

На правах рукописи

СМИРНОВ Павел Евгеньевич

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ И
ТЕПЛООБМЕНА В УСЛОВИЯХ, ТИПИЧНЫХ ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ
ПЛЕНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена на кафедре теоретических основ теплотехники ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Рис Владимир Вольдемарович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Вохмянин Сергей Михайлович
кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
Федотов Александр Васильевич

Ведущая организация: Институт высоких температур РАН,
г. Москва

Защита состоится 24 января 2006 года в 16 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая 29, корпус 1, кафедра Гидроаэродинамики.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет".

Автореферат разослан " _____ " _____ 2005 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.229.07,
кандидат физико-математических наук,
доцент

Зайцев Д.К.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

До недавних пор проектирование систем пленочного охлаждения основывалось на эмпирических данных, полученных в результате промышленных и лабораторных экспериментов, первые из которых чрезвычайно дороги, а вторые обычно не соответствуют реальным условиям в полной мере. Постоянное стремление промышленности к снижению затрат и сроков проектирования новых типов газовых турбин делает весьма перспективным путь численного моделирования газодинамики и теплообмена в системах пленочного охлаждения лопаток. Этот путь становится все более реальным по мере развития средств и методов вычислительной гидрогазодинамики и теплофизики, включая совершенствование моделей турбулентности, адекватно описывающих явления теплопереноса в сложных течениях.

Достигнутый уровень численного моделирования, базирующегося на решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса в рамках гипотезы изотропной турбулентной вязкости, не позволяет надежно предсказывать эффективность пленочного охлаждения. Метод прямого численного моделирования (DNS) и метод моделирования крупных вихрей (LES), в принципе, позволяют предсказывать поля течения и температуры, однако требуют слишком больших вычислительных ресурсов с точки зрения инженерных расчетов. С учетом сказанного, практика проектирования и расчета систем пленочного охлаждения требует дальнейшего совершенствования моделей турбулентной вязкости, используемых при решении осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS).

Реальные системы пленочного охлаждения, имеют, как правило, сложную геометрию и большое число отверстий, размеры которых малы по сравнению с характерным размером охлаждаемого объекта. Это сильно усложняет процедуру генерации расчетной сетки, требуемой для пространственной дискретизации определяющих уравнений. Указанную проблему можно решить, используя блочно-структурированные сетки, широко применяемые при расчетах течений в областях сложной геометрии. Однако генерация таких сеток может занимать слишком большое время. Альтернативным подходом является использование неструктурированных сеток с различной формой ячеек, который при существенном сокращении времени на построение сетки позволяет сохранить тот же уровень точности, что и в случае блочно-структурированных сеток.

Цели работы

Представляемая диссертационная работа направлена на

- тестирование ряда моделей турбулентности на модельной задаче, типичной для организации пленочного охлаждения;
- проведение расчетов на основе метода DNS с целью качественного анализа многомасштабной вихревой структуры в окрестности струи, выдуваемой из наклонного отверстия;
- разработку подхода для учета эффектов анизотропии в моделях турбулентности;
- разработку и программную реализацию численного метода, ориентированного на решение задач пленочного охлаждения в областях сложной геометрии с использованием неструктурированных сеток.

Научная новизна работы

1. Применительно к трехмерной задаче пленочного охлаждения протестирован целый ряд известных моделей турбулентности (стандартная $k-\varepsilon$, Спаларта-Аллмараса, Уилкокса, Ментера, Дурбина, а также одна из версий модели рейнольдсовых напряжений). Установлено, что при использовании подробных сеток ни одна из моделей не дает удовлетворительных результатов по распределению температуры в ближнем поле выдуваемой струи; в случае грубых сеток случайно могут быть получены приемлемые результаты.

2. Впервые метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) применен к расчету пленочного охлаждения с одновременным учетом влияния на струю крупных вихрей, развивающихся в пограничном слое перед струей. Показано, что учет набегающих крупных вихрей приводит к более правильному описанию температурного поля в окрестности струи. Однако метод DES в целом не обеспечивает требуемой точности предсказаний эффективности охлаждения.

3. Произведен анализ полей течения и температуры в модельной конфигурации пленочного охлаждения с одиночным рядом круглых отверстий на основе прямого численного моделирования (DNS). Расчеты на сетке размером около 20-ти миллионов ячеек показали, что в окрестности струи, выдуваемой из наклонного отверстия, перенос тепла в поперечном и нормальном к стенке направлениях осуществляется вихревыми структурами существенно разного масштаба.

4. Предложен относительно простой способ учета в рамках метода RANS анизотропии турбулентности в ближнем поле струи, выдуваемой для организа-

ции пленочного охлаждения. С использованием разработанной модели, вводящей анизотропную вихревую вязкость, получены результаты, хорошо воспроизводящие измеренную в разных экспериментах температуру адиабатической стенки.

Достоверность полученных результатов

Достоверность полученных численных результатов обосновывается использованием хорошо отлаженных и широко используемых программных пакетов, верификация которых осуществлялась путем сопоставления результатов расчетов с данными теории и/или экспериментов для ряда модельных и тестовых задач. Приложение этих пакетов к расчету канонических задач в настоящей работе служило основой при верификации реализованных автором программных кодов. Все расчеты выполнены с применением метода пространственной дискретизации второго порядка точности на сетках, обеспечивающих получение сошедшегося по сетке решения.

