

На правах рукописи

КИТАНИНА Екатерина Эдуардовна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА
ПРИ СВОБОДНОЙ И СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ
В БЫСТРОВРАЩАЮЩИХСЯ КОЛЬЦЕВЫХ ПОЛОСТЯХ

Специальность 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург 2002

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном техническом университете.

Научный руководитель: кандидат технических наук,
доцент Рис В.В.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Вохмянин С.М.

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник Никулин Д.А.

Ведущая организация: Институт высоких температур РАН.

Защита состоится « » _____ 2002 года в _____ часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.06 в Санкт-Петербургском государственном техническом университете (195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, гл. здание, ауд.).

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Санкт-Петербургского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » _____ 2002 года.

Учёный секретарь диссертационного совета,
доктор технических наук,
профессор

Кортиков Н.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность проблемы

Течения неизотермических сред в полях массовых сил, вызванных плавучестью и вращением, чрезвычайно многообразны по своим проявлениям и постоянно привлекают внимание исследователей.

Свободно- и смешанноконвективные течения в замкнутых и проточных быстровращающихся полостях, где эффекты плавучести связаны с центробежным ускорением, характерны для междисковых пространств роторов высокотемпературных газовых турбин и высоконапорных осевых компрессоров.

Совершенствование энергетических газотурбинных двигателей и установок идет по пути повышения рабочих параметров: степени повышения давления в осевом компрессоре и температуры газа перед турбиной. При этом температура воздуха на выходе из компрессора достигает 700°C , а температура газа перед турбиной превышает 1400°C . Высокая температура рабочих сред приводит к экстремальным термическим напряжениям и деформациям в лопаточных аппаратах и в элементах роторов компрессора и турбины. При неравномерном радиальном нагреве термические напряжения в дисках роторов приводят к ухудшению свойств материалов и к разрушению дисков, поэтому достоверный расчет их температурного состояния - необходимое условие обеспечения требуемого запаса прочности. Радиальные термические деформации роторов непосредственно влияют на один из существенных видов потерь, снижающих *кпд* и ухудшающих экономичность турбомашин: перетекание рабочей среды через зазоры в уплотнениях между ротором и статором. Тепловое состояние элементов ротора в значительной мере зависит от конвекции в междисковых полостях.

Проблема правильного расчета конвективного теплообмена в замкнутых и проточных полостях в условиях, характерных для междисковых полостей роторов газотурбинных установок, в настоящее время недостаточно решена. Высокие требования, предъявляемые к точности результатов расчетов, сложная пространственная конфигурация теплонапряженных деталей и возможная нестационарность течения и теплообмена определяют практическую актуальность и перспективность численного моделирования конвекции в междисковых полостях.

Цель работы

Работа нацелена на исследование течения и теплообмена газа в быстровращающихся кольцевых полостях в условиях, характерных для междисковых полостей роторов осевых компрессоров и газовых турбин. Поставленная цель достигается путем методически отработанного численного моделирования

1) стационарных, квазипериодических и стохастических режимов свободной конвекции в полых и разделенных на секторы замкнутых полостях в широком диапазоне изменения режимных и геометрических параметров;

2) стохастического режима смешанной конвекции в вентилируемой полости при значениях режимных параметров, соответствующих известным опытным данным.

Научная новизна работы

1) В случае осесимметричной стационарной свободной конвекции в замкнутых полостях определено влияние на теплообмен изменения формы меридионального сечения и направления теплопереноса через полость.

2) Существенно расширен набор данных о конвекции в замкнутой полости со сплошными перегородками при осевом направлении теплопереноса. Получены данные о влиянии расположения и высоты перегородок на течение и теплообмен. Найдено положение перегородок, при котором наблюдается наибольший уровень теплоотдачи. Определена зависимость средней теплоотдачи от высоты перегородок.

3) Получены статистически представительные данные о трехмерных квазипериодических и стохастических режимах свободной конвекции в 45- и 60-градусных секторах кольцевых полостей, а также в замкнутых и проточных кольцевых полостях при радиальном направлении теплопереноса. Выявлены характерные структуры течения и их эволюция во времени. Показана связь между особенностями течения и теплоотдачей на дисковых поверхностях.

Достоверность полученных результатов

Результаты методических и тестовых расчётов, проведённых в рамках настоящей работы, хорошо согласуются с надёжными экспериментальными и расчётными данными других авторов.

Практическая ценность работы

Получены и систематизированы данные о локальной и средней теплоотдаче для различных режимов течения в быстровращающихся замкнутых и вентилируемых полостях. Сопутствующая информация о полях скорости и температуры помогает лучшему пониманию специфических черт теплопереноса в условиях определяющего влияния эффектов вращения и плавучести.

Локальная теплоотдача во вращающихся полостях характеризуется сильной пространственной неоднородностью, к тому же при нестационарных режимах течения она циклически изменяется во времени. Отмеченные явления должны приниматься во внимание при расчете термонапряженного состояния и деформаций дисков и других деталей роторов высокотемпературных газотурбинных двигателей и установок.

Полученные параметрические зависимости для средней теплоотдачи могут быть использованы в практике инженерных расчетов теплообмена в полостях роторов газовых турбин.

Апробация работы

Основные результаты работы докладывались на российских и международных школах-семинарах и конференциях: XII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (Москва, 1999), Третьей Международной школе-семинаре «Внутрикамерные процессы, горение и газовая динамика дисперсных сред» (С.-Петербург, 2000), XIII Школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепло-массообмена в энергетических установках» (С.-Петербург, 2001), IX Международной конференции по явлениям переноса и динамики во вращающихся установках (Гонолулу, США, 2002), семинаре кафедры теоретических основ теплотехники Санкт-Петербургского государственного технического университета под руководством проф. А.И. Кириллова (С.-Петербург, 2002).

