

На правах рукописи

ЛЕВЧЕНЯ Александр Михайлович

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХМЕРНОГО ТЕЧЕНИЯ И  
ТЕПЛООБМЕНА В МЕСТЕ СОПРЯЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТЕЛ  
С ПЛАСТИНОЙ И В ПРИТОРЦЕВЫХ ОБЛАСТЯХ ТУРБИННЫХ  
РЕШЕТОК

Специальность 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Смирнов Евгений Михайлович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Исаев Сергей Александрович  
  
доктор технических наук,  
профессор Кортиков Николай Николаевич

Ведущая организация: Объединенный институт высоких температур РАН

Защита состоится «\_\_» декабря 2010 в \_\_ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.07 в ГОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, корпус 1, кафедра гидроаэродинамики).

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

Автореферат разослан «\_\_» ноября 2010 года.

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

Зайцев Д.К.

## Общая характеристика работы

### *Актуальность проблемы*

Для широкого класса приложений необходимы детальные знания о течении и тепломассообмене в окрестности цилиндрических тел, соединенных (сочлененных) с ограничивающей стенкой, в частности, с пластиной. Сюда относятся: опорные конструкции мостов, область сочленения крылового профиля с фюзеляжем самолета, торцевые области турбинных решеток, теплообменники и т.д.

При натекании пограничного слоя, развивающегося вдоль ограничивающей поверхности, на препятствие, может сформироваться система подковообразных вихрей (ПВ). Развивающиеся вихревые структуры влияют как на особенности течения перед препятствием, так и на дальнейшее его обтекание, что, например, в случае турбинной решетки сказывается на интенсивности перемешивания потока в межлопаточном канале и уровне потерь давления. При наличии перепада температур между потоком и обтекаемой поверхностью подковообразные вихри способны создать значительные неоднородности локальной теплоотдачи, что может приводить к недопустимому росту термомеханических напряжений в ограничивающих поток стенках.

До недавнего времени основным способом исследования особенностей течения в области сочленения цилиндрического препятствия и стенки было проведение экспериментов как на упрощенных геометрических моделях (круговой или квадратный цилиндр, симметричный аэродинамический профиль), так и на моделях плоских турбинных решеток. Следует отметить, однако, что проведение высокоточных измерений в существенно трехмерных потоках весьма затратно, это и по настоящее время обуславливает ограниченность детальных опытных данных для рассматриваемого класса течений.

Развитие вычислительной техники сделало доступным численное моделирование трехмерного течения на основе полной системы уравнений Навье-Стокса. В настоящее время для моделирования турбулентных течений, реализующихся в большинстве практических приложений, наиболее широко распространенной методикой является применение осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), дополняемых той или иной моделью турбулентности. В литературе накоплен обширный материал по предсказательным возможностям RANS-моделей турбулентности применительно к двумерным течениям, для которых в настоящее время относительно легко обеспечить сходимость решения по сетке. Однако для существенно трехмерных турбулентных течений, и особенно для тех, которые характеризуются сложной геометрией и многовихревой структурой, получение сеточно-независящих численных решений и сегодня представляет нетривиальную задачу. Накопление методического опыта в этом направлении также представляется весьма актуальным.

## ***Цели работы***

Представляемая диссертационная работа направлена на

- численное исследование стационарного и нестационарного ламинарного течения в области сочленения цилиндрического тела и гладкой пластины в широком диапазоне режимных параметров с целью выявления условий, при которых реализуется та или иная топология системы подковообразных вихрей;
- анализ влияния деталей постановки задачи в рамках метода RANS на предсказание локальной теплоотдачи, структуру и количественные характеристики подковообразных вихрей в турбулентном пограничном слое на торцевой поверхности, анализ сеточной чувствительности трехмерных численных решений;
- выработку заключения о предсказательных возможностях и ограничениях нескольких современных RANS-моделей турбулентности;
- численное моделирование турбулентного течения и торцевого теплообмена в межлопаточных каналах решеток турбомашин, анализ полей течения и характеристик локальной теплоотдачи для нескольких тестовых решеток, сопоставление с экспериментальными данными.

## ***Научная новизна работы***

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- 1) получены новые данные, позволяющие оценить условия образования множественных подковообразных вихрей в ламинарном пограничном слое, натекающем на сочлененное с пластиной цилиндрическое тело;
- 2) впервые исследовано влияние периодического схода вихрей с обтекаемого цилиндра на систему подковообразных вихрей, развивающихся в натекающем ламинарном пограничном слое;
- 3) впервые показано, что при подходящем выборе RANS-модели турбулентности и достаточно мелкой расчетной сетки удастся воспроизвести наблюдаемую в эксперименте полосчатую картину локальной теплоотдачи в месте натекания турбулентного пограничного слоя на препятствие, и непосредственно соотнести эту картину со спецификой трехмерного поля течения, с множеством развивающихся в нем подковообразных вихрей; также исследовано влияние поправки, вводимой в модель турбулентности для учета эффекта искривленности линий тока, на интенсивность предсказываемых вихревых образований;
- 4) выполнены систематические расчеты трехмерного турбулентного течения и локальной торцевой теплоотдачи для условий детальных экспериментов, представ-

ленных в литературе для трех крупномасштабных, «образцовых» турбинных решеток, и накоплена обширная база данных, позволяющая оценить предсказательные возможности ряда RANS-моделей турбулентности применительно к данному классу течений.

### ***Достоверность полученных результатов***

Достоверность результатов диссертационной работы обеспечивается: самосогласованностью постановок рассматриваемых задач; проведенным методическим исследованием сеточной зависимости численных решений; практическим совпадением численных данных, генерируемых разными, независимо созданными гидродинамическими кодами, а также, в отдельных случаях, хорошим согласием полученных численных решений с известными экспериментальными данными и результатами аналогичных расчетов других авторов.

