

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
Институт технической теплофизики


На правах рукописи

АВРАМЕНКО Андрей Александрович

ТЕПЛООБМЕН И ГИДРОДИНАМИКА ОКОЛО ВОГНУТЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ
С ВТОРИЧНЫМИ ТЕЧЕНИЯМИ

Специальность 05.14.06 - Техническая теплофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук



Киев - 1997

621.1.01

ЛНБ ім. В. Стефаніка



00330650 (H)

Диссертация является рукописью
Работа выполнена в Институте технической теплофизики
Национальной Академии Наук Украины

- Официальные опонеты:
- доктор технических наук,
профессор В.В.Бабенко;
 - доктор технических наук,
профессор Н.И. Никитенко;
 - доктор технических наук,
профессор Е.Н. Письменный

Ведущая организация: - АНТК им. О.К. Антонова (г. Киев)

Защита состоится "29" апреля 1997 г. в 14 часов
на заседании специализированного ученого совета Д 50.04.02
в Институте технической теплофизики НАН Украины по адресу:
252057, г. Киев - 57, ул. Желябова, 2а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИТТФ НАН Украины

Автореферат разослан " " _____ 1997 г.

Ученый секретарь
специализированного ученого совета
доктор технических наук

Кривошей Ф.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Развитие тепловэнергетики, машиностроения, авиационной, ракетно-космической, нефтяной, нефтехимической, пищевой, медицинской техники, транспортных газотурбинных установок сопровождается значительным увеличением абсолютных значений параметров (температуры и давления), характеризующих рабочие процессы в тепловэнергетических установках и аппаратах. Кроме того, применяются сложные схемы движения рабочего тела в этих устройствах, к числу которых относятся течения около криволинейных поверхностей и в криволинейных каналах различной формы. Кривизна линий тока приводит к возникновению вторичных течений (центробежная неустойчивость), которые вызывают усиление процессов переноса теплоты и импульса. В потоках около вогнутых поверхностей вторичные течения представляют собой вихри Тэйлора-Гертлера (вторичные течения второго рода), а в криволинейных каналах - вихри Дина (вторичные течения второго рода) и парные вихри (вторичные течения первого рода). Эти течения вызывают квазигармонические изменения локального теплообмена и трения в поперечном направлении, которые в зависимости от режима течения составляют 20-80%. В реальных технических установках дополнительные особенности на развитие вторичных течений накладывают различные возмущающие факторы, такие как продольный градиент давления, вдув и отсос через пористую поверхность, внешняя турбулентность и т.д. Следовательно, в точных расчетах теплообмена и гидродинамики криволинейных потоков должны обязательно учитываться оба фактора: наличие вторичных течений и их взаимодействие с возмущающими факторами.

В настоящее время существует ряд работ, в которых на основе теоретического и экспериментального подходов предприняты попытки выявить закономерности и описать процессы переноса в криволинейных потоках с вторичными течениями первого и второго рода, обусловленные центробежной гидродинамической неустойчивостью.

Впервые теоретические исследования вторичных течений в криволинейном канале были проведены В. Дином, а в пограничном слое около вогнутой поверхности - Х. Гертлером. На основе линейной теории возмущений были получены критерии возникновения вихрей при ламинарном режиме течения и при отсутствии дополнительных факторов. В дальнейшем эти исследования были продолжены Ф. Ваттеддорфом, А. Смитом, И. Тани, Р. Кахавитой, Р. Кобаяси и др. Обобщающие вопросы изложены в монографиях В.К. Шукина, Б.П. Устищенко, Ю. Вилемаса и

П. Пошкаса. В этих работах основное внимание уделено исследованию и расчету средних гидродинамических и тепловых характеристик криволинейных каналов, но имеется мало данных о локальной структуре потоков около вогнутых поверхностей и влиянии возмущающих факторов.

В 1980-ых годах впервые теоретически исследовали пограничный слой около вогнутой поверхности в условиях вихрей Тэйлора-Гертлера на основе нелинейной теории возмущений П.Холл (Великобритания) и Й.Айхара (Япония). Однако следует отметить, что в этих работах рассмотрены только гидродинамические эффекты и только при ламинарном режиме течения. Результаты же в основном носят качественный характер, позволяющий понять некоторые аспекты развития вторичных течений, но не пригодны для практического использования. В настоящее время существует ограниченное число работ, посвященных изучению локального теплообмена в криволинейных потоках при воздействии вторичных течений, нет физически обоснованного метода расчета локальных коэффициентов теплоотдачи, слабо изучено влияние дополнительных возмущающих факторов. В практических приложениях для обеспечения требований точности расчета и надежности эксплуатации совершенно недостаточно иметь данные об осредненных теплогидравлических характеристиках, а необходимо знать закономерности изменения локальной теплоотдачи в различных условиях как вдоль так и поперек вогнутой поверхности.

В связи с изложенным выше существует настоятельная необходимость дальнейшего изучения особенностей процессов теплообмена и гидродинамики около вогнутых поверхностей с вторичными течениями (в условиях центробежной гидродинамической неустойчивости) и разработки надежных методов расчета таких процессов с учетом основных особенностей трехмерной природы течения и теплообмена и возмущающих факторов. На основе познания этих закономерностей можно выбрать оптимальные методы и средства управления процессами теплообмена в широком диапазоне режимных параметров. Решение отмеченных проблем весьма важно для дальнейшего развития теории течения и теплообмена в полях центробежных массовых сил при усложненных условиях.

Цель работы состоит в комплексном (теоретическом и экспериментальном) исследовании процессов теплообмена и сопутствующих им гидродинамических процессов, происходящих в криволинейных потоках около вогнутых поверхностей (пограничный слой) и в криволинейных каналах с вторичными течениями первого и второго рода при воздействии различных возмущающих факторов, наиболее характерных для сов-

ременных и перспективных теплоэнергетических установок, и в разработке на этой основе усовершенствованного метода расчета указанных процессов.

Задачи исследования.

1. Развита подход к наиболее полному математическому описанию центробежной гидродинамической неустойчивости при ламинарном и турбулентном режимах с различными граничными условиями, основанный на теории возмущений. Получена система уравнений возмущающих амплитуд в линейном и нелинейном приближении, предложен метод ее решения.

2. На основе развитого подхода в линейном и нелинейном приближении при различных граничных условиях для ламинарного и турбулентного режимов течения рассчитаны границы возникновения центробежной неустойчивости различного рода, получены уравнения для их критериев.

3. Проведено систематическое экспериментальное исследование теплообмена и гидродинамики около вогнутой поверхности при ламинарном и турбулентном режимах течения с вихрями Тэйлора-Гертлера, Дина и парными вихрями. Обоснованы теоретические концепции, развитые в работе, расширены современные представления и получены новые данные, углубляющие сведения о процессах теплообмена и гидродинамики в условиях центробежной неустойчивости с вторичными течениями первого и второго рода.

4. Разработан более совершенный метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена, учитывающий основные особенности воздействия вторичных течений на теплообмен, трение, параметры возмущающих воздействий. От ранее известных он отличается возможностью более точно определять локальные характеристики потока, обусловленные центробежной неустойчивостью и учитывать влияние различных факторов.

Научная новизна. Развита подход к математическому описанию центробежной гидродинамической неустойчивости при ламинарном и турбулентном режимах и процессов теплопереноса при различных граничных условиях, основанный на теории возмущений. Получена система уравнений возмущающих амплитуд в линейном и нелинейном приближении, предложен метод ее исследования.

Получены критические значения центробежной гидродинамической неустойчивости для вторичных течений первого и второго рода при различных граничных условиях, позволяющие установить область ее влияния на процессы теплопереноса, а так же критериальные зависи-

мости для коэффициентов теплоотдачи и трения криволинейных потоков в условиях центробежной гидродинамической неустойчивости.

Разработан усовершенствованный метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена, учитывающий основные особенности воздействия центробежной гидродинамической неустойчивости и центробежных массовых сил на структуру потока.

Практическая ценность. Результаты работы позволяют точно рассчитать критерии центробежной гидродинамической неустойчивости, а так же коэффициенты теплоотдачи и трения криволинейных потоков около вогнутых поверхностей при различных режимах течения и в условиях воздействия различных возмущающих факторов, что позволяет повысить надежность проектирования реальных технических устройств.

Результаты, полученные в диссертации, были использованы в проектной и исследовательской работе АНТК им. О.К. Антонова (Киев), ПКТС (Киев), Института гидромеханики НАН Украины, научно-технического центра "КАМЕТ ЛИТЬЕ", Алчевского металлургического комбината, Национального технического украинского университета "КПИ" при расчете технологических параметров криволинейных потоков.

