставки заключены в непроницаемые матрицы, имеют непроницаемое покрытие на границе с основным потоком, которое воспринимает не только конвективную, но и лучистую составляющие теплового потока. За счёт вертикального сдвига секций относительно друг друга на торцевых поверхностях пористых вставок формируются проницаемые ступеньки или «пористые щели», через которые

осуществляется вдув газовых завес. При прохождении охладителя в теле пористых матриц снимаемый тепловой поток частично преобразуется в кинетическую энергию и реализуется в виде импульса вдуваемых через пористые ступеньки газовых завес.

Течение газа описывается системой дифференциальных уравнений неразрывности, уравнений движения Навье-Стокса и энергии. Учёт турбулентности требует введения дополнительных пульсационных составляющих физических величин, характеристикой которых служит средняя на единицу объёма энергия турбулентных пульсаций k (ТКЭ). Из многочисленных подходов к расчёту ТКЭ потока в инженерных расчётах активно используются различные модификации двухпараметрической модели турбулентности k - ϵ , три из которых рассматриваются в данной работе: I. -стандартная версия модели турбулентности k - ϵ :

$$\frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P - \rho \epsilon \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (3)$$

$$P = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \cdot \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (4)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (5)$$

II. -неравновесная модификация стандартной модели, с модифицированным членом продукции в уравнении диссипации (3):

$$\frac{\partial(\rho u_j \epsilon)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \left[C_{\epsilon 1} \frac{P}{\rho \epsilon} \right] \times \frac{\epsilon}{k} P - C_{\epsilon 2} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (6)$$

и III. -двухслойный вариант модели k - ϵ , состоящей из тех же модельных уравнений (2) и (3) в ядре потока, но позволяющей отказаться от использования пристенных функций и вести расчёт пограничного слоя при помощи однопараметрической модели турбулентности Норриса и Рейнольдса, в которой k рассчитывается по уравнению (2), а ϵ определяется в виде:

$$\epsilon = \frac{k^{3/2}}{l} C = \frac{k^{3/2}}{l_\epsilon}; \quad l_\epsilon = \frac{C_l y}{1 + 5.3 / \text{Re}_y}; \quad \text{Re}_y = \frac{k^{1/2} y \cdot \rho}{\mu} \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho \cdot C_\mu \cdot k^{1/2} \cdot l_\mu; \quad l_\mu = C_l y \cdot f_\mu; \quad f_\mu = \left(1 - \exp \left(- \frac{\text{Re}_y}{A_y} \frac{25}{A^+} \right) \right) \quad (8)$$

Сопряжение моделей выполняется в динамическом режиме на внешней границе переходной зоны пограничного слоя при выполнении условия равенства значений турбулентной вязкости, рассчитанных по (2),(3),(4),(5) и (7),(8).

Применение неравновесной модификации модели турбулентности k - ϵ обосновано недостаточной эффективностью известных поправок для учёта сжимаемости и результатами работ Shyy W., Thakur S.S., Driver D.M., Seegmiller H.J., Thivet F., Knight D.D., Wilcox D.C., - свидетельствующими о нарушении равнове-

сия между процессами генерации и диссипации турбулентных вихрей в зонах обратных токов и слоях смешения, характер турбулентности в которых отличается от равновесного пограничного слоя как на дозвуковых (Лебедев А.В. и Швайковский Ю.В.), так и на сверхзвуковых режимах течения (Schetz J.A.). Неравновесные эффекты также проявляются в скачках уплотнения и волнах характеристик сверхзвуковых течений. Использование стандартной модели k - ϵ в этих условиях не обосновано и не позволяет воспроизвести физический механизм процессов генерации и переноса ТКЭ, следствием чего являются завышенные потери трения и тепловые потоки (Thivet F., Knight D.D.).