### ***Практическая ценность работы***

Практическая значимость диссертационной работы состоит в следующем:

1) результаты проведенного исследования влияния определяющих параметров на свойства ламинарного течения перед цилиндрическим препятствием дополняют весьма ограниченный объем имеющейся экспериментальной информации и, в частности, могут быть использованы при оптимизации теплообменных устройств;

2) сформулированные применительно к кодам второго порядка точности требования к измельченности расчетной сетки в области формирования подковообразных вихрей необходимо учитывать при последующих численных исследованиях, направленных на достоверное предсказание рассматриваемого класса турбулентных течений;

3) выработанные в работе заключения о предсказательных возможностях и ограничениях нескольких RANS-моделей турбулентности позволяют обоснованно подойти к выбору модели при постановке расчетов для приближенных к практике условий;

4) разработанная методика доопределения граничных условий на входе турбулентного потока в область сочленения цилиндрических тел и торцевых стенок, а также другая, накопленная в ходе работы методическая информация, могут быть непосредственно использованы при проведении многовариантных расчетов, которые направлены на оптимизацию пространственных форм торцевых поверхностей турбинных решеток с целью уменьшения потерь давления и градиентов локальной теплоотдачи.

### ***Апробация работы***

Основные результаты работы докладывались на российских и международных конференциях и семинарах: III Российской национальной конференции по теплообмену РНКТ-3 (Москва, 2002), XIV Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Рыбинск, 2003), Конференции РНКТ-4 (Москва, 2006), Международной конференции по высокоскоростным течениям WEHSFF (Москва, 2007), Всероссийском семинаре по гидроаэродинамике, посвященном 90-летию со дня рождения С.В.Валландера (Санкт-Петербург, 2008), Научно-технической конференции "Перспективные направления научных исследований в аэроавиатике. Передача знаний молодежи" (ЦАГИ, г. Жуковский Московской обл., 2008), XVII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И.Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в аэрокосмических технологиях» (г. Жуковский Московской обл., 2009), Семинаре "Решения ANSYS для турбомашиностроения" (Санкт-Петербург, 2009), Семинаре ЦАГИ по фундаментальным проблемам аэродинамики (г. Жуковский Московской обл., 2009), Международном симпозиуме по теплообмену в газовых турбинах (Анталья, Турция, 2009), Международной конференции по моделированию течений жидкости CMFF (Будапешт, Венгрия, 2009), Международной конференции по теплообмену ИНТС-14 (Вашингтон, США, 2010).

### ***Публикации по теме диссертации***

Основные результаты работы изложены в десяти научных публикациях.

### ***Структура и объем работы***

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 120 наименований. Работа изложена на 142 страницах машинописного текста, включая 19 таблиц и 65 рисунков.

### ***Содержание работы***

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

В первой главе сформулирована математическая модель и дано описание вычислительных средств, использованных в работе. В разделе 1.1 приведены системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS) и энергии, применяе-

мые для моделирования несжимаемых течений и течений совершенного газа. Замыкание уравнений основано на гипотезе Буссинеска, вводящей изотропную турбулентную вязкость. Турбулентное число Прандтля полагалось равным 0.9.

В разделе 1.2 дано описание использованных в расчетах дифференциальных моделей турбулентности: стандартной  $k$ - $\epsilon$  модели, низкорейнольдсовой версии модели  $k$ - $\omega$  (Wilcox), двух версий SST модели Ментера (MSST), модели Спаларта-Аллмараса (S-A) и  $v^2$ - $f$  модели Дурбина.

Большая часть расчетов в данной диссертационной работе выполнена с использованием “конечно-объемного” программного комплекса второго порядка точности по времени и пространству SINF (разработанного на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ под руководством проф. Е.М. Смирнова). Особенности численной схемы и обзор возможностей ПК SINF приведены в разделе 1.3. Отмечено также, что заложенные в программный комплекс возможности прошли предшествующую верификацию в результате численного моделирования широкого ряда задач гидродинамики и теплообмена, в том числе и с участием автора диссертационной работы. Отдельные результаты в работе были получены с использованием коммерческих гидродинамических пакетов (CFX-TASCflow, FLUENT и ANSYS-CFX), краткие характеристики которых приведены в разделе 1.4.

Вторая глава посвящена исследованию течения в области сочленения одиночного цилиндрического тела и гладкой пластины. При заданной геометрии тела особенности течения в области сочленения определяются значениями двух параметров - числом Рейнольдса и относительной толщиной развивающегося на пластине пограничного слоя. В разделе 2.1 приведен обзор работ, в которых изучалось трехмерное течение и теплообмен в угловой области перед круговым цилиндром, в том числе снабженным кормовым обтекателем. В обзор включены экспериментальные и расчетные работы, в которых исследовалось как ламинарное, так и турбулентное течение. В качестве определяющих параметров обычно используются: число Рейнольдса  $Re$ , построенное по скорости в ядре натекающего потока и диаметру цилиндра  $d$ , и отнесенная к  $d$  толщина вытеснения пограничного слоя  $\delta^*$  в месте его натекания на препятствие. Особо отмечается тот факт, что с ростом числа Рейнольдса картина ламинарного течения с единственным подковообразным вихрем (ПВ) сменяется картиной, характеризующейся формированием множественных подковообразных вихрей: основного, вторичного, третичного и т.д. Сделан вывод об ограниченности имеющихся в литературе данных по изменению топологии формирующегося перед

препятствием течения в зависимости от  $Re$  и  $\delta^*$ , а также о возможности лишь частичного обобщения результатов с использованием «приведенного» числа Рейнольдса  $Re_{\delta^*} = Re \delta^* / d$ .

В разделе 2.2 описывается постановка задачи и приведены результаты расчетов ламинарного автоколебательного течения в окрестности кругового цилиндра диаметром  $d$  (без кормового обтекателя), который находится между двумя торцевыми стенками, отстоящими друг от друга на  $6d$ . Отмечается, что имеющиеся в литературе расчетные данные, например, [Visbal M.R. - AIAA Journal. 1991, Vol.29, No. 8, pp.1273-1282], получены в предположении о стационарности течения и его симметрии относительно средней плоскости, проходящей через ось цилиндра. В диссертации расчеты с использованием программного комплекса SINF выполнены на основе трехмерной нестационарной постановки задачи, без наложения условий симметрии. Число Рейнольдса  $Re$  изменялось от 500 до 1500. Представлены результаты методического исследования влияния поперечного (по размаху потока) размера расчетной области и степени измельченности сетки на положение линии отрыва пограничного слоя от торцевой стенки (общее число ячеек расчетной сетки достигало 1.4 миллиона). Показано, в частности, что при построении расчетных сеток особое внимание следует уделять разрешению сетки в области образования подковообразных вихрей. Результаты проведенных расчетов свидетельствуют, что в указанном диапазоне чисел Рейнольдса течение в окрестности цилиндра существенно нестационарно лишь в следе за ним, при этом пульсации значительно уменьшаются по мере погружения в приторцевой пограничный слой. В области перед цилиндром пульсации скорости на полтора-два порядка меньше (максимум пульсаций расположен вблизи оси основного ПВ), топология подковообразной структуры сохраняется во времени, а линия отрыва практически неподвижна (в средней плоскости осцилляции расстояния от линии отрыва до цилиндра – обозначаемой далее как  $\lambda_s$ , – менее одного процента).