Практическая ценность работы

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1. получен важный вывод о неспособности моделей изотропной вихревой вязкости, а также модели рейнольдсовых напряжений к воспроизведению температуры в ближнем поле струи, выдуваемой для организации пленочного охлаждения;

2. выявленные свойства разномасштабности вихревой структуры в окрестности струи, выдуваемой из наклонного отверстия, являются весомым дополнением к экспериментальной информации, свидетельствующей об анизотропии вихревой вязкости, и объясняют неудовлетворительные результаты модели рейнольдсовых напряжений для этого класса задач;

3. предложенный подход к учету анизотропии турбулентности в ближнем поле выдуваемой струи может быть использован для создания моделей, пригодных для проведения инженерных расчетов систем пленочного охлаждения;

4. разработанная программа для решений уравнений Навье-Стокса с использованием неструктурированных сеток может применяться для расчетов широкого класса течений в областях сложной геометрии, в том числе в системах пленочного охлаждения.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: международной конференции по

параллельным вычислениям в вычислительной гидродинамике (Москва, 2003); XIV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева “Процессы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Рыбинск, 2003); всероссийской научно-технической конференции “Параллельные вычисления в задачах математической физики” (Ростов-на-Дону, 2004); заседании секции “Высокопроизводительные вычислительные системы и их применение” Совета РАН под председательством акад. Г.И. Савина (Москва, 2004); XV школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева “Процессы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках” (Калуга, 2005); научно-практической конференции и школе-семинаре “Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий” (Санкт-Петербург, СПбГПУ, 2005); международной конференции по современным прикладным вычислительным технологиям (Бельгия, 2005).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в шести научных публикациях.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 141 наименования и приложения. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 2 таблицы и 60 рисунков.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность выбранной темы исследования, ее научное и практическое значение, сформулированы основные задачи работы.

В первой главе диссертации дается обзор работ по экспериментальным исследованиям и численному моделированию пленочного охлаждения (раздел 1.1). Отражены основные результаты экспериментального исследования модельных задач пленочного охлаждения, в которых охладитель выдувается в сносящий внешний поток следующими способами: через одиночное отверстие, один или несколько рядов отверстий, либо через узкий щелевой канал. Обсуждается влияние на эффективность пленочного охлаждения таких параметров экспериментальных установок и течения, как форма каналов подачи охладителя, угол вдува струи, соотношение плотностей и расходов горячего газа и охладителя, а также степень турбулентности транзитного потока. Литературные данные свидетельствуют, что наибольшая чувствительность

эффективности охлаждения к режимным и геометрическим параметрам наблюдается при параметре вдува M , близком к единице; оптимальные значения этого параметра варьируются в диапазоне 0.4 – 0.5. Обзор работ, посвященных численному моделированию, включает исследования, выполненные для конфигураций с упрощенной геометрией, а также для прототипов реальных лопаток. Обсуждаются используемые численные методы, расчетные сетки, граничные условия и параметры течений, а также результаты сопоставления расчетных и экспериментальных данных. Расчеты на основе уравнений Навье-Стокса, осредненных по Рейнольдсу (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes*, RANS), показали, что традиционные модели семейства k - ε и k - ω не обеспечивают надежного предсказания адиабатической эффективности. Наилучшие результаты в рамках метода RANS получаются при использовании моделей турбулентности с анизотропной вязкостью. Применение метода крупных вихрей (*Large Eddy Simulation*, LES), в принципе, позволяет хорошо воспроизводить поля течения и температуры. Однако непосредственное применение метода LES для расчета практически значимых пристенных течений пока связано с чрезвычайно большими вычислительными затратами. В литературе также представлены единичные примеры расчетов задачи пленочного охлаждения на базе недавно предложенного метода моделирования отсоединенных вихрей (*Detached Eddy Simulation*, DES), основанного на гибридизации подходов RANS и LES. Однако, применение метода DES не привело к существенному улучшению предсказаний эффективности охлаждения по сравнению с методом RANS.

Далее в первой главе ([раздел 1.2](#)) дается изложение математической модели, на основе которой были проведены расчеты. Процесс турбулентного смешения охладителя с основным потоком описывается системой трехмерных уравнений Навье-Стокса в совокупности с уравнением состояния совершенного газа и уравнением энергии. Излагаются способы замыкания определяющих уравнений. Основной среди них – метод RANS, до сих пор остающийся наиболее распространенным подходом к моделированию турбулентности, в особенности, применительно к прикладным задачам. Приведена общепринятая классификация наиболее широко используемых в методе RANS замыкающих моделей турбулентности. В этом же разделе дается краткое описание метода LES, основанного на пространственной “фильтрации” системы трехмерных нестационарных уравнений Навье-Стокса; при этом перенос импульса и тепла крупными, энергонесущими структурами рассчитывается точно, а эффект мелких, неразрешаемых масштабов учитывается через “подсеточные” (SubGrid Scale, SGS) напряжения и тепловой поток, которые подлежат моделированию.