Двухслойная модель турбулентности k - ϵ выбрана с целью повышения точности расчёта процессов переноса в пристенной зоне пограничного слоя. В отличие от стандартной модели турбулентности k - ϵ , где первый расчётный узел располагают вне вязкой и переходной зон пограничного слоя ($y^+ > 30$), двухслойная модель k - ϵ позволяет вести расчёт вязкой области пограничного слоя. Это особенно важно в околошелевой зоне газовой завесы, так как, во многих практических случаях из-за влияния разнообразных возмущающих факторов происходит отклонение профиля скорости от закона стенки, описываемого пристенными функциями. В сравнении с двухслойной моделью модель турбулентности k - ϵ для низких чисел Рейнольдса чувствительна к сеточному разбиению из-за необходимости расчёта существенного пристенного градиента ϵ и неудовлетворительно описывает поведение пограничного слоя с обратным градиентом давления (Rodi W. и Scheuerer G., Fujisawa L.H., Samuel A.E. и Joubert P.M., Гарбачук А.В. и Лапин Ю.В.). Однопараметрическая модель k - l Норриса и Рейнольдса, со стандартным распределением длины пути смешения l вблизи стенки, позволяет получить хорошее совпадение с экспериментом для этого случая. В рамках двухслойного подхода k - ϵ модель Норриса и Рейнольдса может применяться локально, обладает умеренными требованиями к сеточному разбиению и является более предпочтительной для решения поставленной задачи сопряженного теплообмена.

Расчёт течения в пористой матрице выполнен в двухмерной постановке с использованием модифицированного уравнения Дарси,

$$-\frac{dP}{dx} = \alpha \mu u + \beta \rho u^2; -\frac{dP}{dy} = \alpha \mu v + \beta \rho v^2; \quad (9)$$

где вязкостный и инерционный коэффициенты α и β рассчитываются в соответствии с подходом Эргуна:

$$\alpha = \frac{150(1 - \epsilon_p)^2}{\epsilon_p^3 d_p^2}; \quad \beta = \frac{1.75(1 - \epsilon_p)}{\epsilon_p^3 d_p}; \quad (10)$$

Расчёт теплообмена внутри пористых матриц производится совместным решением уравнений энергии охладителя и теплопроводности материала каркаса:

$$c_p \left[u \frac{\partial}{\partial x} (\rho_f T_f) + v \frac{\partial}{\partial y} (\rho_f T_f) \right] = \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_f \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) \right] + \alpha_v(x, y) \cdot (T_w(x, y) - T_f(x, y)) \quad (11)$$

$$\left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial y} \right) \right] = \alpha_v(x, y) \cdot (T_f(x, y) - T_w(x, y)), \quad (12)$$

$$\text{где } \alpha_v(x, y) = Nu_v(x, y) \cdot \lambda_f / (\beta / \alpha)^2 \quad (13)$$

Составляющие скорости фильтрации в уравнении (11) определяются из решения модифицированных уравнений Дарси (9). Расчёт объёмного коэффициента теплоотдачи α_v (13) ведётся с использованием зависимостей для объёмного числа Нуссельта Nu_v :

$$Nu_v(x, y) = ((\beta / \alpha)(1 - \varepsilon_p) / 0.00115)^{1.33} Re_{\beta/\alpha}(x, y)^{0.65} \quad (14)$$

$$Nu_v(x, y) = 0.005 Re_{\beta/\alpha}(x, y) \cdot Pr \quad (15)$$

$$Nu_v(x, y) = 0.0286 Re_{\beta/\alpha}(x, y)^{1.84} \quad (16)$$

Значение числа Рейнольдса рассчитывалось по локальным значениям плотности, скорости и вязкости:

$$Re_{\beta/\alpha}(x, y) = \rho(x, y) \cdot \bar{u}(x, y) \cdot (\beta / \alpha) / \mu(T), \quad (17)$$

$$\text{где } \bar{u}(x, y) = \sqrt{u(x, y)^2 + v(x, y)^2} / \varepsilon_p; \quad (18)$$

В третьей главе описана процедура решения и представлены результаты расчёта сопряжённой задачи течения и теплообмена в канале с газовыми завесами и внутренним охлаждением стенок с учётом изменяемых теплофизических свойств газов и материалов. Решение задачи выполнено поэтапно. На I-м этапе выполнен расчёт течения в канале с газовыми завесами при задании на всех твёрдых границах расчётной области адиабатических граничных условий. Несопряжённая постановка задачи позволила оценить основные характеристики сверхзвукового течения с газовыми завесами и сравнить их с результатами сопряжённого расчёта. На основе расчёта основного потока (рис.2), сделан вывод: полученное решение соответствует современным физическим представлениям о течениях такого рода.