Разделы 2.3 и 2.4 посвящены численному моделированию ламинарного (раздел 2.3) и турбулентного (раздел 2.4) течения в окрестности цилиндра, снабженного кормовым обтекателем (рис.1). Выбор данной конфигурации обусловлен тем, что для нее недавно были опубликованы обстоятельные экспериментальные данные о турбулентном течении и торцевом теплообмене [Praisner, T.J., Smith, C.R. - ASME J. Turbomach., 2006, Vol. 128, pp. 755-762].

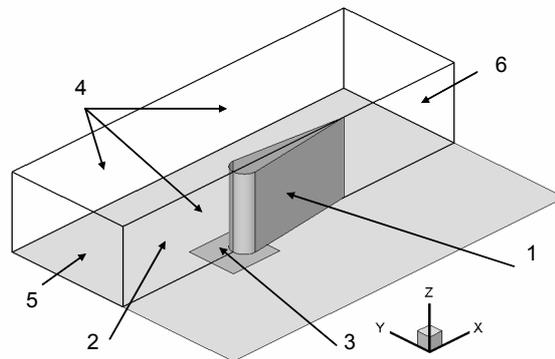
Представляемые в начале раздела 2.3 результаты нестационарных расчетов при  $Re=1500$ ,  $\delta^*/d=0.22$  с предписанной симметрией течения относительно средней плос-

кости показали, что положение линии отрыва  $\lambda_s$  практически не зависит от наличия обтекателя. Расстояние от оси основного подковообразного вихря до передней кромки цилиндра  $\lambda_0/d$  изменяется от значения 0.73 без обтекателя к значению 0.7 при наличии такового.

Продолжение [раздела 2.3](#) посвящено параметрическим расчетам на основе (относительно экономичной) стационарной постановки. В целях устранения обширной отрывной зоны и обеспечения возможности получения стационарных решений на поверхности кормовой части обтекателя накладывалось условие слабого отсоса. Было показано, что при этом топология системы подковообразных вихрей сохраняется. Обработка совокупности полученных стационарных решений позволила заключить, что граница между одним и множественными подковообразными вихрями отвечает значению  $Re_{\delta^*}$  около 260.

В [разделе 2.4](#) представляются результаты расчетов турбулентного течения и торцевого теплообмена, выполненных для условий, соответствующих экспериментам в гидроканале [Praisner & Smith, 2006] при  $Re=24400$ ,  $\delta^*/d=0.042$ . Имея в виду сопоставление с результатами RANS расчетов, следует отметить, что экспериментальная картина осредненного течения однозначно указывает на существование основного и третичного подковообразных вихрей, а вторичный вихрь прослеживается лишь на отдельных мгновенных картинах реального течения, характеризующегося низкочастотными осцилляциями в рассматриваемой области. Для картины торцевой теплоотдачи характерно наличие пространственных осцилляций числа Стантона, вызванных поочередным притоком и оттоком жидкости под действием множественных подковообразных вихрей.

При проведении расчетов использованы два программных пакета: SINF и ANSYS-CFX. Применялись  $k-\omega$  модель (Wilcox) и SST модель турбулентности Ментера (MSST) в двух версиях (1994 и 2003 года), последняя была дополнена также поправкой на кривизну линий тока [Smirnov P.E., Menter F. – J. of Turbomach., 2009, Vol. 131, №4, pp.041010(1-8)]. В целом, на наиболее подробных сетках оба использованных кода давали практически совпадающие результаты.



*Рис. 1. Обтекаемое потоком тело 1, установленное на пластине 2, часть 3 которой обогривается. Показаны также границы расчетной области: плоскости симметрии 4, входная 5 и выходная 6 границы.*

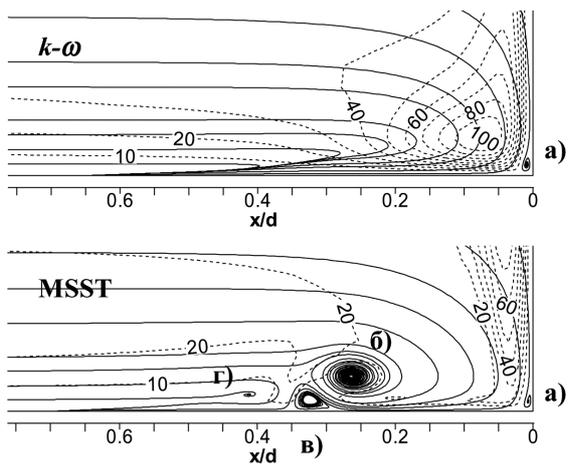


Рис. 2. Линии тока (сплошные), наложенные на распределения отношения турбулентной вязкости к молекулярной (пунктир), в плоскости симметрии.

Показано, что вне зависимости от степени измельченности сетки, модель  $k-\omega$  не позволяет предсказать ни образование многовихревой структуры (рис.2), ни пространственные осцилляции распределений числа Стантона перед препятствием. Анализ показал, что относительно высокий уровень эффективной вязкости, генерируемый моделью  $k-\omega$  в области сочленения, препятствует образованию усложняющей течение вихревой структуры. В расчетах на достаточно подробных сетках по модели MSST воспроизводится многовихревая структура течения (основной подковообразный вихрь (б), вторичный (в), и третичный (г) ПВ на рис.2). Установлено также, что при измельчении сетки могут быть получены и дополнительные (отсутствующие в осредненной экспериментальной картине) ПВ. Причина такого отличия от экспериментальных данных вызвана, судя по всему, сглаживающим влиянием низкочастотной нестационарности системы подковообразных вихрей, развивающейся в реальном течении. Моделирование осцилляций системы ПВ находится за пределами возможностей метода RANS.