Излагается способ RANS/LES - гибридизации моделей турбулентности на основе метода DES.

Во второй главе, вслед за вводными замечаниями (раздел 2.1), приводится подробное описание численного метода, на основе которого были проведены расчеты в рамках настоящей работы. Отражены основные положения метода конечных объемов (МКО), используемого для пространственной дискретизации уравнений (раздел 2.2). В разделе 2.3 описывается способ расчета нестационарных течений с использованием метода искусственной сжимаемости.

В разделе 2.4 излагается вариант реализации МКО, осуществленный в разработанном на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ программном комплексе (ПК) SINF. Заложенный в ПК SINF численный метод основан на использовании многоблочных структурированных неравномерных сеток, согласованных с границами области течения. Для получения нестационарных решений реализована схема второго порядка точности по физическому времени. Для расчета конвективных слагаемых применяются различные противопоточные схемы, в частности, схема QUICK, а при дискретизации пространственных операторов, отражающих действие вязкости, применяется центральная разностная схема второго порядка.

В разделе 2.5 приводится описание варианта МКО, реализованного автором в новой программе для расчетов на неструктурированных сетках. Вычисление конвективных слагаемых производится на базе схемы Роу, исходящей из расщепления разности конвективных потоков на гранях контрольных объемов. Для получения схемы второго порядка точности по пространству применяется экстраполяция рассчитываемых величин на грани с использованием разложения в ряд Тейлора. Дискретизация операторов, отражающих эффекты вязкости/диффузии, осуществлена с помощью специальной разностной схемы второго порядка. Принятая в разработанном коде структура данных типа “грань-ячейка” исходит из хранения индексов двух соседних ячеек для каждой грани. Потоки рассчитываются на гранях, и затем добавляются в прилегающие ячейки. Сетки могут объединять тетраэдры, призмы, пирамиды и гексаэдры. На данный момент возможно решение стационарных задач ламинарных и турбулентных течений несжимаемой жидкости и дозвуковых потоков газа. Турбулентная вязкость определяется на основе модели Спаларта-Аллмараса или $k-\omega$ модели (в версиях Уилкокса и Ментера).

В третьей главе представлены результаты тестирования различных моделей турбулентности с изотропной вихревой вязкостью на примере трехмерного течения, типичного для организации пленочного охлаждения. В дополнение к

целому ряду одно- и двухпараметрических моделей тестировалась и $\overline{v^2-f}$ модель Дурбина, реализованная автором настоящей работы в ПК SINF и предполагающая численное решение четырех уравнений для характеристик турбулентности. В разделе 3.2 рассмотрены особенности программной реализации $\overline{v^2-f}$ модели, а также результаты ее предварительной апробации на примере плоского течения несжимаемой жидкости с теплообменом во внезапно расширяющемся канале. Показано, что для относительно низкого значения числа Рейнольдса, построенного по высоте уступа H ($Re_H=5100$), $\overline{v^2-f}$ модель достаточно хорошо воспроизводит эталонное распределение коэффициента трения на стенке канала. Однако, при более высоком числе Рейнольдса ($Re_H=28000$) наблюдается заметное отличие от экспериментальных данных как для трения, так и для характеристик теплообмена со стенкой за уступом. В то же время, модели Уилкокса и Ментера, приложенные к расчету этой же задачи, демонстрируют хорошее согласие с экспериментом.

В разделе 3.3 приводится постановка трехмерной модельной задачи пленочного охлаждения для условий трех экспериментов, относимых к числу эталонных [I – Burd, Simon, ASME Pap.97-GT-25; II – Sinha *et al.*, ASME J. Turbomach. – 1991. – Vol.113. – P. 442-449; III – Goldstein *et al.*, ASME J. Eng. for Power. – 1968. – Vol. 90. – P.384-395]. Выдув охладителя производится на плоскую стенку из одного или нескольких (размещенных в ряд) круглых отверстий, расположенных под углом к основному потоку. Отношение длин отверстий L к диаметру D , а также параметры течений, выбранные для тестовых расчетов, даны в таблице 1. Расчетная область и сетка для условий экспериментов I и II показана на рис. 1.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Эксперимент I	Эксперимент II	Эксперимент III
L/D	2.3	1.75	~ 42
$Tu, \%$	12	0.2	0.1
$V_\infty, \text{м/с}$	10.8	20	61
δ^{**}/D при $x/D=-4$	0.073	0.06	0.04
Re_D	13 000	17 400	87 000
ρ_j/ρ_∞	0.97	1.2	0.85
M	0.5, 1	0.25, 0.5	0.2, 0.5, 1

Расчеты проводились с использованием следующих моделей турбулентности: низко- и высокорейнольдсовых версий $k-\omega$ модели Уилкокса, стандартной $k-\epsilon$, Спаларта-Аллмараса (S-A), SST Ментера, а также модели Дурбина. Все перечисленные модели реализованы в программном комплексе SINP. Дополнительные результаты были получены по модели Спаларта-Аллмараса, реализованной в качестве одной из опций в коммерческом пакете FLUENT.