Полученные научные результаты использованы в четырехтомной монографии "Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил" (том N 1 - Криволинейные потоки).

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием современных методов физического и математического моделирования, удовлетворительным согласованием расчетных и экспериментальных данных, расчетом погрешностей эксперимента.

Апробация. Основное содержание диссертации докладывалось и получило одобрение на Международной конференции "Тепломассообмен и гидродинамика турбулентных течений" (Алушта, 1992), IX школе-семинар молодых ученых и специалистов "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, 1993), Международной конференции "Теория приближена и задачи вычислительной математики" (Днепропетровск, 1993), первой Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 1994), Минском международном форуме по тепло- и массообмену (1996) второй Европейской конференции по теплообмену (Рим, 1996), третьей ежегодной конференции EUROFLAM (Хаарлем, Нидерланды, 1996).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 31 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Диссертация изложена на 329 страницах машинописного текста, содержит 148 рисунков. Список использованной литературы включает 361 наименование.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цели и задачи работы. Приводится информация о практической значимости полученных результатов.

В первой главе выполнен обзор современного состояния рассматриваемой проблемы и сделана постановка задач исследования.

В обзоре перечислены основные особенности криволинейных потоков. Показано, что даже незначительная относительная кривизна потока приводит к заметному изменению его параметров. Рассмотрены условия активного и консервативного воздействия центробежных сил на криволинейные потоки и роль числа Ричардсона Ri как критерия этого условия. Приведены критерии перехода от ламинарного к турбулентному режиму течения для пограничного слоя около криволинейных поверхностей и в криволинейных каналах в виде чисел Рейнольдса Re и Гертлера Go . Показано, что около вогнутых поверхностей переход происходит раньше, чем около выпуклых при одних и тех же условиях. Это обусловлено активным влиянием центробежных сил около вогнутой и консервативным - около выпуклой поверхности. По этой же причине заполненность профилей скорости и температуры, а также значение коэффициентов трения и теплоотдачи около выпуклых поверхностей уменьшается, а около вогнутых - возрастает. Отмеченные трансформации при турбулентном режиме течения носят более существенный характер.

Приводится математическое описание процессов гидродинамики и теплообмена в криволинейных потоках на основе полной эллиптической системы уравнений Навье-Стокса и уравнения энергии. Уравнения движения и энергии представлены в двух модификациях: для течения около криволинейных поверхностей в ортогональной системе криволинейных координат и в цилиндрических координатах для течения в криволинейных каналах. Даны соотношения для тензора напряжений, необходимые для замыкания уравнений движения, и соотношения для удельных тепловых потоков, необходимые для замыкания уравнения энергии. Приведена связь между эффективными вязкостью и температуропровод-

ностью.

Получен вывод о связи направления градиента центробежной силы $\text{grad}|F|$ с характером воздействия этой силы на поток. Его можно сформулировать следующим образом: при противоположном направлении векторов массовой силы и ее градиента $|F|$ имеет место активное воздействие массовых сил на поток, при одинаковом направлении - консервативное. Этот вывод перекликается с критерием Рэлея о центробежной устойчивости идеальной жидкости, который говорит, что течение будет устойчивым, если выполняется условие

$$\frac{d\Gamma}{dr} > 0. \quad (1)$$

При активном воздействии центробежных массовых сил на поток в нем возникают вторичные течения, которые по своей природе отличны от обычной турбулентности. Вторичные течения представляют собой вращательное движение макрообъемов жидкости.

Практически важными для образования вторичных течений являются случаи взаимно перпендикулярного и противоположного направлений векторов F и $\text{grad}|F|$. Если вторичные течения возникают под влиянием массовых сил при взаимно перпендикулярном направлении векторов F и $\text{grad}|F|$, то такие вторичные течения называются вторичными течениями первого рода. Если же вторичные течения возникают при противоположном направлении этих векторов - это вторичные течения второго рода. К вторичным течениям первого рода относятся, например, вторичные течения, которые возникают в криволинейных каналах с круглым поперечным сечением или с прямоугольным поперечным сечением, когда стороны этого канала соизмеримы, а также в межлопаточных каналах турбин. Примерами вторичных течений второго рода могут служить вихри, которые образуются в пограничном слое около вогнутой поверхности - вихри Тэйлора - Гертлера; вихри, которые образуются на вогнутой стенке криволинейного канала прямоугольного поперечного сечения в том случае, когда одна сторона такого канала в радиальном направлении намного меньше другой стороны в осевом направлении (вихри Дина); вихри, которые образуются между двумя коаксиальными цилиндрами, из которых внешний неподвижен, а внутренний вращается - вихри Тэйлора.

Описываются основные методы расчета критериев возникновения вторичных течений: их преимущества, недостатки, области применения

емости.

Первый из них - это метод Рэлея, разработанный для анализа устойчивости идеальной жидкости. Исходя из идеи что, при случайном перемещении момент количества движения частицы сохраняется, Рэлей получил условие устойчивости потока в поле центробежных сил в форме (1). Из этого условия видно, что поток будет устойчив, если циркуляция Γ возрастает вдоль радиальной координаты и, наоборот, поток неустойчив, если циркуляция уменьшается по радиусу.

Второй метод расчета условий устойчивости - это метод малых (линейных) возмущений. Этот метод разработан для анализа устойчивости вязких течений. Основателем этого метода является Г.Тэйлор. Суть данного метода заключается в том, что на основное течение накладываются малые (линейные) возмущения в виде поперечных вихрей, которые экспоненциально нарастают вниз по потоку. Далее формируется линеаризованная система уравнений для амплитуд вихрей при нулевом коэффициенте нарастания возмущений. Анализ этой системы на собственные значения позволяет определить критерий возникновения вторичных течений. Анализируется различие в подходах Г.Тэйлора и А. Смита.

Следующий метод исследования центробежной неустойчивости - это энергетический метод, восходящий к работам Лорентца. Отправной точкой для обобщенного энергетического анализа являются функционалы, выведенные из уравнений Навье-Стокса и сначала определенные на решениях этих уравнений, а затем обобщенные на более широкий класс полей, которые кинематически допустимы в качестве начальных полей скорости. Такие функционалы ограничены в этом более широком классе полей, а получающаяся в результате математическая задача состоит в нахождении оптимальной границы. Энергетический анализ приводит к глобальным утверждениям об устойчивости, которые принимают форму критериев, достаточных для устойчивости.

Методы возмущения и энергетические методы дополняют друг друга. Причем, первые приводят к достаточным условиям неустойчивости, в то время как вторые дают достаточные условия устойчивости.

Еще один метод расчета центробежной неустойчивости - это непосредственное решение трехмерных уравнений Навье-Стокса. Этот метод требует создания сложных программ или использования специализированных коммерческих пакетов "Fluent", "Flow 3D", "Star D", "Phoenix" и др. Создание программы требует большого количества времени, а их реализация - мощных ЭВМ. Специализированные пакеты довольно дороги и также нуждаются в мощных ЭВМ.

Сравнение результатов расчетов критериев центробежной неустойчивости, проведенных различными методами, с экспериментальными данными показало, что наилучшие результаты дают методы возмущений.

Анализируются данные по центробежной неустойчивости в ламинарных и турбулентных потоках, полученные на основе методов возмущений в линейной постановке. Описываются диаграммы устойчивости, приводятся характеристики вихрей, профили возмущающих амплитуд различных величин. Показано, что для корректного описания процессов переноса тепла и импульса в потоках с вторичными течениями недостаточен линейный подход, а необходимо учитывать нелинейные эффекты. Приведены результаты немногочисленных исследований процессов центробежной неустойчивости в нелинейной постановке.

Формулируются цель и задачи исследования.

Во второй главе обосновывается выбор формы возмущающих величин скорости, давления и температуры для течений в условиях центробежной неустойчивости при нелинейном подходе.

В общем случае при использовании метода возмущений в нелинейной постановке поле скоростей, давления и температуры задается в виде суммы параметров невозмущенного течения и возмущающих функций, обусловленных наличием вторичных течений:

$$u_s(x, y, z) = u(x, y) + \sum_{n=0}^{\infty} u_n(y) \cos(n\delta z) \exp(\gamma_n x),$$

$$v_s(x, y, z) = v(x, y) + \sum_{n=0}^{\infty} v_n(y) \cos(n\delta z) \exp(\gamma_n x),$$

$$w_s(x, y, z) = \sum_{n=0}^{\infty} w_n(y) \sin(n\delta z) \exp(\gamma_n x), \quad (2)$$

$$p_s(x, y, z) = p(x, y) + \sum_{n=0}^{\infty} p_n(y) \cos(n\delta z) \exp(\gamma_n x),$$

$$\theta_s(x, y, z) = \theta(x, y) + \sum_{n=0}^{\infty} \theta_n(y) \cos(n\delta z) \exp(\gamma_n x),$$

Обсуждается выбор формы подэкспоненциального выражения в формулах (2). Показано, что форма, предложенная в настоящей работе более правомочна нежели выражения Г.Тэйлора и А. Смита.