Публикации по теме диссертации

Основные результаты работы изложены в четырех научных публикациях.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 85 наименований. Работа изложена на 154 страницах машинописного текста, включая 10 таблиц и 74 рисунка.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, гранты 98–02–18127, 01–02–16697. Автор выражает искреннюю благодарность проф. Е.М. Смирнову за помощь, оказанную при выполнении работы.

Содержание работы

В первой главе обосновывается актуальность выбранной темы исследования, её научное и практическое значение, проводится обзор известных результатов и постановка задачи настоящего исследования.

Раздел 1.1 посвящен анализу практических аспектов современного состояния проблемы.

В разделе 1.2 подвергнуты анализу и систематизированы результаты исследований течения и теплообмена в замкнутых междисковых полостях. Среди работ, посвященных цилиндрическим полостям, приводится решение автомодельной задачи, полученное Л.А. Дорфманом, и подробно обсуждаются результаты численного моделирования J.W. Chew. Известные исследования конвекции в полых и перегороденных кольцевых полостях сгруппированы в соответствии с постановкой тепловых граничных условий: отдельно рассматриваются теплообмен между дисками и цилиндрическими поверхностями. Анализ экспериментальных исследований проводится на основе работ Л.М. Зысиной-Моложен и Н.Н. Салова, В.К. Щукина и В.В. Олимпиева, D.E. Vohn и др. Большинство известных работ по численному моделированию принадлежит исследовательской группе под руководством D.E. Vohn.

Раздел 1.3 содержит обзор известных исследований течения и теплообмена в вентилируемых полостях. Из обширного многообразия вентилируемых полостей выбраны полости с осевым протоком воздуха между валом и ступицами дисков. Сложившееся представление о режимах течения в обогреваемых и необогреваемых полостях базируется на результатах, полученных в экспериментах P.R. Farthing и др. Влияние геометрических и режимных параметров на теплоотдачу в полости анализируется на основе экспериментальных данных Н.Н. Салова и D.E. Vohn и др. Наибольшие успехи в численном моделировании достигнуты С.А. Long и P.G. Tucker.

Раздел 1.4 содержит выводы, сделанные на основе обзора литературы. Установлено, что в замкнутых полостях наиболее полно исследована стационарная свободная конвекция. Полученные результаты относятся к условиям, существенно упрощенным по сравнению с реальными: меридиональные сечения полостей имеют простую прямоугольную форму, на поверхностях дисков задается постоянная температура, остальные поверхности полагаются адиабатически изолированными. Представляются недостаточно исследованными нестационарные режимы свободной конвекции в замкнутых полостях.

Конвекция в вентилируемых полостях с осевым протоком в основном исследовалась экспериментальными методами. Известные примеры численного моделирования служат установлению связи между локальной теплоотдачей и количественными характеристиками течения. Однако адекватность численного моделирования результатам эксперимента еще далеко не достигнута.

Выводы по обзору литературы позволили сформулировать цель настоящего исследования.

Во второй главе рассматриваются математическая модель (раздел 2.1) и численный метод (раздел 2.2), на основе которых были проведены расчеты.

Течение и теплообмен рассматриваются в относительном движении, в системе координат, равномерно вращающейся с постоянной угловой скоростью Ω , равной скорости вращения полости. Нестационарное трехмерное течение вязкой жидкости описывается системой уравнений Навье-Стокса и энергии. В большинстве расчетов (главы 4, 5) используется модель несжимаемой среды с учетом эффектов плавучести в приближении Буссинеска, в главе 3 - модель идеального газа с плотностью, зависящей от температуры. При заданной геометрии, определяющими параметрами свободной конвекции в замкнутой полости служат число Прандтля, температурный фактор $\varepsilon_T = 2 \cdot (T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min})$ и число Релея $Ra = Pr \cdot \varepsilon_T \cdot \Omega^2 \cdot H^4 / \nu^2$, здесь H – характерный размер полости. В вентилируемой полости дополнительно используется число Рейнольдса $Re_z = U_m \cdot H / \nu$, характеризующее интенсивность вынужденного течения охладителя.

Характерной особенностью вращающихся жидкостей является ключевая роль, оказываемая течением в пограничных слоях, формирующихся на дисковых поверхностях (слоях Экмана), на невязкое течение в ядре. В разделе 2.1 последовательно рассматриваются особенности, характерные для этих зон.

Расчеты, выполненные в рамках настоящей работы, проводились с использованием программного комплекса SINF-2, разработанного на кафедре гидроаэродинамики СПбГТУ под руководством проф. Е.М. Смирнова. Процедура расчета основана на методе искусственной сжимаемости. Уравнения Навье-Стокса и энергии в эволюционной форме решаются по неявной разностной схеме второго порядка точности. Дискретизация пространственных операторов производится по методу контрольного объема со вторым порядком точности. Для решения эволюционной задачи по псевдовремени используется неявный метод первого порядка точности. Для расчета конвективных слагаемых применяется неявная разностная схема высокого порядка точности. Расчеты выполнялись на сгущенных структурированных многоблочных сетках, вписанных в границы области течения.

В третьей главе рассматриваются осесимметричные течения и теплообмен в кольцевых полостях. Расчеты проводились с использованием криволинейных, сгущенных к границам области сеток размерностью порядка 8000 ячеек.