Установлено, что при использовании схем второго порядка точности практически сошедшее по сетке решение с множественными ПВ достигается на сетках размерностью около полутора миллионов ячеек, при этом характерный размер ячеек  $\Delta^*$  перед препятствием в области образования основного подковообразного вихря, должен быть на 2-3 порядка меньше, чем диаметр передней кромки. Модель MSST обеспечивает хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными для величин  $\lambda_s$  и  $\lambda_0$ , особенно при использовании версии 2003 года. Результаты расчетов в соответствии с экспериментами воспроизводят полосчатые неоднородности в распределении числа Стантона перед цилиндром (рис.3, 4), возникающие в местах образования множественных подковообразных вихрей. При использовании пакета ANSYS-CFX установлено, что изменение  $Y^+$  на торцевой стенке в диапазоне  $0.1 \div 1$  значительно влияет на распределение числа Стантона, получаемое по модели MSST.

Показано, что учет поправки на кривизну линий тока в модели MSST существенно (почти на порядок) снижает турбулентную вязкость в ядре основного подковообразного вихря, а также приводит к получению дополнительных

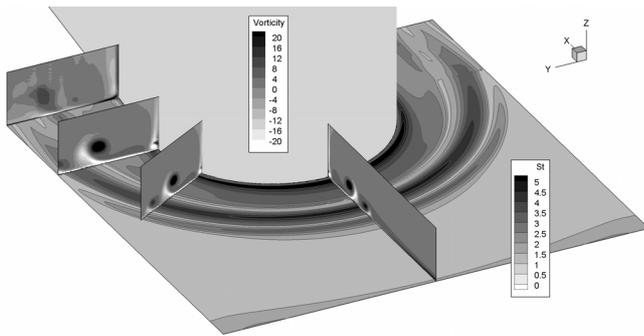


Рис.3. Завихренность в вертикальных сечениях и распределение числа Стантона на торцевой стенке: ПК SINF, модель MSST с поправкой на кривизну линий тока, 5 млн. ячеек.

грубой сетке результатах, ослабляется при ее измельчении вплоть до полного отсутствия эффекта при использовании наиболее подробной сетки. Снижение уровня турбулентной вязкости при учете поправки также усиливается с измельчением расчетной сетки. Результаты численного моделирования системы подковообразных вихрей указывают на значительное снижение вязкости в ядрах вихрей, что позволяет им интенсифицироваться при измельчении сетки, и препятствует получению сошедшего по сетке решения. В целом, сделан вывод о негативном влиянии поправки.

артефактных ПВ; амплитуда пространственных осцилляций в распределении числа Стантона в области образования третичного ПВ значительно переоценивается.

Чувствительность результатов расчетов к поправке на кривизну линий тока меняется при измельчении сетки: например, положительное влияние поправки на положение ядра основного ПВ, особенно заметное в полученных на

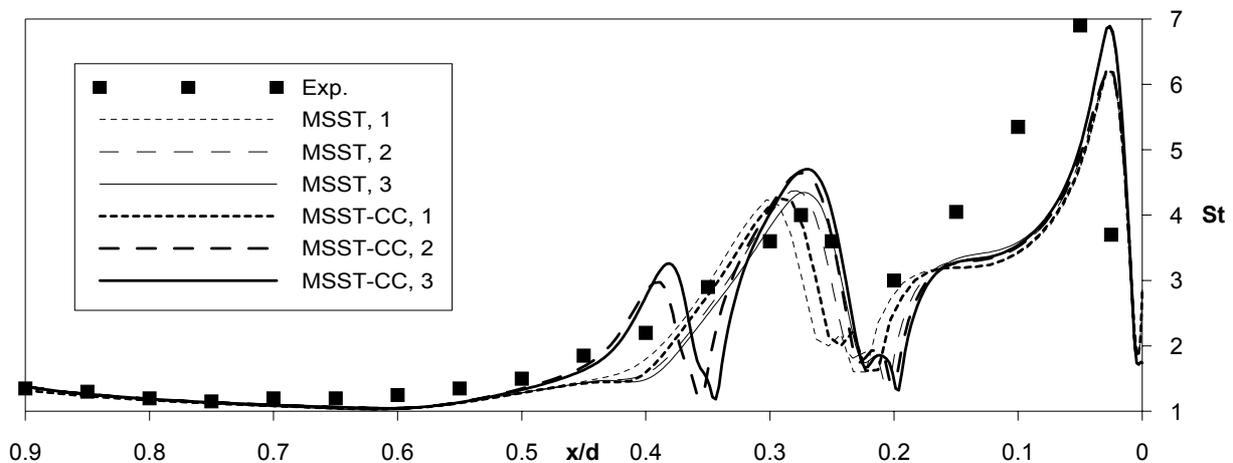


Рис.4. Распределения числа Стантона вдоль линии симметрии, сравнение экспериментов и расчетов SINF: эксперименты и расчеты по моделям MSST и MSST-CC на разных сетках.

В третьей главе рассматривается течение и торцевой теплообмен в межлопаточных каналах решеток турбомашин. В разделе 3.1 представлен обзор литературы по данной тематике: приведены схемы вторичных течений, предложенные разными авторами, а также проанализированы экспериментальные и расчетные работы. Дана краткая характеристика трех крупномасштабных моделей решеток цилиндрических лопаток, для которых имеются детальные экспериментальные данные о структуре течения и локальной теплоотдаче. Последующие разделы данной главы диссертации посвящены RANS-расчетам, выполненным для геометрических и граничных условий

этих экспериментальных тестов. Описания постановок и результатов расчетов в каждом разделе предваряются подробным описанием экспериментов и обзором литературы, посвященной расчетным работам в условиях каждого из тестов.

Все расчеты выполнены в предположении о периодичности течения по шагу решетки и о симметрии относительно полувысоты межлопаточного канала. Использовались трехблочные расчетные сетки Н-О-Н структуры. При выполнении всех расчетов течения в решетках, как и при расчетах обтекания цилиндра во второй главе, выполнялось доопределение входных граничных условий. Здесь задавались распределения вектора скорости и параметров турбулентности, полученные в результате предварительных расчетов двумерного пограничного слоя в плоскопараллельном канале, с применением соответствующей основному расчету модели турбулентности.