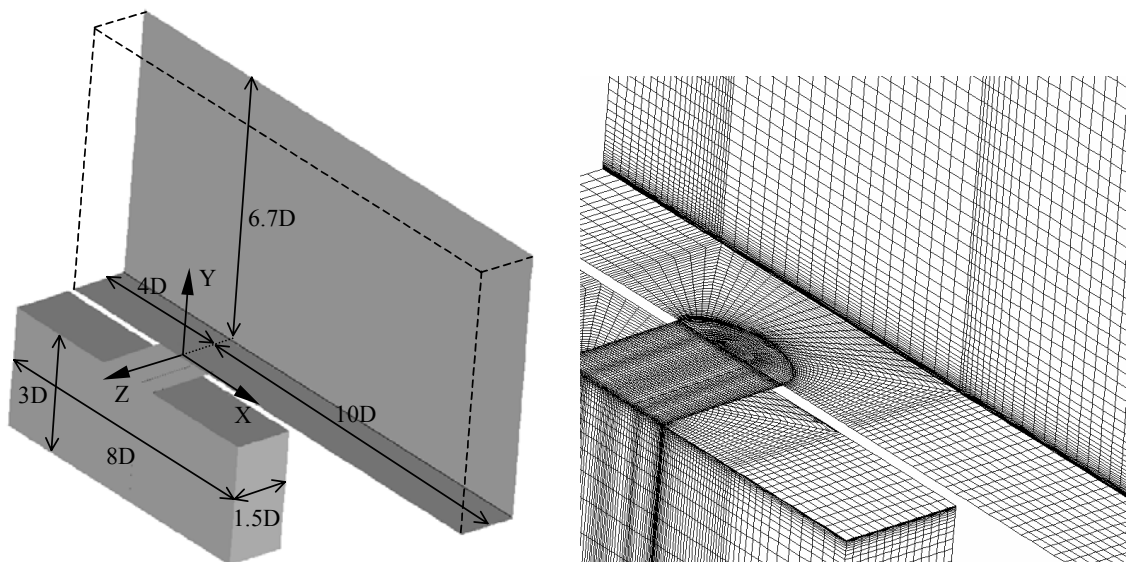


Рис.1 Расчетная область и фрагмент сетки в окрестности отверстия подачи охладителя для условий экспериментов I и II.

В [разделе 3.4](#) представлены результаты исследования зависимости решений поставленной задачи от размера сетки. Сравниваются результаты расчетов, полученные для конфигурации с одиночным отверстием (эксперимент III) на исходной сетке с размерностью 280 000 ячеек и измельченной – 660 000 ячеек. Сопоставление проводилось по адиабатической эффективности на центральной линии, поскольку распределение температуры, как правило, наиболее чувствительно к изменениям сетки. Расчеты были выполнены для параметра вдува $M = 1$ с использованием трех низкорейнольдсовых моделей турбулентности: Спаларта-Аллмараса, Ментера и Дурбина. Для всех моделей изменения в решениях, обусловленные измельчением сетки, относительно небольшие, что обосновывает допустимость использования исходной сетки при проведении дальнейших расчетов.

В [разделе 3.5](#) сопоставляются результаты расчетов полей течения и температуры, полученные с применением всех тестируемых моделей турбулентности. Показано, что низкорейнольдсовые модели турбулентности позволяют воспроизвести большинство деталей трехмерных полей скорости в рассматриваемом течении. При этом, однако, ни одна из протестированных моделей изотропной вихревой вязкости не обеспечила с приемлемой точностью

расчета температурного поля, особенно вблизи отверстия выдува охладителя. На рис. 2 показаны распределения адиабатической эффективности на центральной линии, рассчитанные по различным моделям турбулентности, в сопоставлении с результатами, полученными в экспериментах для случая $M = 0.5$. Общим недостатком всех протестированных моделей является существенное завышение адиабатической эффективности вдоль центральной линии при $x/D > 3$, свидетельствующее о том, что в расчетах интенсивность турбулентного смешения струи с основным потоком существенно меньше, чем в экспериментах. Сделан вывод о необходимости учета эффектов анизотропии турбулентности, присущих данному виду течений.