Рассмотрен переход от линейной формы возмущений к нелинейной на основе формальной аналогии между пространственной периодич-

ностью течения, вызванной вихрями Тэйлора-Гертлера, и временной, вызванной гармоническими колебаниями цилиндра в задаче Г. Шлихтинга. Показано при этом, что в нелинейной постановке возмущающие функции могут быть ограничены гармониками второго порядка ($n=2$).

Выведены уравнения для возмущающих амплитуд в пограничном слое около вогнутой поверхности в линейном ($n=1$)

$$\begin{aligned} & \text{Re} \left[\underbrace{\frac{\bar{u}_1}{1 - \xi K}}_I f_u + \bar{v}_1 D^* \bar{u} + \bar{v} D^* \bar{u}_1 + \underbrace{\frac{1}{2} \bar{v}_2 D^* \bar{u}_1 + \bar{v}_0 D^* \bar{u}_1}_V + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} \bar{v}_1 D \bar{u}_2 + \bar{v}_1 D \bar{u}_0 - \bar{\delta} \bar{w}_1 \bar{u}_2 - \frac{1}{2} \bar{u}_1 \bar{w}_2 \right] = \bar{v}_{\text{eff}} \left[DD^* - \right. \\ & \left. - \bar{\delta}^2 \right] \bar{u}_1 + \underbrace{D \bar{v}_{\text{eff}} \left[D + \frac{K}{1 - \xi K} \right]}_{II} \bar{u}_1 - \underbrace{2 \bar{v}_1 \frac{K}{(1 - \xi K)^2}}_{III} x \\ & \times \underbrace{\left(\bar{\delta} \frac{\partial \bar{v}_{\text{eff}}}{\partial x} \right)}_{IV} + 2 \frac{K^2}{(1 - \xi K)^3} \bar{v}_1 \bar{v}_{\text{eff}} \frac{dR_w}{dx} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{Re} \left[\frac{2K}{1 - \xi K} \bar{u} \bar{u}_1 + \bar{v}_1 D \bar{v} + \bar{v} D \bar{v}_1 + \underbrace{\frac{\bar{u}_1}{1 - \xi K} f_v + \bar{v}_0 D \bar{v}_1}_I + \right. \\ & \left. + \frac{1}{2} D (\bar{v}_1 \bar{v}_2) + \bar{u}_1 \bar{u}_2 \frac{K}{1 - \xi K} + 2 \bar{u}_1 \bar{u}_0 \frac{K}{1 - \xi K} - \right. \\ & \left. - \bar{\delta} \bar{w}_1 \bar{v}_2 - \frac{1}{2} \bar{\delta} \bar{w}_2 \bar{v}_1 \right] = - \text{Re} D \bar{p}_1 + \bar{v}_{\text{eff}} \left[DD^* - \bar{\delta}^2 \right] \bar{v}_1 + \\ & \left. + \underbrace{2 D \bar{v}_{\text{eff}} D \bar{v}_1}_{II} + \underbrace{\frac{1}{1 - \xi K} \left[D + \frac{K}{1 - \xi K} \right] \bar{u}_1 \left(\bar{\delta} \frac{\partial \bar{v}_{\text{eff}}}{\partial x} \right)}_{III} - \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & - \frac{K^2}{(1 - \xi K)^3} \bar{v}_{\text{eff}} \bar{u}_1 \frac{dR_w}{dx} , \\
 & \text{IV} \\
 & \text{Re} \left[\bar{v} D \bar{w}_1 - \frac{1}{2} \bar{v}_2 D \bar{w}_1 + \bar{v}_0 D \bar{w}_1 + \frac{1}{2} \bar{\delta} \bar{w}_1 \bar{w}_2 \right] = \bar{p}_1 \bar{\delta} \bar{R}_e + \\
 & \text{V} \\
 & + \bar{v}_{\text{eff}} \left[D^2 - \frac{K}{1 - \xi K} D - \bar{\delta}^2 \right] \bar{w}_1 + D \bar{v}_{\text{eff}} \left[D \bar{w}_1 - \bar{\delta} \bar{v}_1 \right] - \\
 & \text{II} \\
 & - \frac{1}{1 - \xi K} \left(\bar{\delta} \frac{\partial \bar{v}_{\text{eff}}}{\partial x} \right) \bar{\delta} \bar{u}_1 , \\
 & \text{III}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

$$D^* \bar{v}_1 + \bar{\delta} \bar{w}_1 = 0,$$

$$\begin{aligned}
 & \text{Pe} \left\{ \bar{u}_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} \bar{\delta} + \text{H} \left[\bar{v} D \theta_1 + \bar{v}_1 D \theta + \bar{v}_1 \left(\frac{1}{2} D \theta_2 + D \theta_0 \right) + \right. \right. \\
 & \left. \left. + D \theta_1 \left(\frac{1}{2} \bar{v}_2 + \bar{v}_0 \right) - \bar{\delta} \left(\frac{1}{2} \bar{w}_2 \theta_1 + \bar{w}_1 \theta_2 \right) \right] \right\} = \text{H} \left[\bar{a}_{\text{eff}} D^2 \theta_1 + \right. \\
 & \text{V} \\
 & \left. D \bar{a}_{\text{eff}} D \theta_1 - \bar{a}_{\text{eff}} \bar{\delta}^2 \theta_1 \right] - K \bar{a}_{\text{eff}} D \theta_1 , \\
 & \text{II}
 \end{aligned}$$

и нелинейном приближении ($n \neq 1$). В этих уравнениях:

I - ламинарный режим течения с продольным градиентом давления;

II - турбулентный режим течения;

III - турбулентный режим течения с продольным градиентом давления;

IV - течение около поверхности с переменной кривизной.

Римская цифра V означает, что члены являются незначительными для данного приближения.

Система уравнений (3) позволяет в наиболее полной форме определить критические условия возникновения вихрей Тэйлора - Гертлера как при ламинарном, так и при турбулентном режимах течения в условиях воздействия различных факторов, таких как градиент давления, переменная по длине кривизна поверхности, вдув, отсос, внешняя турбулентность и др.

Аналогичные уравнения для течения в канале были получены в цилиндрических координатах.

Иногда при анализе условий устойчивости удобно сократить число уравнений, повысив их порядок. Это достигается путем исключения одного или нескольких неизвестных. В настоящей работе были выведены системы уравнений, содержащие два уравнения движения (четвертого и второго порядков) и уравнение энергии.

Рассматриваются граничные условия для различных видов течения, обсуждается важность условия равенства нулю производной нормальной компоненты возмущающей скорости на границах области течения.

Описаны методы исследования, выведенных выше систем уравнений возмущающих амплитуд на собственные значения. В настоящей работе использовались два метода: первый, который основан на конечно-разностном представлении системы дифференциальных уравнений с последующим исследованием получаемой системы алгебраических уравнений, второй - метод стрельбы, заключающийся в многократном решении системы дифференциальных уравнений с одним незадаанным граничным условием при всех фиксированных параметрах, входящих в систему, кроме одного, при этом переменный параметр изменяется после каждого решения до тех пор, пока незадаанное граничное значение искомой функции не станет удовлетворять необходимому граничному условию с заданной точностью.

Предложенная математическая модель тестировалась путем сравнения результатов, полученных на ее основе, с имеющимися расчетными и экспериментальными данными. Тестирование производилось на основе численных методов, описанных выше, и вариационного подхода оценки собственных значений, что позволяло избежать неточностей присущих численным вычислениям. Оба подхода показали правомочность предложенной модели.

В третьей главе рассматриваются процессы центробежной гидродинамической неустойчивости в ламинарном пограничном слое около

вогнутой поверхности и ее влияние на теплоотдачу и трение.