Более подробный анализ течения в области вдува газовых завес при $m_1=0.07$ и $m_2=0.2$ (рис.3 а,б) показывает разрушение газовой завесы за первой «пористой щелью» ($s_1=2.6$ мм) в образующейся зоне обратных токов (рис.3 а), что приводит к существенному утолщению пограничного слоя над второй пористой ступенькой ($s_2=1.3$ мм), за которой наблюдается безотрывное течение газовой завесы (рис.3 б). Статическое давление в прилегающей ко второй ступеньке зоне постоянно, что согласуется с наблюдениями других исследователей (Sebeci T., Bradshaw P.). Из распределения статического давления (рис.2) установлено, что в сечениях пористых ступенек расчётные значения давления ниже экспериментальных. Подобные рассогласования при использовании стандартной модели турбулентности k - ε уже отмечалось ранее в работах Shyy W. Kassimatis P.G., Alvares J., Желтоводова А.А., Максимова А.И. и др. и являются следствием завышенных значений длины пути смешения и ТКЭ в зонах косых скачков и слоях смешения газовых завес из-за доминирования продукции над диссипацией, что приводит к завышению значений турбулентной вязкости.

Использование неравновесной модификации модели турбулентности k - ε (6) позволяет скорректировать расчёт турбулентной вязкости, более низкие зна-

чения которой приводят к сносу вниз по течению и удлинению зоны рециркуляции за первой (рис.3 в) и выравниванию картины линий тока за второй (рис.3 г) «пористыми щелями». Использование неравновесной модификации модели турбулентности $k-\epsilon$ (6) позволяет добиться лучшего соответствия эксперименту значений статического давления в сечениях пористых ступенек.



Рис. 2. Результаты расчёта основного потока, контуры давления при $m_1 = (\rho u)_{slot1} / (\rho u)_{main} = 0.07$; $m_2 = (\rho u)_{slot2} / (\rho u)_{main} = 0.20$.

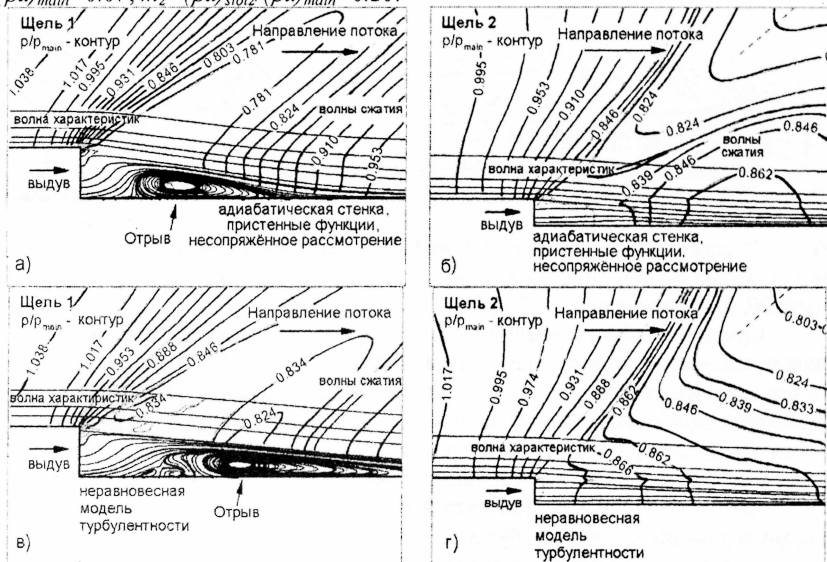


Рис. 3. Сравнение распределений давления и линий тока в области пористых ступенек при несопряжённом расчёте со стандартной (а,б) и неравновесной (в,г) моделями $k-\epsilon$ с использованием пристенных функций ($m_1 = 0.07$ и $m_2 = 0.20$).

По сравнению со стандартной моделью $k-\epsilon$ (рис.3 а,б), двухслойная модификация модели турбулентности $k-\epsilon$ не использует пристенных функций для замыкания на стенках и позволяет получить более детальную картину течения в областях за первой и второй пористыми ступеньками (рис.4 а,б) благодаря расчёту вязкого взаимодействия в пристенной зоне пограничного слоя при помощи однопараметрической модели турбулентности $k-l$ Норриса и Рейнольдса. Срав-

нение результатов, при адиабатических граничных условиях на стенках (не представленных на рисунках для двухслойной модели) и в сопряжённой постановке (рис. 4 а,б) показали незначительное влияние неизотермичности на структуру линий тока в околощелевых зонах. В ходе тестовых расчётов установлено, что отрыва потока удастся избежать при увеличении интенсивности вдува через первую ступеньку с $m_1=0.07$ до $m_1=0.28$ (рис.4 в,г).