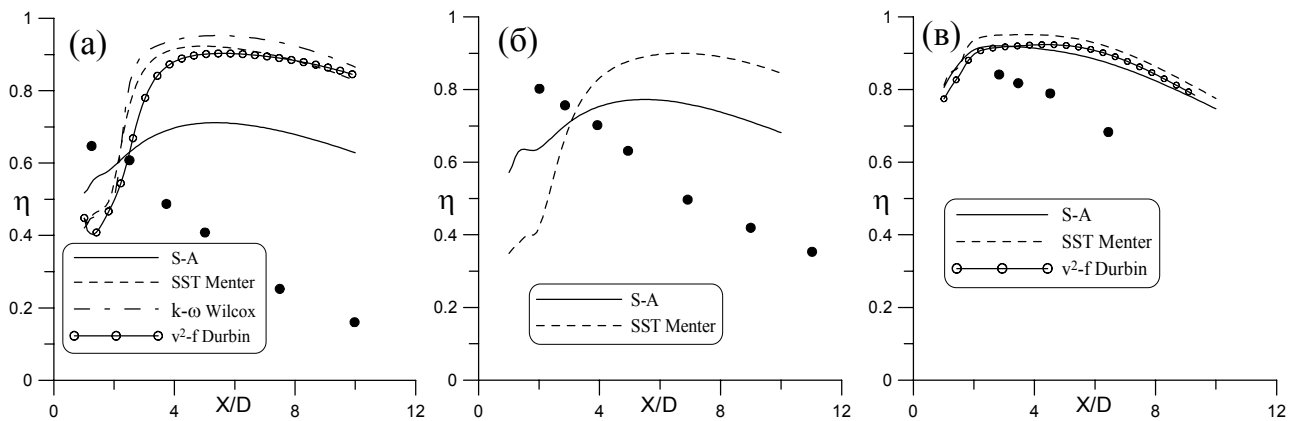


Рис.2. Сопоставление расчетных распределений адиабатической эффективности вдоль центральной линии с результатами измерений (точки): (а) – условия эксперимента [I]; (б) – [I I]; (в) – [I I I].

В четвертой главе для ряда струй, выдуваемых из наклонных отверстий, проводится численное моделирование, направленное на анализ вихревой структуры и эффектов анизотропии турбулентности в зоне наиболее сильного взаимодействия струи с основным потоком. Относительно затратные расчеты по методам DNS и DES проводились на кластерных системах Санкт-Петербургского филиала Межведомственного суперкомпьютерного центра РАН и Центра высокопроизводительных вычислительных кластерных технологий СПбГПУ.

В разделе 4.1 приводятся результаты приложения гибридного метода DES к расчету одной из модельных конфигураций. Основное отличие от опубликованного недавно аналогичного исследования [Roy *et al.*, ASME Pap. GT-2003-38140] заключается в том, что, вместо задания стационарного распределения скорости во входном сечении, в настоящей работе применяется специальная процедура генерации крупных вихрей, развивающихся в пограничном слое и набегающих на струю из области выше по потоку. Представляется, что учет взаимодействия этих вихрей со струей может быть существенным для правиль-

ного предсказания эффективности охлаждения. Для моделирования самоподдерживающейся турбулентности в набегающем пограничном слое при проведении расчетов по методу DES, был применен подход, предложенный в [Lund *et al.*, J. Comp. Phys. – 1998. – Vol.140. – P. 233-258]. Метод предполагает задание осредненного профиля скорости на входе в расчетную область, полученного из предварительного расчета турбулентного пограничного слоя на основе RANS с целью удовлетворения требуемым условиям течения. При проведении нестационарных расчетов, пульсации скорости на входе генерируются посредством приложения процедуры их извлечения из

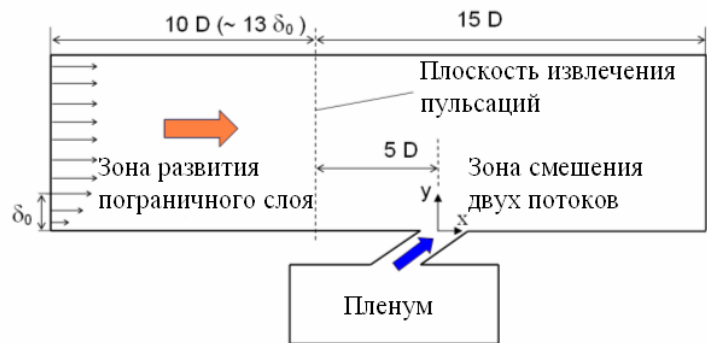


Рис.3 Схема для расчетов конфигурации пленочного охлаждения с одновременной генерацией крупных вихрей в набегающем на струю пограничном слое.

подходящей плоскости, расположенной ниже по потоку (см. рис. 3). Расчеты проводились для условий экспериментов [11] на сетке, содержащей свыше полутора миллионов ячеек. Показано, что в качественном отношении предсказания заметно улучшаются в случае генерации набегающих вихрей. Однако, метод DES не выявил существенных преимуществ перед подходом RANS применительно к расчету эффективности пленочного охлаждения, по крайней мере, при значениях параметра вдува около единицы.

Раздел 4.2 посвящен исследованию вихревой структуры в окрестности струи на основе метода прямого численного моделирования (DNS). Расчеты без привлечения модели турбулентности опять-таки проводились для условий экспериментов [11]. В силу практической нереализуемости на сегодняшний день аккуратного прямого численного моделирования данного течения, характеризующегося числом Рейнольдса $Re_D = 17\,400$, расчеты проводились на сетке приемлемой по доступным вычислительным ресурсам размерности ($\sim 19 \cdot 10^6$ ячеек), т.е. в рамках “неполного” DNS. Для вычислений принимались те же граничные условия и расчетная область, что и при использовании метода DES (см. рис. 3). Анализ явлений в пристенной области позволил заключить, что перенос частиц охладителя к пластине осуществляется посредством довольно мелких вихрей, образующихся вблизи стенки в результате взаимодействия струи с основным потоком (рис. 4). Одновременно с этим, вдали от стенки прослеживается наличие парных вихрей и других крупномасштабных вихревых

структур, определяющих температурное поле в поперечном к основному потоку направлении. Таким образом, установлено, что перенос тепла в поперечном и нормальном направлениях осуществляется вихревыми структурами существенно разного масштаба.