Раздел 3.1 содержит результаты методических расчетов и сопоставления с известными экспериментальными и расчетными данными. Рассматриваются осесимметричные течения, возникающие под воздействием силы плавучести во вращающейся кольцевой полости (рис. 1, а) с разнноагретыми изотермическими дисками. Цилиндрические поверхности полости полагаются теплоизолированными. Вследствие неравномерного распределения плотности в поле центробежной силы в меридиональном сечении полости возникает циркуляционное течение. Наиболее интенсивное движение наблюдается вблизи дисковых поверхностей в слоях Экмана. Максимумы ло-

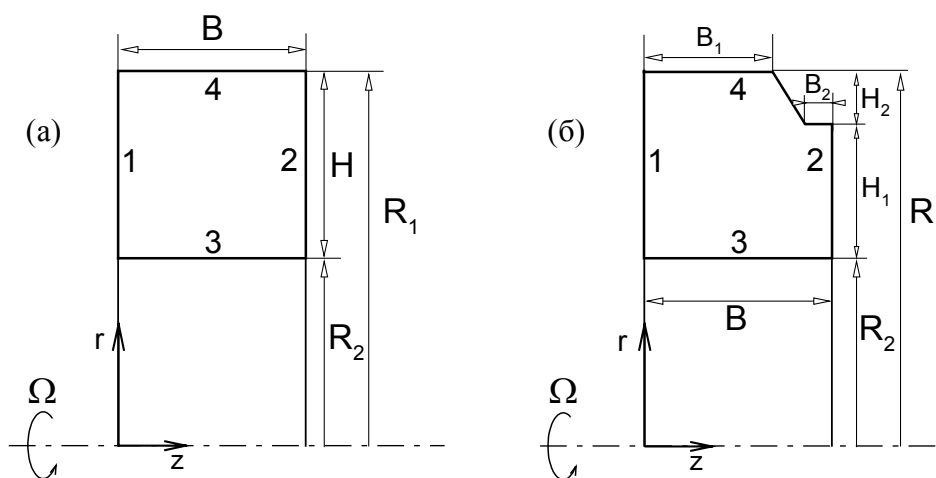


Рис. 1. Кольцевые полости с прямоугольным (а) и полигональным (б) меридиональным сечением. 1, 2 - поверхности дисков, 3, 4 - внутренняя и внешняя цилиндрические поверхности.

кальной теплоотдачи охлажденного и нагретого дисков смещены в радиальном направлении к оси вращения и к периферии полости соответственно. При увеличении Ra распределение скорости стремится к однородности в направлении оси вращения. Неоднородность распределения параметров сосредотачивается в экмановских слоях. Интенсивность меридиональной циркуляции уменьшается, что связано с уменьшением толщины слоев Экмана.

Сопоставление с данными работы [D. Bohn и др. ASME J. of Turbomachinery. 1994. Vol. 116. P. 542-547.] проводилось при следующих значениях геометрических и режимных параметров: $R_1/R_2 = 9/7$, $R_1 - R_2 = B$, $Ra = 1,3 \cdot 10^8 \div 6,6 \cdot 10^9$, $Pr = 0,66$, $\varepsilon_T = 0,11$. Значения средних чисел Нуссельта, полученные при численном моделировании D. Bohn и др. и в наших расчетах, хорошо согласуются между собой и обобщаются зависимостью $\overline{Nu} = 0,024 \cdot Ra^{0,269}$. Расхождение с экспериментом увеличивается с ростом числа Релея. В качестве одной из причин расхождения называется отмеченная в работе D. Bohn и др. погрешность эксперимента, связанная с неполной тепловой изоляцией цилиндрических поверхностей.

В разделе 3.2 сравниваются особенности конвекции в полостях с прямоугольной (рис. 1, а) и полигональной (рис. 1, б) формой меридионального сечения. Геометрия полигонального сечения ($R_1/R_2 = 1,64$, $(R_1 - R_2)/B = 1,12$, $B_1/B = 0,58$, $B_2/B = 0,16$, $H_1/B = 0,86$) выбрана в соответствии с вариантом конструкции междисковой полости в роторе газовой турбины. Дисковые поверхности полагаются изотермическими, на цилиндрических поверхностях и на поверхности выступа полигона ставятся адиабатические условия. Расчеты выполнены при $Ra = 1,3 \cdot 10^8$, $Pr = 0,69$, $\varepsilon_T = 0,11$.

Показано, что меридиональное обтекание выступа полигона создает поперек полости свободное сдвиговое течение, аналогичное слою Стюартсона. Распределения локальной теплоотдачи, полученные для полостей с прямоугольным и полигональным сечениями, практически совпадают на большей части дисковых поверхностей. Некоторое увеличение теплоотдачи на поверхности нагретого диска связано с возмущением потока в слоях Экмана и Стюартсона. В среднем условия теплообмена в полости полигонального сечения несколько хуже ($\overline{Nu} = 4,31$), чем в полости прямоугольного сечения ($\overline{Nu} = 4,75$).

В разделе 3.3 моделируется конвекция при смешанном направлении теплопереноса через полость ($R_1/R_2 = 2$, $(R_1 - R_2)/B = 1,0$). Заданное распределение температуры

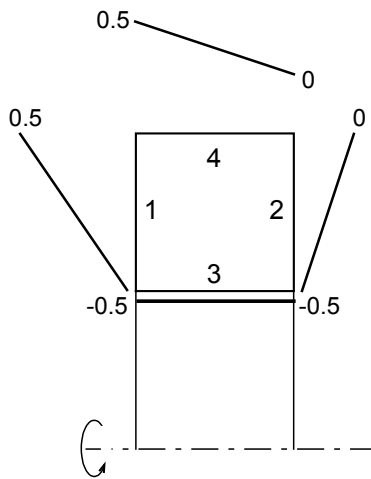


Рис. 2. Распределение безразмерной температуры по поверхностям полости.

Таблица 1. Средние числа Нуссельта на стенках полости

Ra/Pr	1	2	3	4
10^4	-0,07	-0,25	-0,98	0,74
10^6	-0,96	0,01	-1,10	1,28
10^8	-3,39	-0,11	-1,27	3,27
10^{10}	-9,17	-1,90	-1,31	9,04

(рис. 2) можно считать характерным для рабочих условий в газовой турбине, если положить, что рабочее тело протекает над внешней цилиндрической поверхностью 4 в направлении от диска 1 к диску 2. Расчеты проводились при $Ra = 0,69 \cdot 10^4 \div 0,69 \cdot 10^{10}$, $Pr = 0,69$, $\varepsilon_T = 1$.