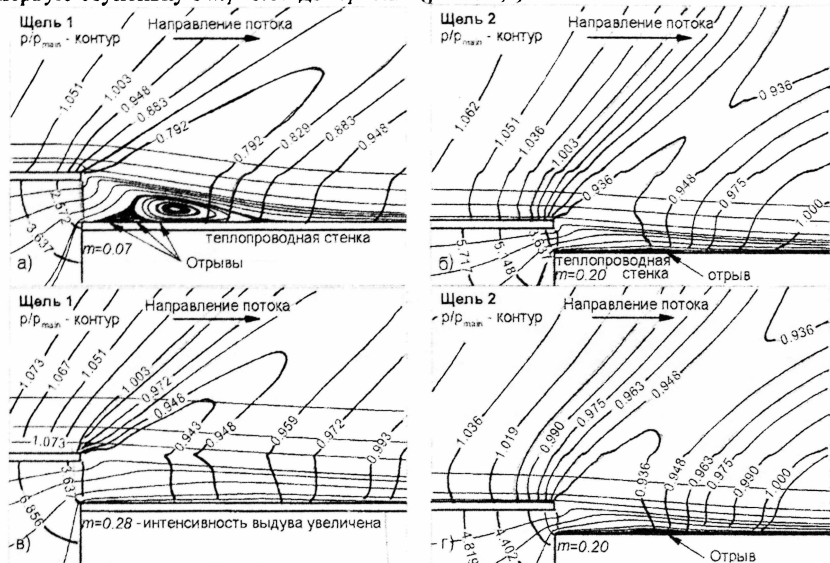


Рис. 4. Распределение давления и линий тока в сопряжённом расчёте с двухслойной моделью $k-\epsilon$ без пристенных функций: (а,б) -ступеньки 1 и 2 при $m_1=0.07$ и $m_2=0.20$, (в,г) -ступеньки 1 и 2 при $m_1=0.28$ и $m_2=0.20$.

Сравнение распределений адиабатической температуры на поверхности неохлаждаемой секции стенки с газовой завесой (см. рис.1) показывают (рис.5 а), что классическая, двухслойная и неравновесная модели турбулентности $k-\epsilon$ в несопряжённой постановке не воспроизводят характер распределения экспериментальной температуры: уровень температур занижен в области вдува газовой завесы и завышен ниже по течению потока. Данные расхождения уже отмечались в работах Murray S.B., Lefebvre A.H.. Расчётами показано, что неравновесная модификация модели турбулентности $k-\epsilon$ в несопряжённой постановке приводит к наиболее значительному рассогласованию температуры ($T_{ст}$) с экспериментом, занижая значения $T_{ст}$ на большом расстоянии от сечения вдува второй газовой завесы.

Сопряжённое рассмотрение поставленной в диссертационной работе задачи позволяет получить наиболее корректную картину физического процесса. Результаты сопряжённых расчётов (рис.5 а) свидетельствуют о том, что основной причиной завышенной эффективности плёночного охлаждения в околощелевой зоне неохлаждаемой секции при несопряжённом рассмотрении задачи является пренебрежение кондуктивным теплообменом в стенке. В сопряжённой

постановке неравновесной модификации модели k - ϵ соответствует наименьшее расхождение ΔT , составляющее 22°C , по сравнению с экспериментальными значениями температуры стенки, что значительно меньше чем $\Delta T=184^\circ\text{C}$ при использовании стандартной модели k - ϵ . Исходя из результатов численного исследования использование неравновесной модификации модели турбулентности k - ϵ лучше соответствует физической природе процесса. Сопрожатый расчёт течения и теплообмена в охлаждаемых секциях стенки (рис.5 а) показал, что законы теплообмена в пористых средах (14), (15) и (16) приводят к распределениям температуры идентичного профиля. Из анализа расчётных данных на рис.5 (а) следует, что лучший результат соответствует закону теплообмена (14), полученному экспериментально для образца наибольшей толщины 3.17 мм (10 мм в расчёте), с наиболее близким значением пористости в 60% (50% в расчёте) и в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\beta/\alpha}=0.01\div 5.0$, включающем расчётные значения $Re_{\beta/\alpha}=0.01\div 1.67$ (рис.6 а) в данной работе.