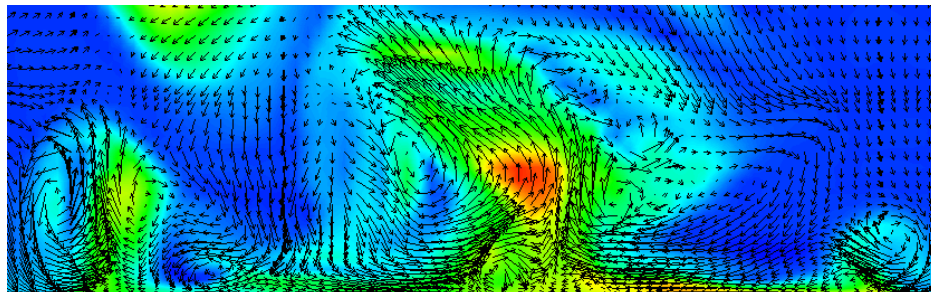


Рис.4. Мгновенные вектора скорости и распределение температуры вблизи стенки, плоскость $x/D = 1.5$.

В разделе 4.3 представлены результаты расчетов, выполненных с использованием модели рейнольдсовых напряжений (RSM), реализованной в программном комплексе FLUENT. Однако данная попытка учесть в рамках метода RANS эффекты анизотропии турбулентности, проявляющиеся при выдуве струи в основной поток, не выявила каких-либо существенных преимуществ модели RSM перед моделями изотропной турбулентной вязкости, что, по видимому, является следствием использования единого линейного масштаба турбулентности при моделировании всех рейнольдсовых напряжений.

В разделе 4.4 предложен способ учета анизотропии турбулентности, основанный на введении двух вихревых вязкостей μ_1 и μ_2 , первая из которых отвечает за турбулентный обмен по нормали к стенке, а вторая – в плоскостях, параллельных стенке. В рамках такого подхода тензор турбулентных напряжений записывается в виде:

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \underline{\underline{\tau}}^{tur} = 2 \begin{pmatrix} \mu_2 \dot{S}_{11} & \mu_1 \dot{S}_{12} & \mu_2 \dot{S}_{13} \\ \mu_1 \dot{S}_{21} & \mu_1 \dot{S}_{22} & \mu_1 \dot{S}_{23} \\ \mu_2 \dot{S}_{31} & \mu_1 \dot{S}_{32} & \mu_2 \dot{S}_{33} \end{pmatrix} - \frac{2}{3} (\mu_2 \dot{S}_{11} + \mu_1 \dot{S}_{22} + \mu_2 \dot{S}_{33}) I. \quad (1)$$

где I – единичная матрица. Здесь предполагается, что в рассматриваемой точке пространства направление оси с индексом “2” совпадает с нормалью к стенке. Применительно к расчетной области, показанной на рис. 1, нормаль к стенке параллельна оси y . Анизотропная модель используется только в области $y > 0$, где происходит смещение струи с основным потоком, а для расчета течения в подводящей трубе применяется изотропная вязкость, равная μ_1 .

Для определения μ_1 используется модель Спаларта-Аллмараса. Турбулентная вязкость μ_2 для каждого конкретного течения полагается постоянной величиной, вычисляемой по формуле:

$$\mu_2 = C(M, \rho_j / \rho_{in}, L/D, Tu) \rho_{in} U_{in} D \quad (2)$$

Входящий в (2) множитель C является эмпирически подбираемой функцией параметров вдува, а также степени турбулентности основного потока. Применительно к задаче определения адиабатической эффективности коэффициент турбулентной диффузии тепла a^{tur} полагается изотропным и вычисляется через вязкость μ_2 :

$$a^{tur} = \mu_2 / \rho Pr^{tur} \quad (3)$$

Систематические расчеты по анизотропной модели были проведены для условий экспериментов [I I] и [I I I], характеризующихся низкой степенью турбулентности основного потока, близким к единице отношением плотностей, но принципиально разными значениями параметра L/D (см. табл. 1). В результате настройки модели (при $Pr^{tur} = 0.9$) были получены две эмпирические зависимости: $C = (3 + 6M) \cdot 10^{-3}$ и $C = (3 - 2.8M + 2.8M^2) \cdot 10^{-3}$ для условий экспериментов [I I] и [I I I] соответственно.

Из рис. 5 видно, что предлагаемая модель правильно воспроизводит характеристики, определяющие эффективность пленочного охлаждения и может служить основой для дальнейших разработок в этом направлении.

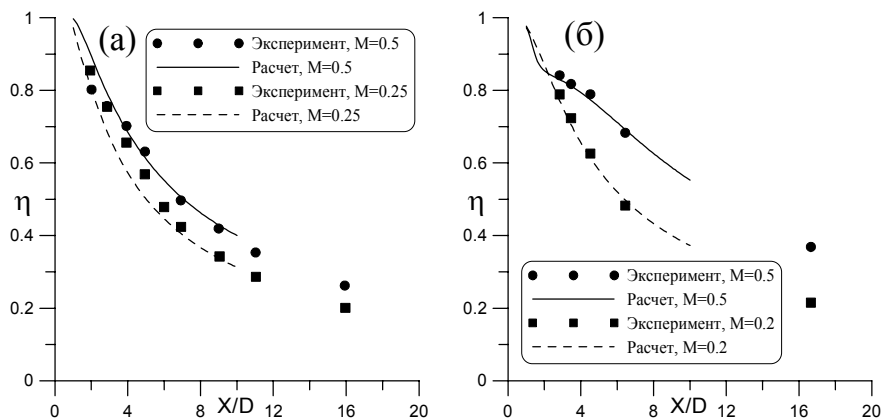


Рис.5. Распределения адиабатической эффективности вдоль центральной линии, рассчитанные по анизотропной модели: (а) – условия эксперимента [I I]; (б) – [I I I].