Рассчитываются критерии устойчивости как собственные значения системы дифференциальных уравнений (3). При этом получаем диаграмму устойчивости в виде функциональной зависимости числа Гертлера от волнового числа (рис.1). Минимум этой зависимости представляет критерий устойчивости. Он может быть определен по следующей формуле

$$Go_{cr} = \begin{cases} 22,97, & \text{при } K < 0,02, \\ 27,76 K^{0,0484}, & \text{при } K = 0,02 \dots 0,1. \end{cases} \quad (4)$$

Далее определяются собственные функции гидродинамической задачи как профили возмущающих амплитуд скоростей. Для линейных составляющих имеем

$$\frac{u_1}{u_e} = \bar{u}_1(\xi) = \begin{cases} 0,7a_1\xi + (0,0258 - 0,067a_1) 10^4 \xi^2, \\ \text{при } \xi = 0 \dots 0,01 \\ S_1 \xi \exp(-b\xi) - S_2 \xi^3, & \text{при } \xi = 0,01 \dots 1, \end{cases} \quad (5)$$

$$\bar{v}_1 = -\frac{1}{Re} S_1 \xi^2 \exp(-b\xi),$$

$$\bar{w}_1 = \frac{S_1}{\bar{\sigma} Re} \xi(2 - b\xi) \exp(-b\xi),$$

где $a_1 = f''(0)$ - коэффициент в линейном члене полинома Польгаузена, $S_1 = 2,66$; $S_2 = 0,1324$ - амплитудные множители, $b = 3,0$ - показатель затухания вихревого движения относительно поперечной координаты. Если же положить $S_2 = 0$, получим решение для линейного приближения при условии, что $\xi_e \rightarrow \infty$. Расчеты показывают, что профили (5) являются автомодельными относительно инкремента нарастающих возмущений. В противоположность этому нелинейные составляющие - неавтомодельны. Поэтому при решении уравнений для них принималось, что возмущающие амплитуды в формуле (1) являются функцией не только нормальной координаты y , но и продольной x . Таким образом удается избежать использования такой неопределенной величины как

инкремент нарастания возмущений. Уравнения для нелинейных составляющих преобразовывались в уравнение третьего порядка для функции тока, которое решалось методом Галеркина с использованием переменной Власиуса. По профилям возмущающих амплитуд определялись линейная g_1 и нелинейная g_0 поправки, обусловленные воздействием вихрей Тэйлора-Гертлера, в формуле для коэффициента трения

$$\sigma_f = \sigma_{f0} [1 + g_1 \cos(\delta z) + g_0]. \quad (6)$$

Аналогичный подход был использован при нахождении возмущающих амплитуд температур. В результате получены следующие соотношения для линейной и нелинейной составляющей

$$\begin{aligned} \theta_1 &= c_1 \int_0^{\eta} [f_B^{(n)}]^{Pr} d\eta - \frac{Pr}{2} \int_0^{\eta} [f_B^{(n)}]^{Pr} \left[\int_0^{\eta} \frac{\bar{u}_1(\xi)}{[f_B^{(n)}]^{Pr}} \eta \frac{d\theta}{d\eta} d\eta \right] d\eta - \\ &- i \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{\eta} [f_B^{(n)}]^{Pr} \left[\int_0^{\eta} \frac{\bar{u}_1(\xi)}{[f_B^{(n)}]^{Pr}} \eta \frac{d\theta_0^{(i)}}{d\eta} d\eta \right] d\eta, \\ \theta_0 &= c_1 \int_0^{\eta} [f_B^{(n)}]^{Pr} d\eta - \frac{Pr}{4} \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^{\eta} [f_B^{(n)}]^{Pr} \times \\ &\times \left[\int_0^{\eta} \frac{\bar{u}_1(\xi)}{[f_B^{(n)}]^{Pr}} \eta \frac{d\theta_1^{(i)}}{d\eta} d\eta \right] d\eta, \end{aligned} \quad (7)$$

где i - номер очередного приближения. Как показал анализ, члены при $i > 1$ гораздо меньше первого и ими можно пренебречь. На основе полученных соотношений определялись линейная g_1^T и нелинейная g_0^T поправки, обусловленные воздействием вихрей Тэйлора-Гертлера, в формуле для коэффициента теплоотдачи

$$Nu = Nu_0 [1 + g_1^T \cos(\delta z) + g_0^T]. \quad (8)$$

Полученные теоретические результаты сравнивались с эксперименталь-

ными данными, полученными в настоящей работе и с имеющимися в литературе (рис.2.,3.). Экспериментальные данные настоящей работы были получены на экспериментальной установке, описанной в приложении диссертации, на основе термоэлектрического метода, а так же с помощью жидких термокристаллов. Теоретические и экспериментальные данные находятся в хорошем соответствии.

На следующем этапе были проведены исследования в условиях воздействия различных возмущающих факторов: отрицательный и положительный продольный градиенты давления, вдув и отсос через пористую поверхность. Было установлено, что при увеличении интенсивности воздействия ускорения (отрицательный градиент) и отсоса происходит монотонное увеличение β_{0cr} и уменьшение длины волны вихрей, а так же монотонное снижение величин S_1 в (5), g_1 и g_0 в (6), g_1^T и g_0^T в (8). Такое поведение указанных параметров свидетельствует о том, что ускорение и отсос стремятся подавить процессы центробежной неустойчивости. При воздействии замедления (положительный градиент) и вдува изменение указанных параметров носит экстремальный характер: по мере увеличения интенсивности замедления и вдува β_{0cr} сначала уменьшается, а затем с приближением к точке отрыва резко увеличивается; в противоположность этому остальные параметры сначала возрастают, а затем стремятся к нулю в точке отрыва. Таким образом при отрыве пограничного слоя происходит вырождение вихрей Тэйлора-Гертлера. Это же подтверждают термоанемометрические измерения и измерения теплоотдачи.

В заключение было проведено исследование процессов центробежной неустойчивости на участке адаптации при переходе потока с плоской поверхности на вогнутую. Для этого было введено понятие эффективного радиуса кривизны, который использовался при моделировании членов, отмеченных цифрой IV в уравнениях (3). На основе исследования была установлена длина адаптационного участка, после которого прекращается влияние условий на входе; характер изменения на этом участке критического числа Гертлера; характеристик вихрей; функций трения и теплообмена.

В четвертой главе рассматриваются процессы центробежной гидродинамической неустойчивости в турбулентном пограничном слое около вогнутой поверхности и ее влияние на теплоотдачу и трение.

Производится качественный энергетический анализ процессов передачи энергии в потоках с вторичными течениями, для чего выводится уравнение баланса механической энергии. По структуре это уравнение подобно уравнению кинетической энергии турбулентности для

потоков около криволинейной стенки. Проведенный качественный анализ позволяет предсказать влияние различных факторов на критическое значение чисел Гертлера без непосредственных вычислений.

Определяются критические значения чисел Гертлера, соответствующие появлению вихрей в турбулентном пограничном слое около вогнутой поверхности. Перед этим обсуждаются необходимые входные данные для определения чисел Гертлера. Это профили скорости невозмущенного течения и модель турбулентности, которая учитывает нелинейность влияния кривизны на турбулентную вязкость. В результате расчетов были найдены зависимости Go_{cr} от параметра кривизны K . Расчеты были проведены в линейном и нелинейном приближении, с учетом зависимости турбулентной вязкости от кривизны и без этой зависимости. Сравнение эксперимента и расчетов показало, что наиболее достоверные результаты получаются при нелинейном подходе с учетом зависимости турбулентной вязкости от кривизны. При этом для Go_{cr} справедлива следующая зависимость

$$Go_{cr} = \begin{cases} 2451 - 51405K, & \text{при } K = 0 \dots 0,03 \\ 21,783K^{-1} - 0,2617K^{-2} + 5,784 \cdot 10^{-3}K^{-3} + \\ + 2,104 \cdot 10^{-4}K^{-4}, & \text{при } K = 0,03 \dots 0,1. \end{cases} \quad (9)$$

Эта и другие зависимости показаны на рис.4. Как видно, наибольшие отличия линейного подхода от нелинейного ощущаются при малых значениях параметра кривизны $K < 0,03$. На этом же рисунке представлена граница появления неустойчивых вихрей, обнаруженная экспериментальным путем на основе термоанемометрических измерений.

Как собственные функции задачи были найдены профили возмущающих амплитуд скорости для линейной

$$\bar{u}_1 = \begin{cases} k Go^{0,5} \xi, & \text{при } \xi \rightarrow 0 \\ S \xi \exp(-b\xi), & \text{при } \xi > 0,01, \end{cases} \quad (10)$$

и нелинейной составляющих

$$\bar{u}_0 = \exp(-2b\xi) \sum_{k=1}^{\infty} c_k \xi^k, \quad (11)$$

где $k = 0,147$, $S = S(K)$, $b = 0,25$, $c_k = c_k(S, b, n)$, n - показатель в степенном законе невозмущенной скорости. Эти профили вместе с экспериментальными данными представлены на рис. 5.