Установлено, что изменение температурных условий на стенках кардинально меняет распределение локальной теплоотдачи по сравнению с распределениями, полученными в [разделе 3.1](#). Данные о средних значениях чисел Нуссельта для каждой из поверхностей сведены в табл. 1. Благодаря особенности меридиональной циркуляции газа при высоких значениях числа Релея, наиболее интенсивной у пересечения поверхностей 1 и 4, теплота в основном передается от поверхности 4 и близлежащей области диска 1 к остальной части диска 1.

[Четвертая глава](#) посвящена исследованию пространственных течений и теплообмена в кольцевых полостях с радиальными перегородками. При расчетах использовались сгущенные к границам области сетки размерностью до 64800 ячеек.

В [разделе 4.1](#) рассматривается теплообмен между изотермическими дисками в полости ($R_1/R_2 = 5$, $H/B = 1$) с радиальными перегородками. Цилиндрические поверхности и поверхности перегородок полагаются адиабатически изолированными. При $Ra = 1,15 \cdot 10^5$ получены данные для

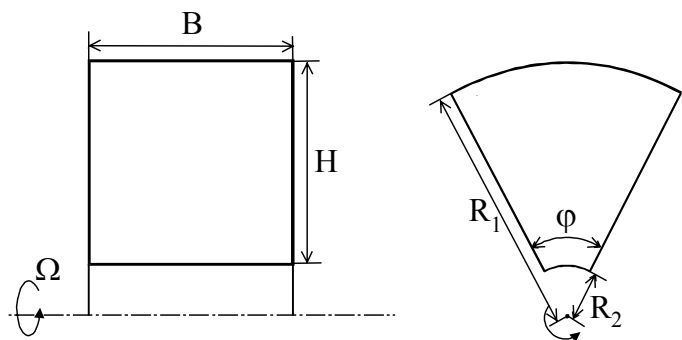


Рис.3. Меридиональное и азимутальное сечения кольцевого сектора.

течения в кольцевых секторах с углом между перегородками $\varphi = 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ$ и 360° . Для сектора с $\varphi = 60^\circ$ расчеты проведены в диапазоне $Ra = 1,15 \cdot 10^5 \div 1,15 \cdot 10^7$.

Под действием вращения в кольцевом секторе возникает окружной перепад давления, формирующий в относительном движении замкнутое одноконтурное циркуляционное течение (рис. 4). Подобная картина течения сохраняется во всем диапазоне исследованных параметров. Максимальная локальная теплоотдача наблюдается в зонах, где циркуляционный поток натекает на диски. Значения средней теплоотдачи для всего расчетного диапазона чисел Релея с большой степенью точности обобщаются зависимостью $\overline{Nu} = 0,108 \cdot Ra^{0,289}$ (табл. 2). Результаты, отражающие влияние угла между перегородками на теплоотдачу в секторе, представлены в таблице 3. Видно, что с увеличением угла раскрытия сектора средняя теплоотдача уменьшается.

Раздел 4.2 посвящен исследованию конвекции в частично перегородженной полости ($R_1/R_2 = 5, H/B = 1, \varphi = 60^\circ$). Постановка тепловых граничных условий аналогична описанной в разделе 4.1. Данные о течении и теплоотдаче получены для трех вариантов расположения перегородок (рис. 5) при значениях режимных параметров $Ra = 0,72 \cdot 10^4 \div 0,72 \cdot 10^6, Pr = 0,72, \varepsilon_T = 1$.

Показано, что пространственные картины течения в полностью и частично перегородженных полостях значительно различаются. В частично перегородженной полости выделяются две характерные области течения: окружные потоки вблизи дисковых

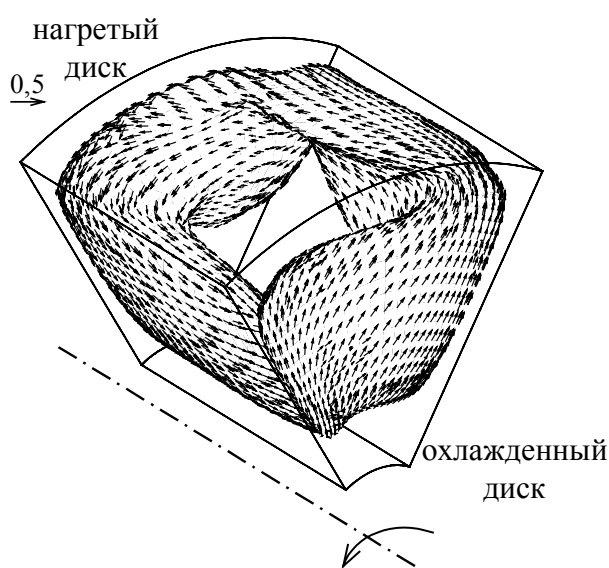


Рис. 4. Течение в секторе с $\varphi = 60^\circ, Ra = 1,15 \cdot 10^5$: векторы скорости на изоповерхности $V = 0,18$.

Таблица 2. Влияние Ra на теплоотдачу в полости с $\varphi = 60^\circ$

Ra	\overline{Nu}
$1,15 \cdot 10^5$	3,12
$4,61 \cdot 10^5$	4,72
$1,04 \cdot 10^6$	5,97
$2,88 \cdot 10^6$	8,03
$6,48 \cdot 10^6$	10,07
$1,15 \cdot 10^7$	11,83

Таблица 3. Влияние φ на теплоотдачу в полости при $Ra = 1,15 \cdot 10^5$

φ	\overline{Nu}
60°	3,12
120°	2,72
180°	2,53
360°	2,26

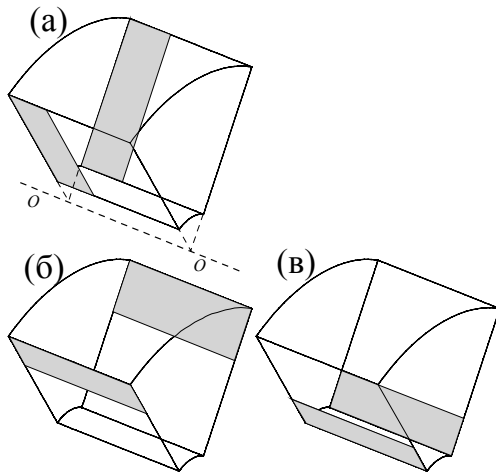


Рис. 5. Расположение перегородок: вблизи нагретой дисковой поверхности (а), вблизи внешней (б) и внутренней (в) цилиндрических поверхностей.