В разделе 3.2 рассматривается низкоскоростное течение (число Маха на входе  $\approx 0.1$ ) в решетке Лэнгстона [Langston, L.S. *et al.*-ASME J. of Eng. for Pow. 1977. Vol. 99. P. 21-28] (рис.5). Эксперименты на данной решетке были выполнены при двух толщинах входных пограничных слоев, условно обозначаемых как «толстый» и «тонкий». Расчетные сетки в данной диссертационной работе содержали до 1.5 млн. ячеек (величина характерного размера ячеек  $\Delta^*$  у передней кромки в области образования основного подковообразного вихря здесь в 150 раз меньше осевой хорды лопатки).

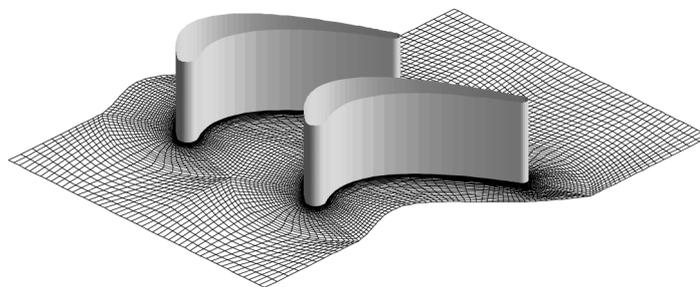


Рис. 5. Решетка Лэнгстона: межлопаточный канал и расчетная сетка на торцевой стенке.

На первом этапе (2002-2003 гг.) расчетов при использовании расчетных сеток размерностью около 300 тыс. ячеек и разных моделей турбулентности было установлено, что расчеты позволяют качественно верно предсказать экспериментально наблюдаемую структуру течения в межлопаточном канале. Однако отдельные детали течения и особенности торцевого теплообмена воспроизводятся неудовлетворительно.

При последующих расчетах на сетках с числом ячеек более миллиона было установлено, что вихревая структура течения и локальная теплоотдача на торцевой стенке весьма чувствительны к выбору модели турбулентности, особенно в случае толстого пограничного слоя на входе в решетку. Применение модели  $k-\omega$  приводит к упрощенной структуре вторичных течений, как на входе, так и в самом межлопаточном канале (рис.6, б). Как и в случае течения, рассмотренного в разделе 2.4, это обусловлено по-

вышенным уровнем эффективной вязкости, предсказываемым данной моделью для внешней части натекающего на лопатку торцевого пограничного слоя.

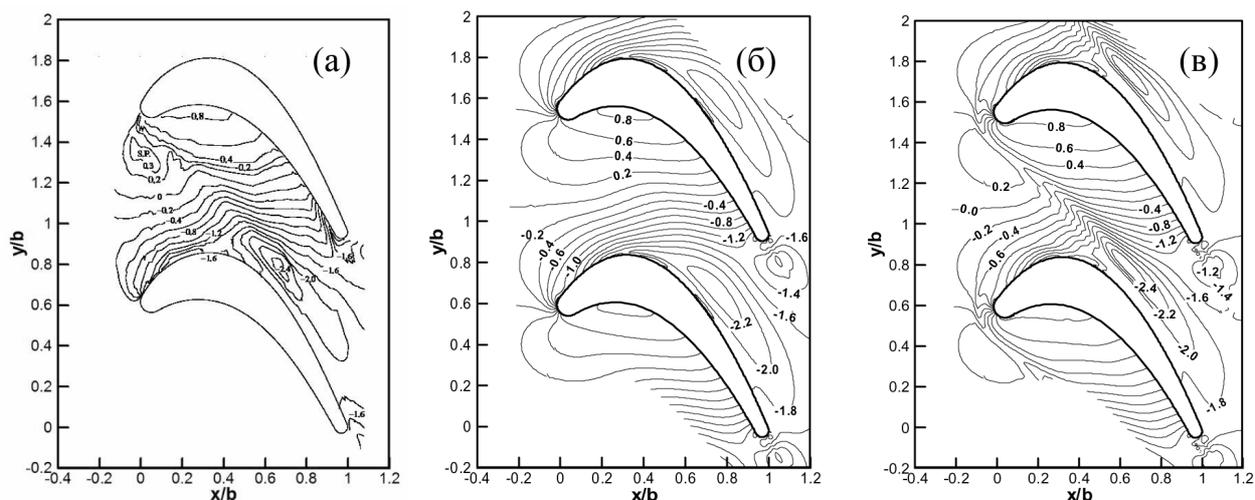


Рис. 6. Распределения коэффициента статического давления  $C_p$  на торцевой стенке (толстый пограничный слой): (а) – эксперименты, (б) – расчеты по модели  $k-\omega$ , (в) – расчеты по модели MSST-2003.

Использование модели MSST позволяет хорошо воспроизвести сложную вихревую структуру течения в решетке, а также распределение локального коэффициента потерь полного давления. Локальные характеристики теплоотдачи также лучше предсказываются по модели MSST. Мера соответствия расчетных результатов экспериментальным данным выше в случае тонкого входного пограничного слоя, этот вывод относится к расчетам по обеим моделям турбулентности.