Для возмущающих амплитуд температур получены следующие соотношения

$$\theta_{1(0)} = C_{1(0)} \int_0^{\xi} \exp\left(- \int_0^{\xi} F_{1(0)}(\xi) d\xi\right) d\xi - \int_0^{\xi} \left(\int_0^{\xi} E_{1(0)}(\xi) \times \right. \\ \left. \times \exp\left(\int_0^{\xi} F_{1(0)}(\xi) d\xi\right) d\xi \cdot \exp\left(- \int_0^{\xi} F_{1(0)}(\xi) d\xi\right) d\xi, \quad (12)$$

где $C_{1(0)}, F_{1(0)}(\xi), E_{1(0)}(\xi) = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Pr}_t, n)$.

Из профилей возмущающих амплитуд были найдены функции g_1 и g_0 в (6), g_1^T и g_0^T в (8). Функции g_1^T и g_0^T (рис. 6) имеют следующий вид

$$g_1^T = 3,055 \frac{\text{Pr}^{0,15}}{\text{Pr}_t^{0,4}} \left(\text{Re}^{** - 1} \frac{n}{(n+1)(n+2)} \right)^{0,75} \frac{\Psi}{\Psi^T}, \quad (13)$$

$$g_0^T = C_0 (\text{Re}^{**} \text{Pr} \cdot \text{St}_0 \cdot \Psi^T)^{-1} \frac{n}{(n+1)(n+2)}.$$

Видно, что и зависимости (13) предсказывают уменьшение функций g_1^T и g_0^T с увеличением числа Рейнольдса. Это обусловлено уменьшением интенсивности вихрей с ростом турбулентности, что так же подтверждает энергетический анализ описанный выше. Снижение интенсивности вихрей с ростом турбулентности обусловлено возникновением "конкурирующего" процесса передачи энергии от основного течения к турбулентным пульсациям.

Были проведены исследования процессов центробежной неустойчивости в турбулентном пограничном слое при воздействии различных возмущающих факторов. В целом их влияние носит такой же характер как и в случае ламинарного режима. Однако влияние того или иного фактора зависит от значения параметра кривизны: чем меньше кривиз-

на, тем сильнее влияние фактора. Дополнительный рассмотренный фактор, который не исследовался при ламинарном режиме - внешняя турбулентность. Исследование показало, что при возрастании интенсивности внешней турбулентности происходит монотонное увеличение Go_{cr} и уменьшение длины волны вихрей, а так же монотонное снижение величин S , g_1 , Go , g_1^T и Go^T . Такое поведение указанных параметров свидетельствует о снижении интенсивности вихрей под действием турбулентности, что подтверждает полученный выше вывод.

В пятой главе рассматриваются процессы центробежной гидродинамической неустойчивости в криволинейном канале при ламинарном режиме течения и ее влияние на теплоотдачу и трение.

Были проведены расчеты критериев возникновения вихрей Дина в плоском криволинейном канале постоянного сечения. В результате получены кривые нейтральной устойчивости (рис.8). Видно, что учет нелинейных эффектов несколько увеличивает критическое значение числа Дина и приводит к уменьшению волнового числа. Для критического числа Дина справедлива следующая формула

$$De_{h cr} = 66,6 K_h^{0,21}. \quad (14)$$

Далее были произведены расчеты при ненулевых значениях инкремента нарастания возмущений ($\gamma_n > 0$). Эти расчеты показали, что собственные значения системы исследуемых уравнений ($De_h = De_h(\delta)$) поднимаются эквидистантно друг над другом по мере увеличения γ_n практически без смещения по волновому числу. Это свидетельствует о независимости волнового числа вихря от числа Дина в области неустойчивости. Такой теоретический вывод подтвержден экспериментальными измерениями (рис.9).

Получены соотношения для критических чисел Дина и волновых чисел при течениях в сужающихся (ускорение потока) и расширяющихся (замедление потока) каналах. Закономерности их изменений такие же как изменения чисел Герглера в пограничном слое (глава 3).

Как собственные функции задачи были найдены профили возмущающих амплитуд скорости. Линейная составляющая имеет следующий вид

$$\frac{u_1}{u_m} = \bar{u}_1 = \begin{cases} \bar{u}_1^0 \cdot Q_1, & \text{при } \zeta < 0,99, \\ \bar{u}_1 \cdot Q_1, & \text{при } \zeta \rightarrow 1, \end{cases} \quad (15)$$

где \bar{u}_1^0 - профиль возмущающей амплитуды для канала постоянного сечения, $Q_1 = Q_1(De_n, G)$.

Нелинейная составляющая определялась из решения уравнения

$$DD^*u_0 - \frac{u_0}{r^2} L = \frac{1}{v} \left[\frac{k}{r} D^*u + \frac{1}{2} D(u_1v_1) + \frac{u_1v_1}{r} \right], \quad (16)$$

где $L = 1 + r_m/v \, du_m/d\varphi$ - модифицированный параметр градиента давления, r_m - радиус, соответствующий u_m . Были найдены решения уравнения (16) для трех случаев: $L > 0$, $L = 0$, $L < 0$.

По профилям скорости определялись коэффициенты трения:

$$\frac{c_f}{c_{f0}} = 1 + Q_1 \cos(\delta z) + Q_0, \quad (17)$$

Далее определялись профили возмущающих амплитуд температур. Для линейной составляющей имеем

$$\theta_1 = J(\bar{r}, \delta_R) K_0^{-1}(\delta_R R) [K_0(\delta_R) I_0(\delta_R \bar{r}) - I_0(\delta_R) K_0(\delta_R \bar{r})] +$$

$$+ K_0^{-1}(\delta_R \bar{r}) \left[I_0(\delta_R \bar{r}) \int_1^{\bar{r}} K_0(\delta_R \bar{r}) \bar{r} N_{T1}(\bar{r}) d\bar{r} - \right. \quad (18)$$

$$\left. - K_0(\delta_R \bar{r}) \int_1^{\bar{r}} I_0(\delta_R \bar{r}) \bar{r} N_{T1}(\bar{r}) d\bar{r} \right],$$

где I_0 , K_0 - модифицированные функции Бесселя первого и второго рода.

Нелинейная составляющая

$$\Theta_0 = \ln \bar{r} \left[\frac{1}{\ln R} \int_1^R \bar{r} \ln \bar{r} N_{T0}(\bar{r}) d\bar{r} + \int_1^{\bar{r}} N_{T0}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r} - \int_1^R N_{T0}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r} \right] - \int_1^{\bar{r}} \bar{r} \ln \bar{r} N_{T0}(\bar{r}) d\bar{r} . \quad (19)$$

В формулах N_{T1} , N_{T0} - функции невозмущенного течения.

По профилям температур определялись коэффициенты теплоотдачи:

$$\frac{Nu}{Nu_0} = 1 + Q_1^T \cos(\delta z) + Q_0^T . \quad (20)$$

Выполненные расчеты показывают, что наличие вихрей приводит к интенсификации осредненного теплообмена около вогнутой стенки канала на 100 и более процентов. При этом амплитуда колебаний теплоотдачи поперек вогнутой стенки составляет 70...90%.

В заключительной части главы были рассмотрены процессы центробежной неустойчивости в криволинейных каналах с соизмеримыми сторонами. Диаграмма устойчивости в этом случае имеет два минимума, что означает наличие двух видов вторичных течений: вихрей Дина и парных вихрей. Получены критерии появления этих видов течения, а так же выражения для длин волн, координат точек зарождения вихрей. Указанные величины были исследованы для каналов постоянного и переменного сечения.

Экспериментально были получены картины линий тока вторичных течений в поперечном сечении и данные для функций Q_1^T , Q_0^T (20) в области влияния вихрей Дина и парных вихрей.

В шестой главе рассматриваются процессы центробежной гидродинамической неустойчивости в криволинейном канале при турбулентном режиме течения и ее влияние на теплоотдачу и трение.

Обсуждается модель турбулентной вязкости для исследования собственных значений: введение поправок, учитывающих влияние нелинейности кривизны на турбулентность для различных участков (по радиальной координате) канала.

Проведены расчеты критериев возникновения вихрей Дина в плоском криволинейном канале постоянного сечения. Для критического

числа Дина получена следующая формула

$$De_{hcr} = 253,56 (K_h \cdot 10^2)^{0,493} \quad (21)$$

Произведены расчеты при ненулевых значениях инкремента нарастания возмущений ($\gamma_n > 0$). Эти расчеты показали, что собственные значения системы исследуемых уравнений ($De_n = De_n(\delta)$) поднимаются эквидистантно друг над другом по мере увеличения γ_n практически без смещения по волновому числу. Это свидетельствует о независимости волнового числа вихря от числа Дина в области неустойчивости.