В пятой главе приведены результаты расчетов, выполненных с использованием неструктурированных сеток. Вычисления осуществлялись с использованием компьютерной программы, реализующей описанный в разделе 2.5 численный метод.

В разделе 5.2 приводятся результаты предварительного тестирования реализованного автором численного метода на расчетах ламинарного течения в каверне с движущейся крышкой и турбулентного пограничного слоя.

В разделе 5.3 представлены результаты численного моделирования трехмерной задачи охлаждения торцевой поверхности статорной решетки. Рассмотрен случай подвода охладителя только из узкого щелевого канала. Расчеты выполнены для конфигурации, недавно исследованной экспериментально и численно авторами работы [Knost, Thole, ASME Pap. GT-2003-38252]. Для вычислений использовалась неструктурированная сетка, состоящая из гексагональных и призматических ячеек, общим числом 871 560. Расчетная область и фрагменты сетки показаны на рис. 6.

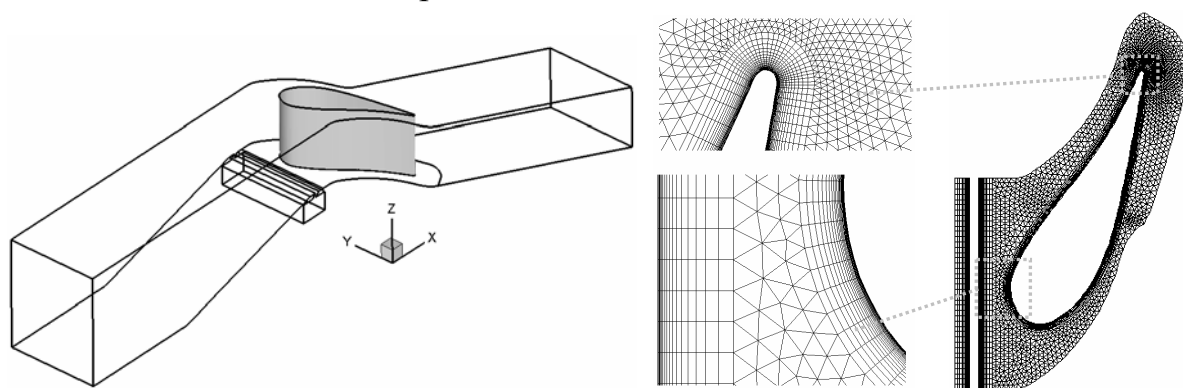


Рис.6. Расчетная область и фрагменты сетки для задачи охлаждения торцевой стенки решетки статорных лопаток.

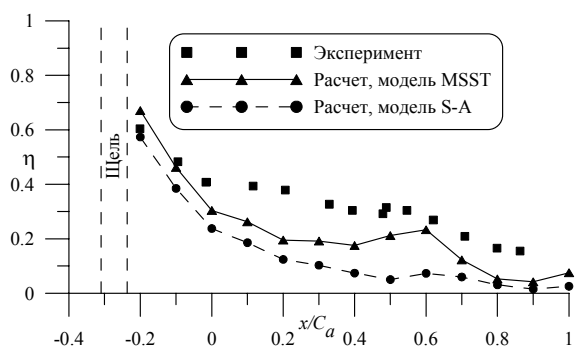


Рис.7 Распределения адиабатической эффективности, осредненной по ширине межлопаточного канала.

Полученные с использованием модели Спаларта-Аллмараса и SST модели Ментера значения адиабатической эффективности оказались заниженными по сравнению с экспериментом (см. рис. 7). Идентичная по постановке и используемой сетки задача была решена и с применением пакета FLUENT; результаты, полученные по двум программам, практически совпали.

Примечательно, что RNG k - ϵ модель с модифицированными пристенными функциями, использованная авторами экспериментов для расчетов этой же задачи, привела к распределению эффективности, схожему с данными модели Ментера. Судя по всему, примененные модели турбулентности переоценивают экранирующую роль подковообразного вихря, что, в свою очередь, может быть обусловлено недооценкой в нем турбулентной диффузии тепла. Более полное

тестирование различных моделей турбулентности, и, возможно, их специальная настройка на задачи, схожие с рассмотренной, могут составить предмет отдельного, весьма объемного исследования.

В заключении кратко сформулированы основные результаты настоящей работы, которые сводятся к следующему:

1. Целый ряд известных моделей турбулентности (стандартная k - ϵ , Спаларта-Аллмараса, Уилкокса, Ментера, Дурбина, а также одна из версий модели рейнольдсовых напряжений) протестированы в рамках метода RANS на трехмерной задаче пленочного охлаждения плоской пластины при подаче охладителя через одиночное отверстие или ряд круглых отверстий, расположенных под углом к основному потоку. Расчеты с применением реализованного в ПК SINF метода пространственной дискретизации второго порядка проведены на блочно-структурированных сетках, обеспечивающих получение сошедшегося по сетке решения.