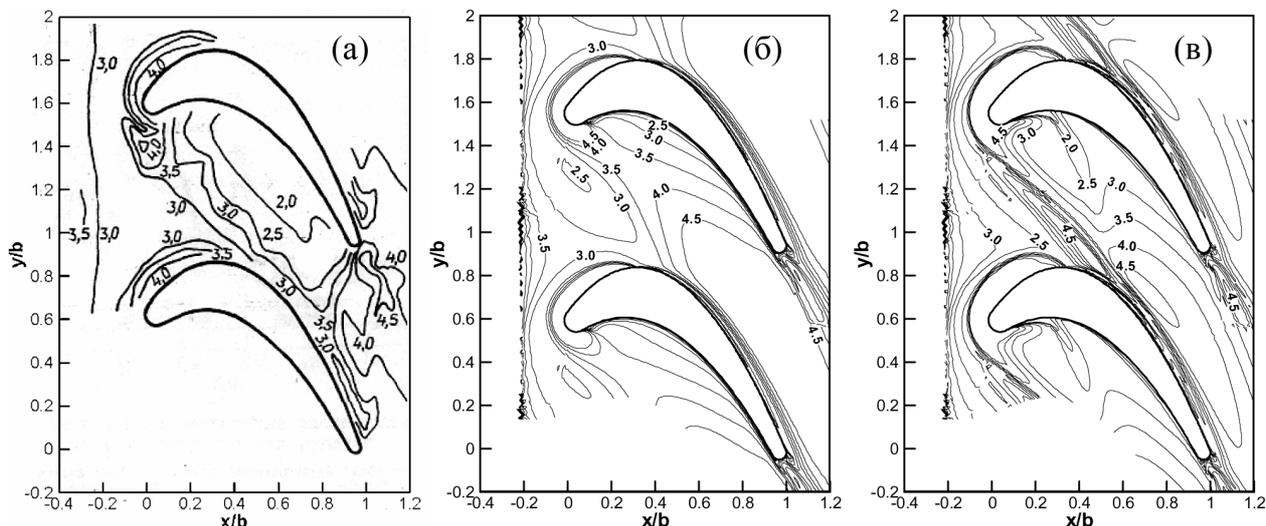


Рис. 7. Изолинии числа Стантона  $St \times 10^3$  на торцевой стенке (толстый пограничный слой): (а) – эксперименты, (б) – расчеты по модели  $k-\omega$ ; (в) – расчеты по модели MSST-2003.

С учетом сложности моделируемых явлений, меру согласованности расчетных результатов по торцевой теплоотдаче (рис.7) с экспериментальными можно считать удовлетворительной. Предполагается также, что расхождения качественного характера между расчетным и экспериментальным распределениями числа Стантона на

участке торцевой стенки за выходом из межлопаточного канала связаны с принципиальной невозможностью адекватно смоделировать турбулентный теплообмен в этой области в рамках стационарной постановки.

В разделе 3.3 представлены результаты численного моделирования низкоскоростного течения и торцевого теплообмена в решетке утолщенных сопловых лопаток, экспериментально исследованной в работе [Kang M.V. *et al* – J. of Turbomach. – 1999. – vol. 121. – pp. 558-567] при двух значениях числа  $Re$ .

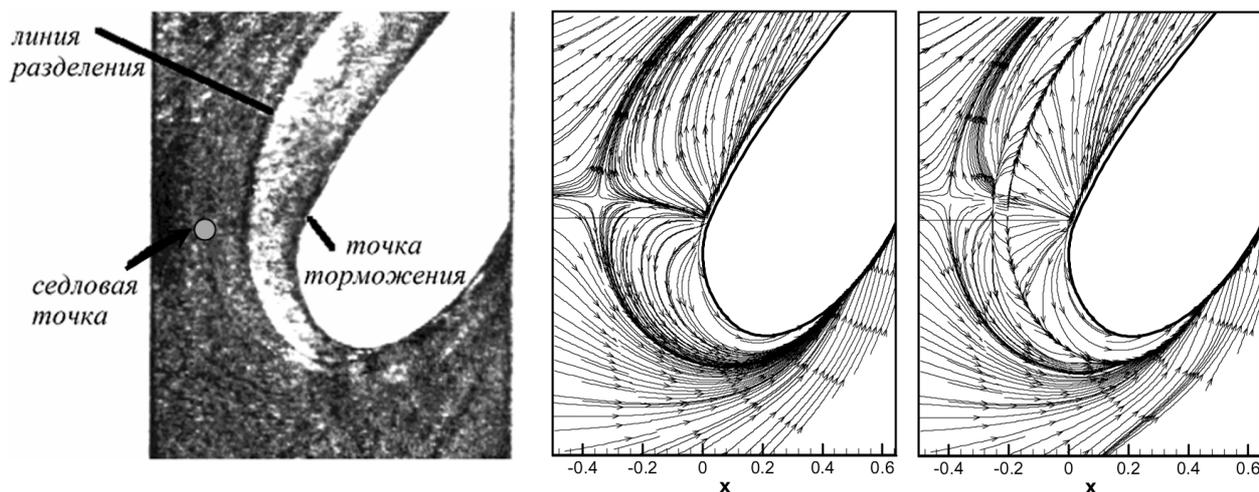


Рис. 8. Картина «донного» течения у торцевой стенки при  $Re=1.2 \cdot 10^6$ : эксперименты и расчеты по моделям  $k-\omega$  и MSST.

В отличие от модели  $k-\omega$ , дающей упрощенную модель течения, модели S-A и MSST дают качественно схожие между собой и с экспериментом картины приторцевого течения вблизи передней кромки лопатки: воспроизводятся не только основной ПВ, но и несколько соседствующих с ним вихрей (рис.8). Выполненное сопоставление расчетных и экспериментальных распределений числа Стантона не позволило составить однозначного заключения о применимости использованных моделей турбулентности для предсказания особенностей локального торцевого теплообмена в данной конфигурации, как по причине выявившейся противоречивости отдельных экспериментальных данных, так и недостаточной обоснованности наложения периодических граничных условий в вычислительной модели (фактически, в экспериментах решетка моделировалась одной лопаткой и профилированными стенками рабочего канала). Вместе с тем, общая тенденция роста и достигаемый уровень коэффициента теплоотдачи по мере входа в «межлопаточный» канал предсказываются удовлетворительно всеми тремя моделями.

Раздел 3.4 посвящен расчетам (по коду SINF) для условий экспериментов на трансзвуковой решетке NASA GRC [Giel P.W. *et al* – J. of Turbomach., vol. 120, no.2, pp. 305-313]. Течение и теплообмен рассматривались при  $Re=10^6$  и двух значениях числа Маха на выходе (0.98 и 1.32).