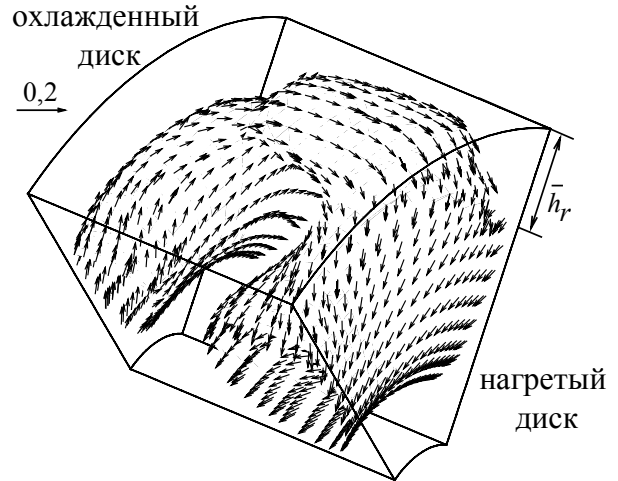


Рис 6. Течение в частично перегородженной кольцевой полости, $Ra = 0,72 \cdot 10^4$: векторы скорости на изо-поверхности $V = 0,07$ (перегородки у внешней цилиндр. пов.).

поверхностей и циркуляционные течения между перегородками (рис. 6). Под влиянием окружающих потоков теплоотдача дисков выравнивается в тангенциальном направлении. В областях, ограниченных перегородками, происходит интенсивное перемешивание, что приводит к местной интенсификации теплообмена. Сопоставление результатов, полученных при различном расположении перегородок высотой $\bar{h}_r = 0,3$ ($\bar{h}_r = h_r / B$) показало, что наибольшие значения \bar{Nu} достигаются, когда перегородки примыкают к нагретой дисковой поверхности (табл. 4). Зависимость \bar{Nu} от высоты перегородок, примыкающих к дисковой поверхности, показана на рис. 7. Видно, что в диапазоне $0,25 \leq \bar{h}_r \leq 0,65$ средняя теплоотдача слабо зависит от высоты перегородок.

В разделе 4.3 численно моделируется свободная конвекция в секторе вращающей-

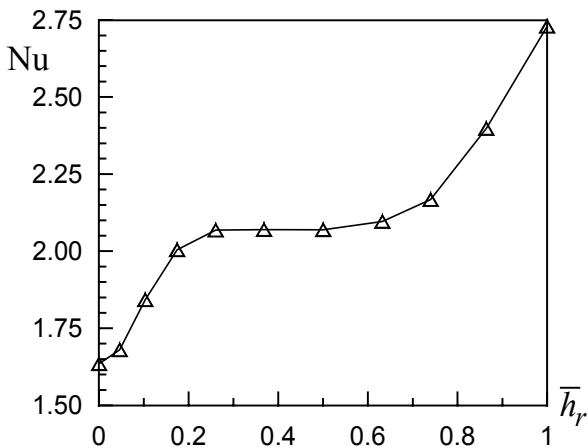


Рис. 7. Зависимость среднего числа Нуссельта от высоты перегородки вблизи диска, $Ra = 0,72 \cdot 10^5$.

Таблица 4. Средние числа Нуссельта для частично перегородженных полостей.

Расположение перегородок согласно рис. 5	Ra		
	$0,72 \cdot 10^4$	$0,72 \cdot 10^5$	$0,72 \cdot 10^6$
(а)	1,25	2,09	3,95
(б)	1,19	1,95	3,85
(в)	1,16	1,69	3,12

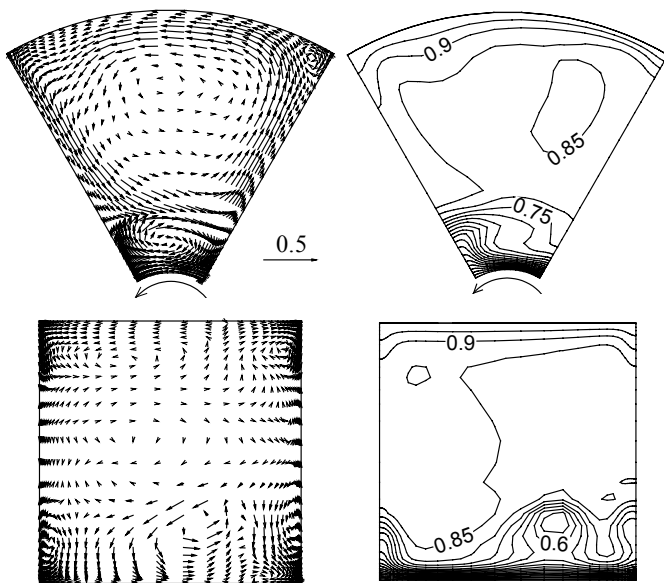


Рис. 8. Моментальные распределения скорости и температуры в азимутальном и меридиональном сечениях сектора, $Ra = 2,88 \cdot 10^6$.