2. Сравнение с экспериментом показало, что все протестированные модели, за исключением стандартной k - ϵ , позволяют воспроизвести большинство деталей трехмерных полей скорости. В то же время, ни одна из моделей не дает удовлетворительных результатов по распределению температуры в ближнем поле выдуваемой струи. Расчеты на основе модели рейнольдсовых напряжений не выявили ее преимуществ перед моделями изотропной турбулентной вязкости.

3. Впервые метод моделирования отсоединенных вихрей (DES) применен к расчету пленочного охлаждения с одновременным учетом влияния на струю крупных вихрей, развивающихся в пограничном слое перед струей. Показано, что учет набегающих крупных вихрей приводит к качественно более правильному температурному полю в окрестности струи. Однако и в этом случае метод DES в целом не обеспечивает требуемой точности предсказаний эффективности охлаждения.

4. Проведенные на основе метода прямого численного моделирования (DNS) расчеты показали, что в окрестности струи, выдуваемой из наклонного отверстия, перенос тепла в поперечном и нормальном к стенке направлениях осуществляется вихревыми структурами существенно разного масштаба, что согласуется с экспериментальными наблюдениями.

5. Предложен относительно простой способ учета анизотропии турбулентности в ближнем поле струи, выдуваемой для организации пленочного охлаждения. Расчеты по разработанной модели с анизотропной вихревой вязко-

стью хорошо воспроизвели измеренную в разных экспериментах температуру адиабатической стенки.

6. Разработана новая компьютерная программа, позволяющая рассчитывать несжимаемые течения и дозвуковые потоки газа в областях сложной геометрии. Программа реализует численный, второго порядка точности метод решения уравнений гидродинамики на неструктурированных сетках, допускающих объединение элементов (ячеек) различных типов. Верификация программы осуществлена путем сопоставления результатов расчетов ряда задач с данными других, хорошо отлаженных и широко используемых пакетов.

7. С помощью разработанной программы проведены расчеты трехмерного течения с охлаждением торцевой стенки решетки статорных, относительно толстых лопаток путем выдува струи из расположенной выше по потоку щели. Идентичная по постановке и используемой неструктурированной сетке задача была решена и с применением пакета FLUENT; результаты, полученные по двум программам, практически совпали. Установлено, что использование модели Спаларта-Аллмараса дает значения адиабатической эффективности сильно заниженные по сравнению с экспериментом; SST модель Ментера несколько улучшает качество расчетов. Наиболее вероятно, что использованные модели турбулентности недооценивают уровень турбулентной диффузии тепла в развитом подковообразном вихре, оказывающем экранирующее действие при проникновении охладителя к стенке. Требуются дополнительные усилия по отбору и, возможно, специальной настройке модели турбулентности, обеспечивающей приемлемую для практики точность предсказаний применительно к рассматриваемой задаче и близким к ней.

В приложении приводятся формулировки дифференциальных моделей турбулентности, использованных для расчетов в настоящей работе.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Смирнов П.Е. Тестирование одно- и двухпараметрических моделей турбулентности на трехмерной задаче, типичной для организации пленочного охлаждения

// Труды XIV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Том 1. – Москва: Издательство МЭИ, 2003. – с.125-128.

2. Smirnov E.M., Abramov A.G., Ivanov N.G., Smirnov P.E., Yakubov S.A. DNS and RANS/LES-computations of complex geometry flows using a parallel mul-

tiblock finite-volume code // In: Parallel CFD (May 13 15, 2003, Moscow). Book of abstracts, 357p., pp.132-135.

3. Смирнов Е.М., Абрамов А.Г., Зайцев Д.К., Иванов Н.Г., Смирнов П.Е., Якубов С.А. Применение параллельных вычислений для моделирования турбулентных течений в областях сложной геометрии / “Параллельные вычисления в задачах математической физики”: Сборник трудов Всероссийской научно-технической конференции, Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2004. С. 132-141.

4. Смирнов П.Е. Относительно простой способ учета анизотропии турбулентности при трехмерном численном моделировании ближнего поля струи, выдуваемой для организации пленочного охлаждения // Труды XV Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. Том 2. – Москва: Издательство МЭИ, 2005. – с.96-99.

5. Рис В.В., Смирнов П.Е. Опыт использования различных моделей турбулентности для расчета адиабатической эффективности пленочного охлаждения при выдуве струй из наклонных отверстий // В кн.: Формирование технической политики инновационных наукоемких технологий. Сборник материалов научно-практической конференции и школы-семинара. СПб.: Издательство Политехнического ун-та, 2005, 363 с., с.131-135.

6. Smirnov E.M., Smirnov P.E. Application of an unstructured Navier-Stokes code to prediction of adiabatic effectiveness of endwall flush-slot-cooling for a stator vane passage. // Proceedings of the 3rd international Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (ACOMEN-2005), CD-ROM proceedings, 2005, 11p.