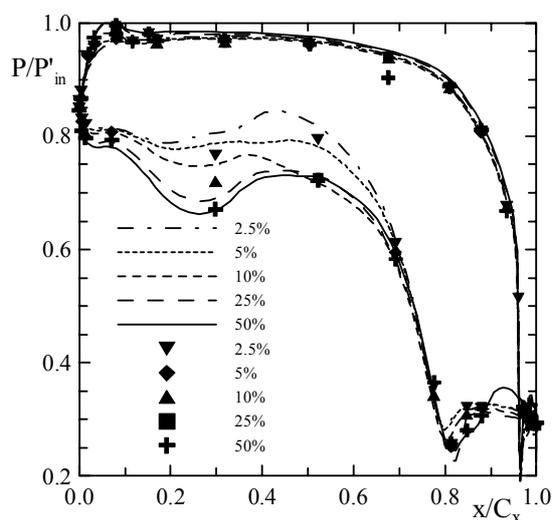


Рис.9. Распределения статического давления на поверхности лопатки, полученные при  $M_{exit}=1.32$ : символы - данные эксперимента, линии - расчеты; в процентах указано относительное расстояние от торцевой стенки до сечения лопатки.

Предварительные расчеты, выполненные с применением трех моделей турбулентности ( $k-\omega$ , MSST и  $v^2-f$ ) на сетках размерностью порядка 300 тыс. ячеек, во всех случаях показали корректное воспроизведение влияния торцевых эффектов на распределение давления по лопатке (рис.9). Однако, как и в случае низкоскоростного течения в решетке Лэнгстона, структура приторцевого пограничного течения и теплообмена оказались чрезвычайно чувствительными к выбору модели турбулентности. Наибольшие различия наблюдаются вблизи передней кромки лопатки, а также у стороны давления. Для последующего анализа были выбраны модели  $k-\omega$  и MSST.

Результаты расчетов с использованием модели турбулентности MSST значительно более чувствительны к измельчению сетки (наиболее подробная имела 1.2 млн. ячеек), чем для модели  $k-\omega$ , особенно это касается течения и теплообмена в области вблизи передней кромки лопатки выше по потоку, где формируются подковообразные вихревые структуры. Это иллюстрируется на рис. 10.

Отмечается, что измельчение сетки не приводит к значительному улучшению соответствия результатов экспериментов и расчетов. Применение той или иной модели турбулентности дает разные особенности результирующей картины, но некоторые эффекты не воспроизводятся (рис.11).

### В заключении

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

1) Выполнены многовариантные расчеты стационарного ламинар-

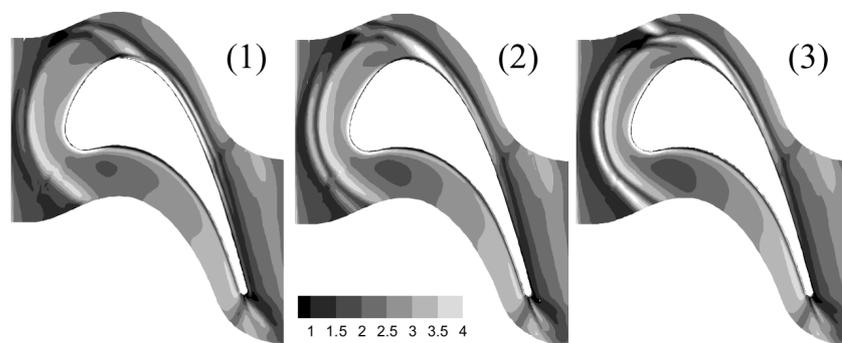


Рис.10. Распределения числа Стантона на торцевой стенке (ПК SINF, модель MSST): (1) -  $C_x/\Delta^* \approx 45$ , (2) -  $C_x/\Delta^* \approx 60$ , (3) -  $C_x/\Delta^* \approx 100$ , где  $C_x$  - ширина решетки.

ного течения в окрестности цилиндра, установленного на пластине и снабженного кормовым обтекателем, на поверхности последнего задавался отсос, стабилизирующий картину обтекания. Получены новые данные, позволяющие оценить условия образования множественных подковообразных вихрей в ламинарном пограничном слое, натекающем на сочлененное с пластиной цилиндрическое тело.

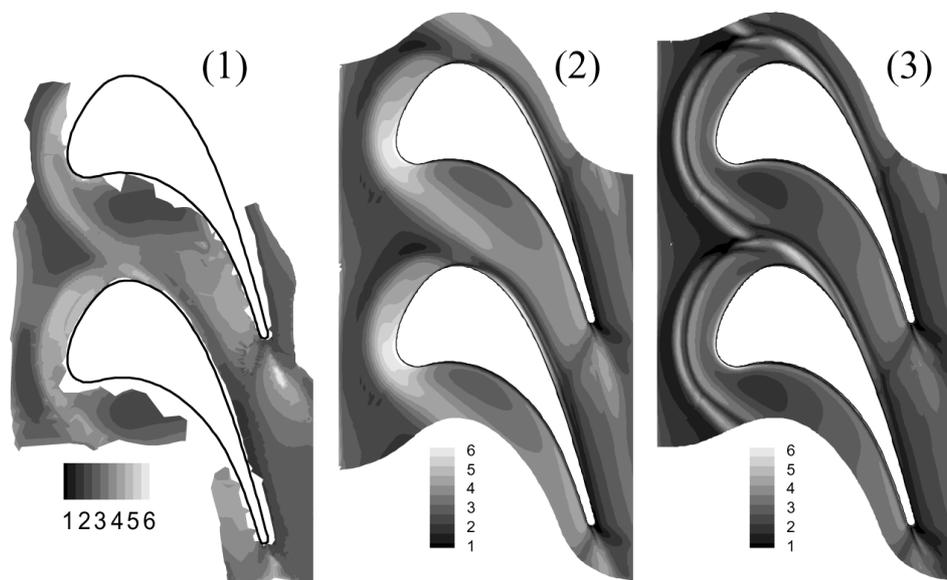


Рис.11. Распределения числа Стантона на торцевой стенке (ПК SINF): (1) – эксперименты, (2) – модель  $k-\omega$ , (3) – модель MSST.

2) Исследовано влияние периодического схода вихрей с обтекаемого (при числах Рейнольдса от 500 до 1500) кругового цилиндра на систему подковообразных вихрей, развивающихся в натекающем ламинарном пограничном слое. Показано, что в области перед цилиндром пульсации скорости на полтора-два порядка меньше (максимум пульсаций расположен вблизи оси основного подковообразного вихря), топология вихревой структуры сохраняется во времени, а линия отрыва натекающего пограничного слоя практически неподвижна.