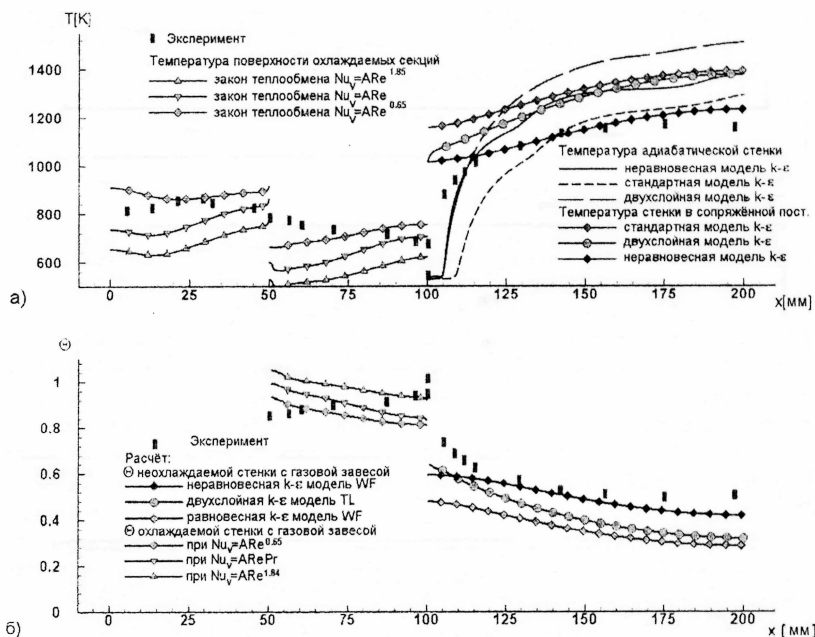


Рис. 5. Распределение температуры поверхности (а) и эффективность газовых завес (б) по длине секционированной стенки канала (см. рис.1).

Как видно из сравнения температуры и эффективности газовой завесы на рис.5 (а), расчётные и экспериментальные распределения на поверхности охлаждаемых секций при близких значениях тепловых потоков, определяемых средним значением $T_{ст}$, разнятся по характеру. Распределения расчётных параметров теплообмена в теле пористых матриц свидетельствуют о высоких значениях $Re_{\beta/\alpha}$, Nu_v и α_v (рис.6) в области подвода охладителя, что в сочетании с разницей температур между подводимым охладителем и пористым каркасом приводит к

Матрица 1

T_w - температура пористого каркаса [K]

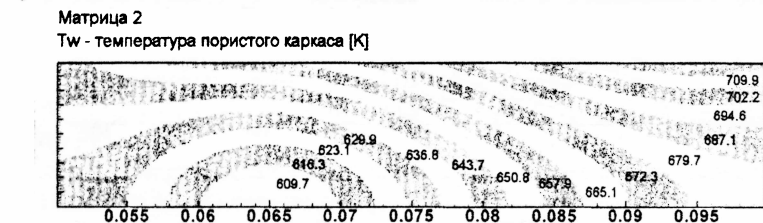
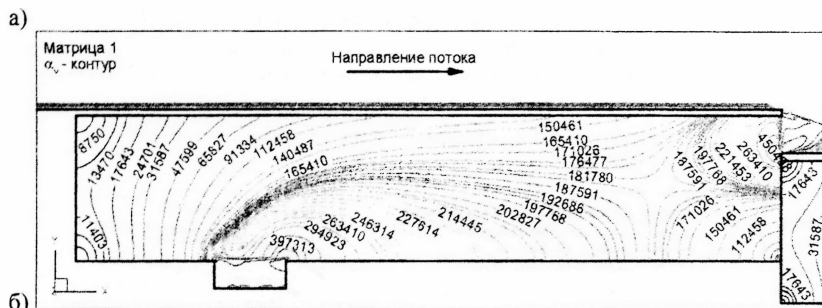
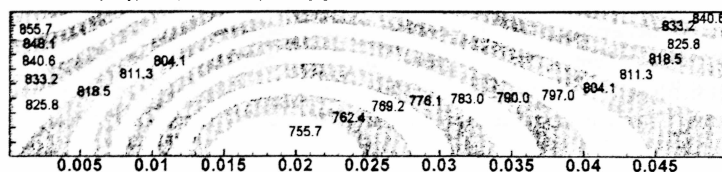


Рис. 6. Распределения температуры пористой стенки T_w (а,б) и объёмного коэффициента теплоотдачи α_v (в,г) по телу I-ой и II-й пористых матриц; Nu_v рассчитывался по уравнению (14), $G_{охл1}=0.0027$ кг/сек, $S_1=2.6$ мм, $G_{охл2}=0.004$ кг/сек, $S_2=1.3$ мм, ширина матрицы 70 мм, длина 40 мм, высота 10 мм.