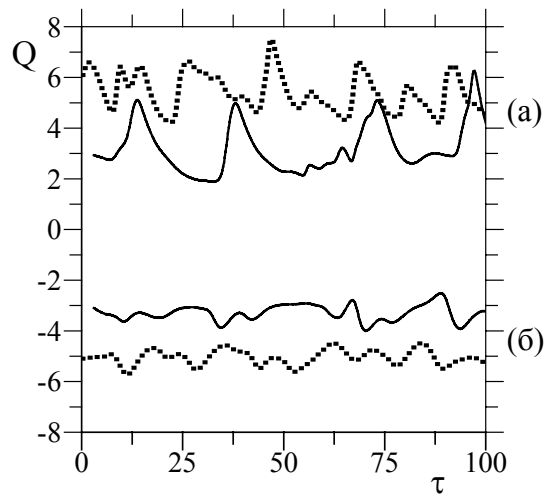


Рис. 9. Изменение во времени полного теплового потока на внешней (а) и внутренней (б) цилиндрических поверхностях. $Ra = 2,88 \cdot 10^6$ - сплошные линии; $Ra = 1,2 \cdot 10^7$ - пунктирные линии.

ся кольцевой полости ($R_1/R_2 = 5$, $V = H$, $\varphi = 60^\circ$). Исследуются режимы течения, возникающего вследствие неустойчивой температурной стратификации в поле центробежной силы при радиальном направлении теплового потока между нагретой внешней и холодной внутренней цилиндрическими поверхностями. Дисковые поверхности и поверхности перегородок полагаются теплоизолированными. Расчеты выполнены для $Ra = 1,2 \cdot 10^5$, $2,88 \cdot 10^6$ и $1,2 \cdot 10^7$, $Pr = 0,72$, $\varepsilon_T = 1$.

При $Ra = 1,2 \cdot 10^5$ наблюдается стационарный режим течения. Значениям $Ra = 2,88 \cdot 10^6$ и $1,2 \cdot 10^7$ соответствуют нестационарные квазипериодические и стохастические режимы свободной конвекции (рис. 8). К особенностям последних можно отнести преимущественно циклональное направление движения в азимутальной плоскости и тенденцию к двумеризации потока. Увеличение Ra не приводит к усилению хаотических компонент движения. Изменение во времени полного теплового потока на цилиндрических поверхностях при $Ra = 2,88 \cdot 10^6$ и $1,2 \cdot 10^7$ показано на рис. 9. Видно, что с ростом Ra период между пиками сокращается, что можно объяснить, принимая во внимание увеличение скорости циркуляции внутри полости. Одновременно, вследствие демпфирования осцилляций скорости, происходит уменьшение амплитуды колебаний. В целом, увеличение Ra сопровождается ростом средней теплоотдачи в секторе.

Сопоставление собственных расчетов с экспериментальным исследованием [D. Bohn, J. Gier. ASME Paper 98-GT-542] выполнено для 45-градусного сектора ($R_1/R_2 = 1,92$, $V/H = 1,04$) при значении режимных параметров $Ra = 10^9$, $Pr = 0,71$,

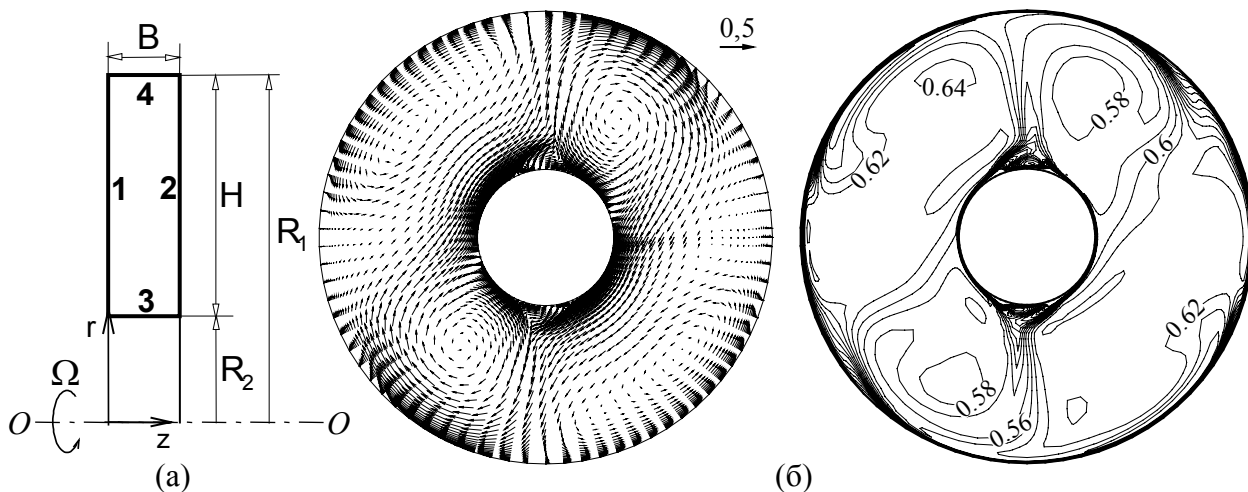


Рис. 10. Меридиональное сечение замкнутой кольцевой полости (а). Мгновенная картина течения в срединной азимутальной плоскости: поля скорости и температуры (б).

$\varepsilon_T = 0,0795$. Средняя теплоотдача, определенная в настоящей работе, составляет $\overline{Nu} = 39,8$ и находится в пределах указанного авторами доверительного диапазона экспериментальных значений ($34,0 \div 46,7$).

Глава 5 посвящена исследованию нестационарных течений и теплообмена в кольцевых полостях. При расчетах использовались одноблочная сетка размерностью 96000 ячеек (раздел 5.1) и четырехблочная сетка размерностью 134000 ячеек (раздел 5.2).

В разделе 5.1 численно моделируется свободная конвекция в замкнутой полости ($R_1/R_2 = 3,33$, $(R_1 - R_2)/B = 3,5$) при значении режимных параметров $Ra = 1,6 \cdot 10^9$, $Pr = 0,7$, $\varepsilon_T = 0,24$. Наиболее горячей полагается внешняя цилиндрическая поверхность ($\theta \approx 1$), внутренняя цилиндрическая поверхность поддерживается при температуре $\theta = 0$. Безразмерная температура дисковых поверхностей монотонно возрастает по радиусу от 0 до 1.