Получены соотношения для критических чисел Дина и волновых чисел при течении в сужающихся (ускорение потока) и расширяющихся (замедление потока) каналах. Закономерности их изменений такие же как и в случае ламинарного течения, однако количественное влияние сильнее. Это влияние зависит от значения параметра кривизны: чем больше кривизна, тем слабее влияние ускорения и замедления потока.

Как собственные функции задачи были найдены профили возмущающих амплитуд скорости. Линейная составляющая имеет следующий вид

$$\bar{u}_1 = \begin{cases} 3,396\zeta^{**} - 8,937\zeta^{**2} + 5,544\zeta^{**3}, \\ \text{при } \zeta^{**} > 0,01, \\ Q_1 \cdot \bar{u}, \text{ при } \zeta^{**} \rightarrow 0, \end{cases} \quad (22)$$

где $\zeta^{**} = (R_2 - r) / h$. В области выпуклой стенки ($\zeta^{**} \rightarrow 1$) возмущающая линейная амплитуда тангенциальной скорости имеет отрицательное значение. Это обусловлено тем, что "опускное" и "подъемное" течение около выпуклой и вогнутой стенок канала находится в противофазе, $Q_1 = Q_1(Re_n, K_h)$.

Для нелинейной составляющей были получены выражения в виде квадратур, содержащих компоненты скорости невозмущенного течения и линейные составляющие. По найденным составляющим скорости определяются функции Q_1 и Q_0 в формуле (17) для коэффициента трения. Оказалось, что величина этих функций гораздо меньше, чем при ламинарном режиме (20...30%), и обе эти функции вырождаются в зоне отрыва в диффузорном потоке.

Были получены выражения для профилей возмущающих амплитуд

температур. Выражение для линейной составляющей формально совпадает с (18), однако при этом $N_{T1}(r)$ имеет иной вид и включает турбулентную теплопроводность. Нелинейная составляющая имеет следующий вид

$$\theta_0 = \frac{\int_1^R \frac{1}{\bar{a}_{eff} \bar{r}} \left(\int_1^{\bar{r}} N_{T0}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r} \right) d\bar{r}}{\int_1^R \frac{1}{\bar{a}_{eff} \bar{r}} \left(\int_1^{\bar{r}} N_{T0}(\bar{r}) \bar{r} d\bar{r} \right) d\bar{r}} \int_1^R \frac{d\bar{r}}{\bar{a}_{eff} \bar{r}} \quad (23)$$

Далее определялись функции Q_1^T и Q_0^T в (20). Порядок этих функций и закономерности изменения такие же как функций Q_1 и Q_0 .

В конце главы были рассмотрены процессы центробежной неустойчивости в криволинейных каналах с соизмеримыми сторонами. Приведены данные, необходимые для расчета характеристик центробежной неустойчивости: модель турбулентности и профили скорости для невозмущенного течения. Расчеты показали, что диаграмма устойчивости имеет два минимума как и при ламинарном режиме, что означает наличие двух видов вторичных течений: вихрей Дина и парных вихрей. Получены критерии появления этих видов течения, а также выражения для длин волн, координат точек зарождения вихрей. Указанные величины были исследованы для каналов постоянного и переменного сечения. Для вихрей Дина получена связь между критериями их возникновения в плоском канале (De_{hcr}) и в канале с соизмеримыми сторонами (De_{cr}^1):

$$De_{cr}^1 = De_{hcr} \frac{4}{\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)^{3/2}} (2 + K_h)^{-0.5}, \quad (24)$$

Экспериментально были получены картины линий тока вторичных течений в поперечном сечении, критерии возникновения вихрей и волновые числа (подтверждающие теоретические результаты), данные для функций Q_1^T , Q_0^T (20) в области влияния вихрей Дина и парных вихрей. Данные для функций Q_1^T , Q_0^T представлены на рис.10-12.

В седьмой главе рассмотрена методика расчета течений в условиях центробежной неустойчивости (при наличии вторичных макровихрей). Предлагаемая методика основывается на поэтапном подходе. На первом этапе производится расчет двумерного (невозмущенного) течения. Затем на результаты этого расчета налагаются трехмерные эффекты, вызванные вторичными вихрями. Эти эффекты рассчитываются по соотношениям, основанным на результатах, полученных в предыдущих главах. В то же время, результаты, полученные на основе расчета двумерной модели, были использованы при расчете характеристик трехмерных возмущений (вихри Тэйлора-Гертлера, Дина и парный вихрь).

Описывается шеститочечная схема конечно-разностной аппроксимации уравнений движения и энергии необходимая, для расчета двумерного ламинарного и турбулентного пограничных слоев.

Приводятся данные, полученные в результате расчета с использованием указанной схемы: профили скорости и температуры, коэффициенты трения и теплоотдачи и т.д. Эти данные сравнивались с известными результатами, на основе чего был сделан вывод о правильности предложенной схемы. Профили скорости в пограничном слое около вогнутой поверхности, рассчитанные в двумерном приближении, использовались в качестве невозмущенных профилей при определении Go_{CG} в главах 3 и 4, а величины c_{f0} и Nu_0 в формулах (6) и (8) соответственно. Далее приводится общая схема расчета пограничного слоя с учетом трехмерных эффектов при дифференциальном и интегральном подходах.

Дается описание метода расчета невозмущенного течения в плоском криволинейном канале в двумерном приближении. Результаты этого расчета используются при определении De_{CG} в главах 5 и 6, а так же величин c_{f0} и Nu_0 в формулах (17) и (20). Приводится схема расчета с учетом вторичных макровихрей.

В заключение приводятся несколько примеров расчета по предложенной методике. Результаты одного из примеров сравниваются с результатами расчета с использованием коммерческого пакета "Fluent". Сравнение показывает хорошее согласование результатов расчетов.

ВЫВОДЫ

1. Развита методика, основанная на развитии теории возмущений, к исследованию центробежной тепловой и гидродинамической неустойчивости около вогнутых поверхностей при ламинарном и турбулентном режимах течения с различными граничными условиями.

2. Получена система уравнений возмущающих амплитуд температур и скоростей в линейном и нелинейном приближении, разработан метод ее решения.

3. На основе развитого подхода в линейном и нелинейном приближении определены границы возникновения центробежной гидродинамической неустойчивости (возникновение вихрей Тэйлора-Гертлера) в ламинарном и турбулентном пограничном слое около вогнутой поверхности в условиях воздействия различных возмущающих факторов (продольный градиент давления, вдув, отсос, внешняя турбулентность, переход потока с плоской на вогнутую поверхность). Получены уравнения для их критериев. Аналогичные критерии (для вихрей Дина и парного вихря) получены для течения в плоском криволинейном канале и в канале с соизмеримыми сторонами при ламинарном и турбулентном режимах течения. Данные критерии являются пороговыми значениями, начиная с которых необходимо учитывать влияние вторичных вихрей на теплообмен и поверхностное трение.

4. В качестве собственных функций исследуемой задачи получены профили линейных возмущающих амплитуд температуры и трех компонент скорости. Показано, что амплитуды температуры и продольной компоненты скорости (в случае пограничного слоя) или тангенциальной (в случае канального течения) на два и более порядков превосходят две остальные компоненты скорости.

5. Впервые получены поправки, описывающие влияние продольных макровихрей на локальную теплоотдачу и трение для потоков с различными граничными условиями и при различных граничных условиях.

6. Показано существование квазигармонического изменения локальных коэффициентов теплоотдачи в трансверсальном направлении в пограничном слое, вызванные вихрями Тэйлора-Гертлера, и в канальном течении, вызванное вихрями Дина и парными вихрями, превышающее 70% при ламинарном режиме течения и составляющее 20% и более в случае турбулентного течения. При этом происходит общее увеличение теплоотдачи, которое в случае ламинарного режима течения (~ 100% и более) намного превосходит аналогичное увеличение в случае турбулентного течения.

7. На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований впервые обнаружено вырождение возмущающих температур и прекращение влияния вихрей на теплообмен под действием отрыва потока от стенки, вызванного положительным продольным градиентом давления или вдувом.

8. На основе эксперимента впервые показано:

- возможность существования устойчивых и неустойчивых продольных макровихрей при турбулентном режиме течения; - наличие зоны индукции вихрей и зоны их основного существования; - исчезновение влияния вихрей на интенсивность теплообмена при смене ламинарного режима течения на турбулентный, что обусловлено вырождением продольных вихрей из-за возникновения "конкурентного" процесса передачи энергии от осредненного течения к турбулентным пульсациям.