интенсивному теплообмену в этой зоне. При расчёте внутреннего теплообмена с использованием критериальных законов (14), (15) и (16) в пористых матрицах, в окрестности пористых щелей кондуктивный теплообмен в кармаше преобладает над объёмным теплосъёмом, в результате чего максимум температуры стенки наблюдается на кромке пористых ступенек (рис.6). Анализ экспериментальных данных свидетельствуют об интенсивном теплообмене в области пористых щелей, вследствие чего экспериментальная температура на кромках пористых ступенек заметно ниже, чем в центральных областях пористых матриц (рис.7). Высокие значения α_v в области подвода охладителя обусловлены большими значениями плотности, влияющими на расчёт значений $Re_{\beta/\alpha}$. Установлено, что расчёт с фиксированным, средним по объёму пористых матриц значением плотности приводит к температурным распределениям аналогичного характера (рис.7), что свидетельствует о сохранении общей картины теплообменного процесса в теле пористых матриц при более чем 2-х кратном уменьшении α_v в области подвода.

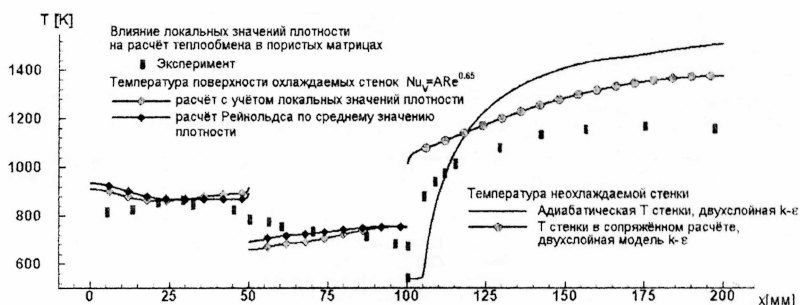


Рис. 7. Сравнение расчётных и экспериментальных распределений температуры на поверхности охлаждаемых секций при теплообмене в пористых матрицах с учётом локальных значений ρ и по среднему значению плотности охладителя.

Проведённые расчёты также показали, что учёт кондуктивного теплообмена и переменных теплофизических свойств материалов сказывается на температурном состоянии элементов секционированной стенки. Так, при теплопроводности материала $\lambda = 0.02 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$, температура неохлаждаемой секции в сопряжённом расчёте и расчёте при адиабатическом граничном условии на стенке совпадают, но при увеличении теплопроводности материала стенки до $\lambda(T) \approx 80 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ (что соответствует теплопроводности графита при рассматриваемом уровне температур) результаты сопряжённого расчёта сильно отличаются за счёт интенсивного кондуктивного переноса теплоты внутри секции (рис.5 а). При этом температура стенки вблизи сечения вдува газовой завесы более чем на 400 К превышает температуру вдуваемого газа и эффективность охлаждения θ уже нельзя считать равной единице. При пересчёте значений θ по стандартному методу в начальном сечении вдува для рассматриваемого случая $\theta = 0.6$ (рис.5 б). На участке стенки за сечением вдува температура стенки превышает температуру вдуваемого газа, что приводит к передаче теплоты от стенки к газовому потоку. На некотором расстоянии ниже по течению, по мере разрушения газовой завесы, теплота начинает передаваться от основного потока к стенке. Резкое изменение

числа St на поверхности теплоизолированной секции за сечением вдува ($x=120$ мм на рис.8 б) соответствует смене направления теплового потока: при $x<120$ мм теплота передаётся от более горячей стенки к более холодному вдуваемому газу, а при $x>120$ мм от газа к стенке. Таким образом, при сопряжённом рассмотрении задачи наблюдается процесс «рециркуляции» теплового потока в теплоизолированной секции, что оказывает существенное влияние на её результирующее тепловое состояние. Так как задача течения с газовыми завесами решается в сопряжении с двумя охлаждаемыми секциями нижней стенки канала, в работе учтено влияние внутреннего охлаждения на тепловую эффективность комбинированной системы тепловой защиты и результаты решения сопряжённой задачи в целом.