В условиях неустойчивой стратификации плотности в полости развивается нестационарное течение. В азимутальном сечении формируются дрейфующие циклональные и антициклональные вихревые структуры (рис. 10). Между зонами циркуляции развиваются ярко выраженные центробежные и центростремительные течения. Количество вихрей (два циклональных и два антициклональных) не меняется с течением времени, их форма и интенсивность претерпевают незначительные изменения. Угловая скорость вращения структуры в целом, ω , отличается от скорости вращения полости Ω : $\omega/\Omega = 0,92$. Установлено, что передача тепла от дисков к газу происходит на

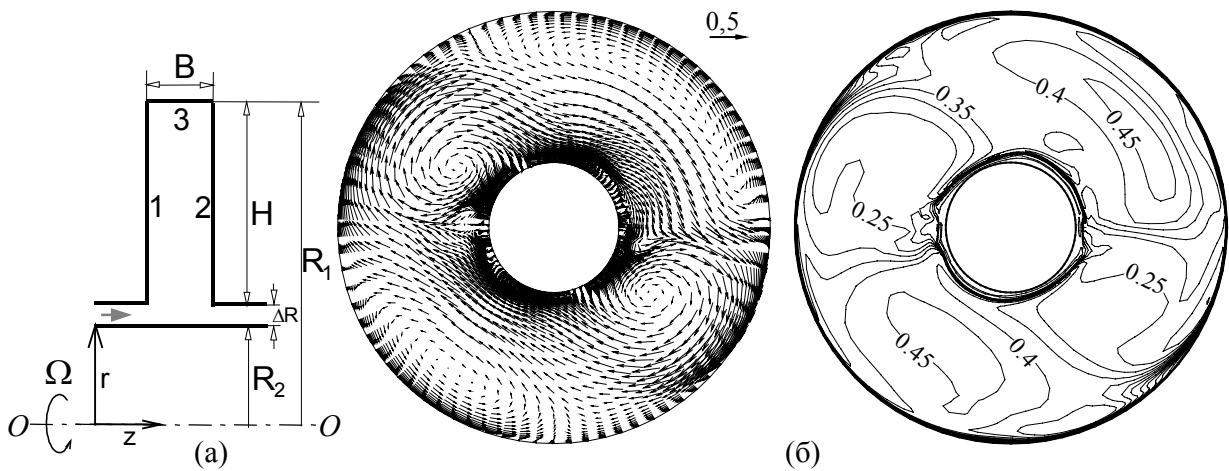


Рис. 11. Меридиональное сечение вентилируемой кольцевой полости с осевым протоком (а). Мгновенная картина течения в срединной азимутальной плоскости: поля скорости и температуры (б).

периферии полости и в областях, омываемых центробежными потоками. Нагретый газ, протекающий вблизи внутренней цилиндрической поверхности и в центростремительных рукавах, отдает тепло дискам. Распределения локальной теплоотдачи на дисках практически симметричны, что объясняется однородностью структуры течения поперек полости.

Раздел 5.2 посвящен численному моделированию смешанной конвекции в вентилируемой кольцевой полости с осевым протоком охладителя (рис. 11). Распределение температуры по стенкам полости близко к описанному в разделе 5.1. Значения геометрических ($R_1/R_2 = 3,33$, $(R_1-R_2)/B = 3,5$, $\Delta R/(R_1-R_2) = 0,064$) и режимных ($Re_z = 1,5 \cdot 10^3$, $Ra = 1,6 \cdot 10^9$, $Pr = 0,7$, $\varepsilon_T = 0,24$) параметров и тепловые граничные усло-

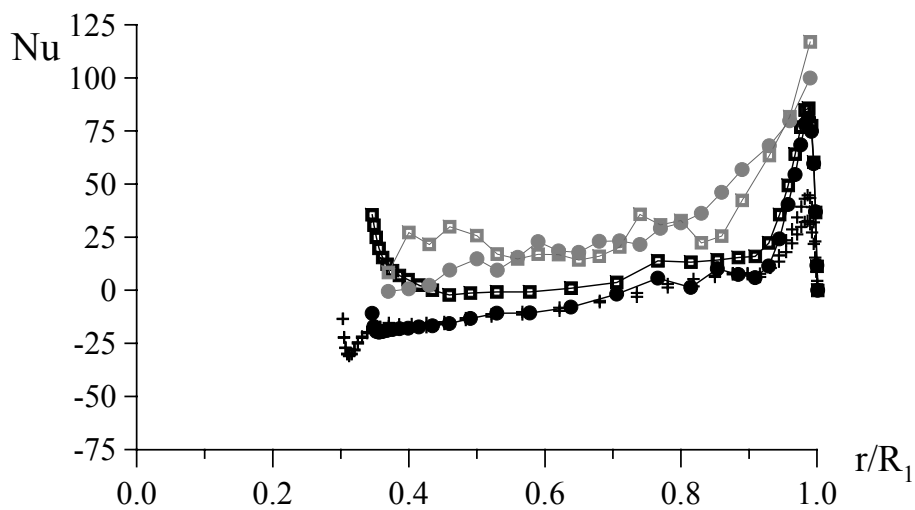


Рис. 12. Осредненное по времени и окружности распределение числа Нуссельта ($Nu = qr/\lambda\Delta T$) по радиусу дисков. Сопоставление результатов численного моделирования для вентилируемой (● - диск 1, ■ - диск 2) и замкнутой (+ - диски 1 и 2) полостей экспериментальными данными Vohn и др. (● - диск 1, ■ - диск 2).

вия задавались в соответствии с условиями эксперимента [D.E. Bohn и др. ASME Paper 2000-GT-28D].