9. Разработан усовершенствованный метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена, учитывающий основные особенности воздействия вторичных течений на теплообмен, трение, параметры возмущающих воздействий. От ранее известных он отличается возможностью более точно определять локальные характеристики теплообмена и гидродинамики, обусловленные центробежной неустойчивостью и достаточно полно учитывать влияние различных возмущающих факторов.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика около криволинейных поверхностей. - Киев: Наук. думка, 1992. - 136с.
2. Халатов А.А., Авраменко А.А., Шевчук И.В. Теплообмен и гидродинамика в полях центробежных массовых сил" - Киев, Из-во ИТФ НАН Украины (том N 1 - Криволинейные потоки) - 296с.
3. Теплообмен и гидродинамика на выпуклой и вогнутой поверхностях сопловых аппаратов газовых турбин с интенсивными вторичными и вихревыми течениями /А.А. Халатов, А.А. Авраменко, Л.В. Сысков, М.А. Литвиненко, С.А. Халатов //Пром. теплотехника. - 1992. - 14, N 4-6. - С.3-14.
4. Авраменко А.А., Изгорева И.А. Теплообмен в ламинарном пограничном слое на вогнутой поверхности при наличии вихрей Тэйлора-Гертлера //Вестник МГТУ, Сер. Машиностроение. - 1993. - N 1. - С.116-122.
5. Халатов А.А., Авраменко А.А. Ламинарная неустойчивость Тейлора-Гертлера около вогнутой поверхности //Инж.-физ. журн. - 1993. -

67, N 1-2 .- С.3-9

6. Авраменко А.А., Халатов А.А. Неустойчивость Тэйлора-Гертлера в ламинарном градиентном пограничном слое //Пром. теплотехника. - 1993. - 15, N 3. - С.29-33.
7. Халатов А.А., Авраменко А.А., Дворянская О.А. Влияние различных факторов на ламинарное течение в криволинейном канале //Бионика. - 1993. - 26. - С.43-48.
8. Heat transfer and flow in the convex and concave walls of gas turbine nozzle blades with intensive secondary and vortex flows / A.A. Khalatov, A.A. Avramenko, L.V. Syskov, M.A. Litvinenko, S.A. Khalatov //Heat Transfer Reseach. - 1993. - 25, N 4. - P.468-481.
9. Khalatov A.A., Avramenko A.A. Taylor-Gortler turbulent instability on a concave surface with suction //High Temperature. - 1994. - 32, N 1. - P.68-70.
10. Халатов А.А., Авраменко А.А. Об условиях возникновения вихрей Тэйлора-Гертлера в турбулентном пограничном слое //Докл. АН Украины. - 1994. - N 2. - С.52-55.
11. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г. Центробежная неустойчивость Тэйлора-Гертлера турбулентного пограничного слоя //Труды I Российской конф. по теплообмену, 1994. - М.:И-во МЭИ. - Том I. - С.3-6.
12. Халатов А.А., Авраменко А.А. Неустойчивость Тэйлора-Гертлера в пограничном слое на вогнутой поверхности //Труды I Российской конф. по теплообмену, 1994. - М.:И-во МЭИ. - Том I. - С.274-279
13. Халатов А.А., Авраменко А.А. Турбулентная неустойчивость Тэйлора-Гертлера на вогнутой поверхности с отсосом //Теплофизика высок. температур. - 1994. - 32, N 1. - С.69-71.
14. Авраменко А.А., Халатов А.А. Влияние градиента давления на вихри Тэйлора-Гертлера в турбулентном пограничном слое около вогнутой поверхности //Пром. теплотехника. - 1994. - 16, N 2-3. - С.19-23.
15. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г. Центробежная неустойчивость турбулентного пограничного слоя на вогнутой поверхности в условиях вдува //Пром. теплотехника. - 1995. - 17, N 1-3. - С.126-128.
16. Авраменко А.А., Халатов А.А. Нелинейные эффекты вихрей Тэйлора-Гертлера в турбулентном пограничном слое //Пром. теплотехника. - 1995. - 17, N 4. - С.89-92.
17. Опыт применения программного пакета "Fluent" для расчета сложных термогазодинамических течений /А.А. Халатов, А.А. Авраменко, Н. Сайред и др. //Пром. теплотехника. - 1995. - 17, N 6. -

С.81-88.

18. Халатов А.А., Авраменко А.А., Кобзарь С.Г. Воздействие внешней турбулентности на неустойчивость Тэйлора-Гертлера //Теплофизика высок. температур. - 1995. - 33, N 5. - С.807-809.
19. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Поверхностное трение турбулентного пограничного слоя при наличии вихрей Тэйлора-Гертлера //Теплоэнергетика. - 1996. - N 2. - С.71-73.
20. The effect of external turbulence on the Taylor-Gortler instability //High Temperature. - 1995. - 33, N 5. - P.803-805.
21. Institute of Engineering Thermophysics (Tech. report) /A.A. Khalatov, A.A. Avramenko, I.V. Shevchuk, G.G. Geletukha //Technology report and product directory-Land, Sea and Air, ASME. - 1996. - N 1. - P.71-72.
22. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Неустойчивость Тэйлора-Гертлера и ее влияние на теплообмен в турбулентном пограничном слое на вогнутой поверхности // Пром. теплотехника. - 1996. - 18, N 2. - С.10-13.
23. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Теплообмен на вогнутой поверхности криволинейного канала с вихрями Дина //Минский международный форум по тепло- и массообмену (20-24 мая, 1996) - Т. 1., Ч. 1. - С.47-51.
24. Khalatov A.A., Avramenko A.A., Kobzar S.G. Heat transfer in boundary layer with Taylor-Gortler vortices over the concave surface // Proc. 2nd Europ. Thermal-Sciences and 14th UIT National Heat Transfer Conf. (Rome, Italy, 1996) - Vol. 1. - P.177-181.
25. Халатов А.А., Авраменко А.А. Неустойчивость Тэйлора-Гертлера на вогнутой поверхности в условиях влияния различных факторов //Изв. вузов. Авиац. техника. - 1996. - N 1. - С.16-23.
26. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Энергетический баланс вихрей Тэйлора-Гертлера //Пром. теплотехника. - 1996. - 18, N 5. - С.18-24.
27. Авраменко А.А. Гидродинамика и теплообмен в ламинарном пограничном слое при наличии вихрей Тэйлора-Гертлера //Мужгосударственная конф. "Тепломассообмен и гидродинамика в турбулентных течениях" (Алушта, 1992):Тез. докл. - С.122.
28. Халатов А.А., Авраменко А.А. Центробежная неустойчивость пограничного слоя //Международная конф. "Теория приближения и задачи вычислительной математики" (Днепропетровск, 1993): Тез. докл. - С.193.

29. Авраменко А.А. Условия возникновения вихрей Тэйлора-Гертлера в условиях отсоса пограничного слоя // IX школа-семинар мол. уч. и спец. "Современные проблемы газодинамики и тепломассообмена и пути повышения эффективности энергетических установок" (Москва, МГТУ, 1993): Тез. докл. - С.4.
30. Авраменко А.А., Халатов А.А., Кобзарь С.Г. Неустойчивость Дина в криволинейных каналах конфузорно-диффузорного типа // Пром. теплотехника. - 1996. - 18, N 6. - С.69-72.
31. Авраменко А.А., Кобзарь С.Г., Халатов А.А. Экспериментальное и теоретическое исследование турбулентной неустойчивости Тэйлора-Гертлера в пограничном слое на вогнутой поверхности // Инж.-физ. журн. - 1997. - 70, N 2. - С.280-284.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

α - температуропроводность, p - давление, φ, r, z - цилиндрические координаты, u, v, w - компоненты скорости соответствующие x, y, z в криволинейной системе координат, x, y, z - криволинейные координаты, γ_n - инкремент нарастания возмущений, ν - кинематическая вязкость, ρ - плотность, D, D'' - дифференциальные операторы, De_n, De - числа Дина, f_u, f_v - параметры продольного градиента давления, Go, Go^{**} - числа Гертлера, K, K_n - параметры кривизны, Nu - число Нуссельта, Pe - число Пекле, Pr - число Прандтля, Pr_t - турбулентное число Прандтля, St - число Стентона, η - автомодельная переменная, θ - безразмерная избыточная температура, ξ - относительная координата, Ψ - относительный коэффициент трения, Ψ^T - относительный коэффициент теплоотдачи, γ - отношение сторон криволинейного канала, b - волновое число.