3) Показано, что предсказываемая вихревая структура приторцевого потока перед одиночным профилем или лопаткой турбинной решетки сильно зависит от используемой модели турбулентности, фактически же – от изменяющегося при смене модели уровня эффективной вязкости во внешней части турбулентного пограничного слоя.

4) Проведены многовариантные расчеты турбулентного течения вблизи закрепленного на обогреваемой пластине цилиндра с кормовым обтекателем, результаты расчетов сопоставлены с детальными, недавно появившимися в литературе экспериментальными данными. Установлено, что два примененных в этих расчетах гидродинамических кода на наиболее подробных ссеках дают практически совпадающие результаты. В целом, удалось хорошо воспроизвести сложную вихревую структуру течения вблизи передней кромки препятствия, включая размеры и положение множественных подковообразных вихрей. Уровень и полосчатая картина

локальной теплоотдачи на торцевой стенке перед цилиндром предсказываются удовлетворительно. Переоценка по сравнению с осредненной экспериментальной картиной амплитуды пространственных осцилляций числа Стантона в области образования ПВ вызвана сглаживающим влиянием низкочастотной нестационарности системы ПВ, развивающейся в реальном течении. Моделирование этого явления находится за пределами возможностей методики RANS.

5) С применением различных гидродинамических кодов выполнены систематические и сопоставительные расчеты трехмерного турбулентного течения и теплообмена для трех модельных решеток турбомашин (низкоскоростного течения в решетке Лэнгстона и решетке утолщенных сопловых лопаток, а также трансзвукового течения), для которых в литературе имеется большой объем экспериментальных данных. Проведен подробный анализ особенностей вторичных течений в межлопаточных каналах решеток турбомашин, а также взаимосвязи структуры течения и особенностей локальной теплоотдачи на торцевой стенке.

6) При использовании численных схем второго порядка пространственной дискретизации и сеток размерностью около полумиллиона ячеек оказывается возможным получить практически сошедшиеся по сетке поля статического и полного давлений, независимо от выбранной модели турбулентности. Однако в случае моделей, которые в принципе обеспечивают возможность предсказания структуры из трех и более подковообразных вихрей, для получения сеточно-независящей картины локальной теплоотдачи требуется в несколько раз увеличить число ячеек сетки. В целом, можно утверждать, что, применяя гидродинамические коды второго порядка точности, желательно иметь два и более миллионов ячеек в расчете на полный межлопаточный канал для получения обоснованного заключения о предсказательных возможностях той или иной модели турбулентности применительно к рассматриваемому классу трехмерных течений с теплообменом.

#### ***Основные результаты диссертации опубликованы в работах:***

1. Иванов Н.Г. Расчет трехмерного течения и теплообмена в экспериментальной модели решетки рабочих лопаток на основе одно- и двухпараметрических моделей турбулентности / Н.Г.Иванов, А.М.Левченя, В.В.Рис, Е.М.Смирнов // Труды Третьей Российской национальной конференции по теплообмену. Том 2. - Москва: Издательство МЭИ, 2002. - с.147-150.

2. Левченя А.М. Применение k- $\omega$  модели турбулентности к расчету трехмерного трансзвукового течения и торцевого теплообмена в решетке турбинных профилей / А.М.Левченя // В кн.: Проблемы газодин. и теплообмена в энергет. устан. Том II.- М.: Изд-во МЭИ, 2003. - с.110 - 113.

3. Левченя А.М. Тестирование моделей турбулентности применительно к расчетам трехмерного течения и торцевого теплообмена в решетках утолщенных сопловых лопаток / А.М.Левченя, В.В.Рис, Е.М.Смирнов // В кн.: Четвертая Российская Национальная Конференция по Теплообмену. Труды конференции. Том II (Вынужденная конвекция однофазной жидкости). - М.: Изд-во МЭИ, 2006. - с. 167-170.

4. Levchenya A.M. CFD-analysis of 3d flow structure and endwall heat transfer in a transonic turbine blade cascade: effects of grid refinement / A.M.Levchenya, E.M.Smirnov // CD-ROM Proc. of West-East High Speed Flow Field Conference - WEHSFF'07. Moscow: TsAGI's Publishing Group, 2007. 12 P.

5. Левченя А.М. Численное моделирование трехмерного потока, обтекающего круговой цилиндр в области его сочленения с гладкой стенкой / А.М.Левченя, Е.М.Смирнов // В кн.: Всероссийский семинар по аэрогидродинамике, посвященный 90-летию со дня рождения С.В. Валландера: избранные труды всероссийского семинара, - СПб, 2008. - с. 64-69.

6. Левченя А.М. Численное моделирование турбулентного течения и теплообмена в области сочленения пластины и закрепленного на ней симметричного тела с утолщенной лобовой частью / А.М.Левченя // В кн.: Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях. Том 2.- М.: Изд-во МЭИ, 2009. - с.90 - 93.

7. Levchenya A.M. RANS-based Numerical Simulation and Visualization of the Horseshoe Vortex System in the Leading-Edge Endwall Region of a Symmetric Body / A.M.Levchenya, E.M.Smirnov, V.D.Goriatchev // Proceedings of the 14th International Conference on Fluid Flow Technologies (Conference on Modelling Fluid Flow, CMFF'09). Budapest, Hungary, September 9-12, 2009. 8 P.

8. Levchenya A.M. Numerical Simulation of the Endwall Heat Transfer in the Langston Cascade / A.M.Levchenya, E.M.Smirnov, D.K.Zaytsev // Int. Symp. on Heat Transfer in Gas Turbine Systems 9 - 14 August, 2009, Antalya, Turkey. CD-ROM proceedings, paper 9-EW, 8 P.

9. Левченя А.М. Численное исследование трехмерного турбулентного течения и торцевого теплообмена в крупномасштабной решетке рабочих турбинных лопаток / А.М.Левченя, Е.М.Смирнов // Теплофизика высоких температур, 2010, том 48, № 1, с. 62–73 (**перечень ВАК**).

10. Aleksander Levchenya. Numerical Analysis of the Multiple-horseshoe-vortex Effects on the Endwall Heat Transfer in the Leading-edge Region of a Symmetric Bluff Body Board / A.M. Levchenya, E.M.Smirnov // Int. Heat Transfer Conference, 8 - 13 August, 2010, Washington D.C., USA. CD-ROM proceedings, paper IHTC-22655, 8 P.