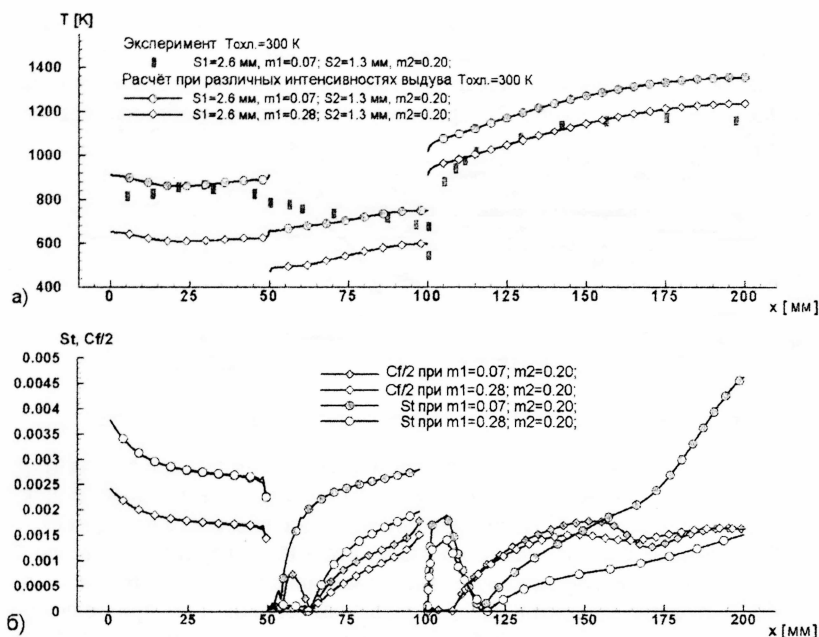


Рис. 8. а) Сравнение расчётных и экспериментальных распределений температуры, б) Сравнение числа Стантона и коэффициента поверхностного трения, на секционированной стенке при $m_1=0.07$, $m_1=0.28$ и $m_2=0.20$ (см. рис.4).

В результате численного анализа установлено, что лучшее согласование с экспериментальными данными при расчёте теплоизолированной секции стенки достигнуто с использованием неравновесной модификации модели турбулентности $k-\epsilon$, обеспечивающей разницу расчётной и экспериментальной температуры в 2% (22°C). Расчёт внутреннего теплообмена в пористых матрицах с использованием двухмерной модели пористого теплообмена позволил определить значения тепловых потоков в охлаждаемые секции с точностью 8% по сравнению с экспериментальными значениями тепловых потоков. По результатам анализа краевых условий на поверхности второй охлаждаемой матрицы с газовой завесой, при расчёте взаимодействия со стенкой, использовалась однопараметри-

ческая модель $k-l$ Норриса и Рейнольдса в рамках двухслойной модели $k-\epsilon$. Использование пристенных функций в условиях отрывного течения привело к трёхкратной ошибке при расчёте теплового потока в стенку. На поверхности первой охлаждаемой матрицы без газовой завесы и при безотрывном течении газовой завесы на теплоизолированной стенке использовались обычные пристенные функции стандартной модели турбулентности $k-\epsilon$. Расчёт потерь давления в пористых секциях при использовании модифицированного уравнения Дарси в форме Эргуна также показал хорошее согласование данных расчёта и эксперимента. Установлено, что сопряжённый расчёт распределения температуры на поверхности теплоизолированной и охлаждаемой секций обеспечивает согласование с экспериментом, вследствие учёта кондуктивного переноса тепла в стенке и зависимости теплофизических свойств материалов и газов от температуры. В результате анализа показано, что увеличение расхода охладителя через первую матрицу от $m_1=0.07$ до $m_1=0.28$, при постоянстве $m_2=0.20$, позволяет обеспечить безотрывный режим течения первой газовой завесы и избежать её разрушения в зоне отрыва (рис.4 а,в). Повышение интенсивности вдува до $m_1=0.28$ приводит к снижению более чем в два раза интенсивности косого скачка на первой ступеньке и уменьшению значений коэффициента поверхностного трения $C_f/2$ и числа Стантона St на стенках с газовыми завесами (рис.8 б). Интенсивность охлаждения всех трёх секций нижней стенки канала при этом возрастает (рис.8 а). Это позволяет сделать вывод: разработанная методика может быть эффективным инструментом инженерных расчётов при создании аналогичных систем тепловой защиты.

ВЫВОДЫ

- Разработана методика численного расчёта сопряжённого теплообмена при сверхзвуковом канальном течении с дозвуковыми газовыми завесами и внутренним пористым охлаждением стенок, при учёте зависимости теплофизических свойств газов и материалов стенок от температуры. Расчёты продемонстрировали преимущества сопряжённого подхода с учётом влияния теплофизических свойств газов и материалов и подтвердили высокую эффективность системы комбинированного завесного охлаждения стенок в сверхзвуковом потоке при соотношении скоростей основного и вторичного потоков $u_0/u_\infty \geq 0.1$, $m \geq 0.2$.