SUMMARY

Avramenko A.A. Heat transfer and hydrodynamics over concave surfaces with secondary flows.

Thesis for a Degree "Doctor of Technical Sciences". Speciality 05.14.06 - "Engineering Thermophysics". Institute of Engineering Thermophysics, National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, 1997.

The basic laws of heat transfer processes and fluid dynamics in curvilinear flows near the concave surface under conditions of secondary flow effects were established. The approach to the

mathematical description of the centrifugal hydrodynamics instability in laminar and turbulent regimes and heat transfer under various boundary conditions based on the perturbations theory was developed. The improved method of calculation of fluid dynamics and heat transfer allowing for the basic peculiarities of the centrifugal centrifugal hydrodynamics instability and centrifugal mass forces effects on the flow structure was developed.

АННОТАЦИЯ

Авраменко А.А. Теплообмен и гидродинамика около вогнутых поверхностей с вторичными течениями.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06 - техническая теплофизика. Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев, 1997.

Установлены основные закономерности процессов теплообмена и гидродинамики в криволинейных потоках около вогнутой поверхности в условиях воздействия вторичных течений. Развита методика к математическому описанию центробежной гидродинамической неустойчивости при ламинарном и турбулентном режимах и процессов теплопереноса при различных граничных условиях, основанная на теории возмущений. Разработан усовершенствованный метод расчета процессов гидродинамики и теплообмена, учитывающих основные особенности воздействия центробежной гидродинамической неустойчивости и центробежных массовых сил на структуру потока.

Ключові слова: увігнута поверхня, центробіжна нестійкість, вихорі Тейлора-Гьортлера, вихорі Діна.

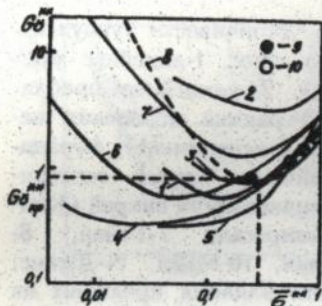


Рис.1. Диаграмма устойчивости. 1-8 - расчет, 9-10 - эксперимент. 1-Гертлер, 2-Мексин, 3-Айхара, 4-Кахавита, 5-Смит, 6-Херберт ($\delta^{**}/R_w = 6,6 \cdot 10^{-6}$), 7-Херберт ($\delta^{**}/R_w = 6,6 \cdot 10^{-6}$), 8 - настоящее исследование ($\delta^{**}/R_w = 0,02$), 9 - Вортманн, 10 - Биппс.

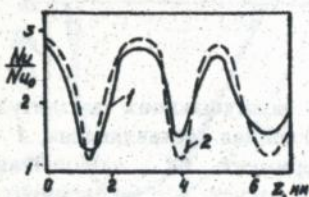


Рис.2. Теплоотдача в ламинарном пограничном слое на вогнутой поверхности. 1 - эксперимент, 2 - расчет.

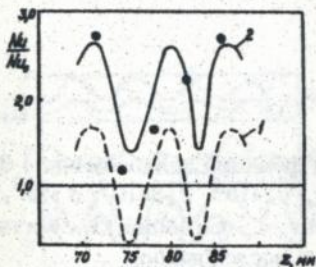


Рис.3. Теплоотдача в ламинарном пограничном слое на вогнутой поверхности. 1 - расчет (линейное приближение), 2 - расчет (нелинейное приближение), 3 - эксперимент (Маккормак и др.).

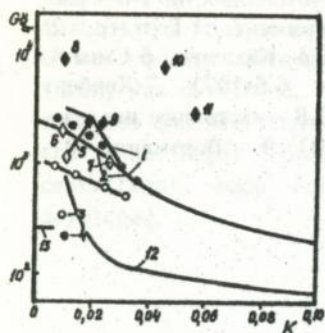


Рис.4. Диаграмма устойчивости турбулентного пограничного слоя. 1-линейное приближение (расчет), 2-нелинейное приближение (расчет), 3-граница появления неустойчивых вихрей (эксперимент), 4-граница появления устойчивых вихрей (эксперимент), 5-линия возникновения вихрей (Ким-Саймен), 6-Шивапрасад, 7-Томан, 8-Хофмвнн, 9-Мерони, 10-Мэйл, 11-Джинс, 12-расчет без учета влияния кривизны на турбулентную вязкость, 13- линия перехода по Липману; светлые значки - нет вихрей, темные значки-есть вихри.

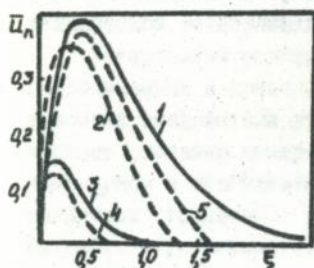


Рис.5. Профили возмущающих амплитуд скорости. 1,2 - линейная составляющая, 1 - расчет, 2 - эксперимент, 3,4 - нелинейная составляющая, 3 - расчет, 4 - эксперимент, 5 - эксперимент Рао (линейная составляющая)

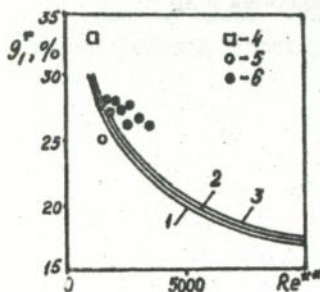


Рис.6. Линейная функция теплообмена. 1-3-расчет, 1- $\delta^{**}/R_w = 2 \cdot 10^{-3}$, 2 - $3 \cdot 10^{-3}$, 3 - 10^{-2} , 4 - 6 - эксперимент, 4 - Симонич, 5 - Кесторас, 6 - настоящее исследование.

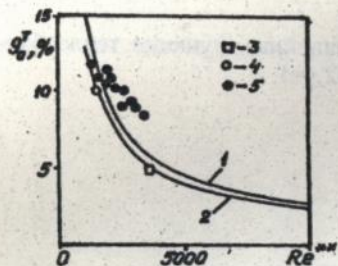


Рис. 7. Нелинейная функция теплообмена. 1-2- расчет, $1 - \delta^{*+}/R_w = 2 \cdot 10^{-3}$, $2 - 10^{-2}$, 3-5 - эксперимент, 3 - Мэйл, 4 - Кесторас, 5 - настоящее исследование.

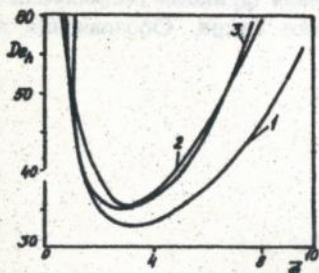


Рис. 8. Диаграмма устойчивости. 1 - линейное приближение, 2 - расчет (Рейд), 3 - нелинейное приближение.

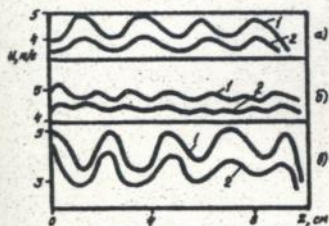


Рис. 9. Распределение скорости в плоском криволинейном канале. 1- $De=340$, 2 - $De=260$, а - $\zeta=0,25$, б - $\zeta=0,5$, в - $\zeta=0,75$.

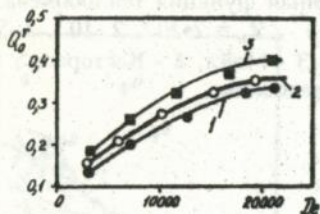


Рис. 10. Нелинейная функция теплообмена. 1 - $\gamma=5$, $\gamma=2$, $\gamma=1$.

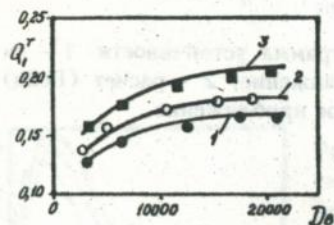


Рис. 11. Линейная функция теплообмена в области парного вихря. Обозначения на рис 10.

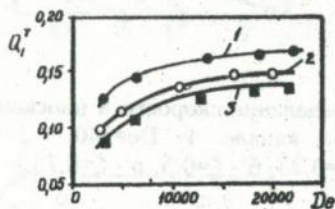


Рис. 11. Линейная функция теплообмена в области вихрей Дина. Обозначения на рис 10.

Подписано к печати 3.03.97 г. Формат 60x84/16
Бумага офсетная. Усл.-печ. лист. 20 Уч.-изд. лист 20.
Тираж 100. Заказ 73 Цена договорная.

Полиграф. уч-к Институту электродинамики НАН Украины
252057, Киев-57, проспект Победы, 56.

277310

277310

AB 37.341