Мгновенные поля скорости и температуры в срединном азимутальном сечении полости показаны на рис. 11. В результате взаимодействия кольцевого транзитного потока с газом, циркулирующим в полости, часть охлаждающего газа затекает в полость. При этом интенсифицируется движение в циклональных и антициклональных вихрях, изменяется скорость вращения вихревой структуры ($\omega/\Omega = 0,87$) и происходит значительное понижение температуры в полости. С целью сопоставления с визуализацией течения, выполненной в экспериментах D.E. Bohn и др., в расчетную модель было включено решение уравнения диффузии пассивной примеси с большим значением числа Шмидта. Сравнение расчетных полей концентраций с кадрами видеосъемки свидетельствует о сходстве основных черт течения. Сопоставление экспериментальных и расчетных распределений числа Нуссельта по радиусу дисков показано на рис. 12. Совпадение результатов на периферии дисков можно охарактеризовать как удовлетворительное. Заметное различие данных наблюдается на внутренней части дисков, что объясняется неадекватностью используемого численного метода при моделировании турбулентного течения в зоне смешения транзитного потока.

Заключение

Итоги проделанной работы и выводы по ее результатам сводятся к следующему.

1. Накоплен методический опыт численного моделирования стационарных, квазипериодических и стохастических режимов свободной и смешанной конвекции в быстровращающихся кольцевых полостях. Преодолены специфические трудности расчетов, связанные с высокой интенсивностью полей массовых сил и нестационарностью. Создана методическая основа для численного моделирования сходных явлений в условиях реальных газотурбинных установок.

2. Расчеты подтвердили, что стационарный ламинарный режим течения в замкнутых полостях при осевом теплопереносе может существовать при высоких значениях числа Релея (порядка 10^{10} для осесимметричных течений). Квазипериодические и стохастические режимы течения получены для замкнутых и проточных полостей с преимущественно радиальным теплоподводом.

3. Рассмотрено влияние изменения формы меридионального сечения и влияние направления теплопереноса на осесимметричную свободную конвекцию в замкнутых

полостях. Установлено, что изменение изначально прямоугольной формы меридионального сечения в периферийной его части оказывает слабое влияние на теплоотдачу. Напротив, модификация температурных условий, создающая в полости осерадиальное направление теплопереноса, может оказывать существенное влияние на течение и теплоотдачу.

4. Систематически исследована свободная конвекция в кольцевых полостях с радиальными перегородками. Проанализированы параметры течения и теплоотдачи в зависимости от числа Релея, геометрических параметров перегородок и направления теплопереноса через полость.

5. Показано, что при осевом направлении теплопереноса в полостях с разным количеством сплошных перегородок устанавливается одноконтурное циркуляционное течение, которое увеличивает теплопередачу между дисками по сравнению с теплоотдачей в полости без перегородок. Увеличение числа перегородок повышает теплоотдачу дисков. Для полости с шестью перегородками получена зависимость средней теплоотдачи от числа Релея.

6. Исследовано влияние расположения и высоты частичных перегородок на течение и теплообмен. Показано, что наибольшая теплоотдача наблюдается в случае, когда перегородки примыкают к относительно горячей дисковой поверхности. Для этого случая определена зависимость средней теплоотдачи от высоты перегородки.

7. Получены статистически установившиеся решения для трехмерных квазипериодических и стохастических режимов свободной конвекции в полостях с перегородками, установленными через 45° или 60° , при радиальном направлении теплопереноса. Получен набор данных об эволюции течения во времени и об энергетических спектрах пульсаций скорости.

8. Показано, что в образованных перегородками секторах формируется преимущественно циклональная циркуляция. Увеличение параметра вращения вызывает двумеризацию потока поперек полости. Одновременно растет средняя теплоотдача, а амплитуда пульсаций теплового потока заметно уменьшается. Для 45-градусного сектора получено хорошее согласование расчетного значения средней теплоотдачи с опытными данными.

9. Для условий, соответствующих известным опытам, получены статистически установившиеся решения для стохастического течения во вращающейся замкнутой кольцевой полости и в полости со сквозным приосевым протоком.

10. Для полости со сквозным протоком воспроизведены основные наблюдавшиеся в опытах структуры течения, получен обширный набор данных об их эволюции во времени. Рассчитанная частота прецессии вихревых структур в полости с протоком близка к экспериментальной. На периферии дисков расчетные и опытные данные о радиальном распределении теплоотдачи близки между собой.

11. Сопоставление данных, полученных для проточной и замкнутой полостей, показало, что транзитный поток способствует усилению хаотической составляющей движения, потере однородности течения поперек полости и существенно влияет на локальную и среднюю теплоотдачу дисковых поверхностей.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1) Китанина Е.Э., Рис В.В., Смирнов Е.М. Свободная конвекция в частично перегороденной вращающейся кольцевой полости / Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Труды XII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, –М.: Изд-во МЭИ, 1999. С. 98-101.

2) Китанина Е.Э., Рис В.В., Смирнов Е.М. Теплоотдача в быстро вращающихся замкнутых кольцевых полостях / Unsteady combustion and interior ballistics. International workshop. Book of lectures. Volume 1, – Ижевск: Изд-во Института прикладной механики УрО РАН, 2000. С. 292-297.

3) Kitaniina E.E. Unsteady natural convection in a rotating sectored cavity / Физические основы экспериментального и математического моделирования процессов газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках. Труды XIII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева, –М.: Изд-во МЭИ, 2001. Т. 1. С. 169-173.

4) Bohn D.E., Bouzidi F., Burkhardt C., Kitaniina E.E., Ris V.V., Smirnov E.M., Wolff M.W. Numerical and experimental investigations of the air flow and heat transfer in rotating cavities / In.: Proc. 9th Int. Symp. on Transport Phenomena and Dynamics of Rotating Machinery, Honolulu, USA, 2002, CD-ROM publication. 8 p.