- Установлено, что согласование расчётных и экспериментальных распределений температуры теплоизолированной стенки при газовой завесе в сверхзвуковом потоке, с точностью в +2% (+22°C) по среднему значению температуры, достигается при использовании неравновесной модификации модели турбулентности $k-\epsilon$, корректирующей рост турбулентности в косых скачках уплотнения и слое смешения.

- В результате анализа различных способов расчёта краевых условий трения и теплообмена на стенках канала установлено, что в условиях отрывного течения на охлаждаемой секции с газовой завесой корректное значение теплового потока получено с использованием двухслойной модели турбулентности $k-\epsilon$, для расчёта пристенного слоя в которой применяется однопараметрическая модель $k-l$ Норриса и Рейнольдса. При расчёте теплообмена на охлаждаемой

секции без газовой завесы и безотрывного течения второй газовой завесы на теплоизолированной неохлаждаемой секции приемлемую точность расчёта крайних условий обеспечивают классические пристенные функции.

-Подтверждено снижение коэффициента поверхностного трения $C_f/2$ и числа Стантона St в областях газовых завес при $0.2 < m \leq 0.28$ и $0.1 < M_s/M_\infty \leq 0.2$ с последующим ростом этих параметров до уровня на гладкой стенке. Установлено, что рост интенсивности вдува через первую щель с $m_1=0.07$ до $m_1=0.28$ приводит к уменьшению интенсивности косого скачка более чем в два раза. Уменьшение интенсивности отражённого косого скачка приводит к снижению значений числа Стантона на теплоизолированной стенке при его взаимодействии с газовой завесой за второй щелью с $St=0.005$ до $St=0.0015$.

РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Осипов М.И. Щучкин В.В. Исследование газовой завесы при тангенциальном вдуве в сопряжённой постановке // Газотурбинные и комбинированные установки и двигатели. Тез. докл. XII всероссийской межвузовской научно-технической конференции. - Москва, 2004. - С. 119-120.
2. Mixing and film cooling in supersonic duct flows / V.Schuchkin, M.Osipov, W.Shyy, S.Thakur // International Journal of Heat and Mass Transfer. -2002. -N.45, -P.4451-4461.
3. Моделирование турбулентного потока в канале с вдувом газа в пристенной зоне / М.И.Осипов, В.В.Щучкин, Ю.С.Елисеев и др. // Тез. докл. 3-го совещания по магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях. - Москва, 2001. - С. 386.
4. Осипов М.И., Щучкин В.В. Управление пограничным слоем и тепловая защита электродных стенок МГД - источника энергии // Тез. докл. 2-го совещания по магнитной и плазменной аэродинамике в аэрокосмических приложениях. - Москва, 2000. - С. 83-84.
5. Щучкин В.В., Математическое моделирование температурного состояния лопаток и элементов стенок энергетических установок // Молодые ученые - науке, технологиям и профессиональному образованию для устойчивого развития: проблемы и новые решения: Тез. докл. междунар. конф. стран СНГ. - Москва, 1999. - Часть 3. - С. 126-127.
6. Осипов М.И., Олесевиц К.А., Щучкин В.В. Моделирование теплообмена в элементах ГТУ и импульсных установках // Сборник трудов научной конф. Студенческая весна - 99. - Москва, 1999. - С.125-126.
7. Осипов М.И., Олесевиц К.А., Щучкин В.В. Численное моделирование теплообмена в стенках проточных частей энергетических установок // Проблемы газовой динамики и тепломассообмена в энергетических установках / Труды XII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Лсонтьева. -Москва, 1999. -С.106-108.
8. Осипов М.И., Олесевиц К.А., Щучкин В.В. Численное моделирование нестационарного теплообмена в стенке с теплообменной матрицей // Тез. докл. Второй российской конф. по теплообмену. - Москва, 1998. - С.125-126.

У1738144

Щучкин В.В.
Конвективно-плёночное
охлаждение в сверхзвуковом
высокотемпературном
... численное решение...

У 1738144

ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ
обозначенного здесь срока

Напечатано с готового оригинал-макета

Издательство ООО "МАКС Пресс"

Лицензия ИД N 00510 от 01.12.99 г.

Подписано к печати 07.11.2005 г.

Формат 60x90 1/16. Усл.печ.л. 1,0. Тираж 80 экз. Заказ 741.

Тел. 939-3890. Тел./Факс 939-3891.

119992, ГСП-2, Москва, Ленинские горы, МГУ им. М.В. Ломоносова,
2-й учебный корпус, 627 к.