

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. Ломоносова

На правах рукописи



МАЛАХОВА Татьяна Владимировна

НЕСТАЦИОНАРНАЯ ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН
КОЛЕБЛЮЩИХСЯ ТЕЛ

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2012

Работа выполнена на кафедре газовой и волновой динамики механико-математического факультета и в лаборатории аэромеханики и волновой динамики НИИ механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Гувернюк Сергей Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор
Исаев Сергей Александрович

кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Прокофьев Владислав Викторович

Ведущая организация: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН
(г. Новосибирск-90)

Защита диссертации состоится 25 мая 2012 г. в 15 часов на заседании Диссертационного совета Д 501.001.89 при Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, МГУ, главное здание МГУ, механико-математический факультет, аудитория 16-10.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке механико-математического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «___» апреля 2012г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета Д.501.001.89,
д.ф.-м.н.



А.Н. Осипцов

Общая характеристика работы.

Актуальность. В ряде фундаментальных и технических приложений возникает необходимость учета существенно нестационарных взаимодействий сплошной среды и погруженных в нее подвижных, в частности, колеблющихся тел. Естественные периодические вихревые структуры типа дорожки Кармана, возникающие при обтекании неподвижных цилиндрических тел в вязкой жидкости, могут существенно изменяться под влиянием дополнительных вынужденных колебаний тел, приводя также к аномальным изменениям гидродинамических нагрузок. Актуальность таких задач подтверждается регулярно появляющимися в последние годы публикациями по данному направлению в ведущих мировых журналах (J. Fluid Mech. и др). Вместе с тем очень мало работ, в которых бы затрагивались вопросы влияния гидродинамических эффектов, вызванных колебаниями, на теплообменные процессы около колеблющихся тел, что можно объяснить трудностями проведения соответствующих физических и вычислительных экспериментов.

Исследование процессов вихреобразования представляет интерес и в задачах термогидравлики, так как эти процессы, с одной стороны, интенсифицируют теплообмен, а с другой стороны, изменяют гидравлическое сопротивление тел. Возможность опережающего повышения скорости теплообмена по сравнению с увеличением гидравлического сопротивления обуславливает актуальность разработки эффективных методов расчета нестационарных течений теплопроводной жидкости.

Одним из технических объектов, для которых актуальны разработки методов расчета силовых и тепловых взаимодействий колеблющихся цилиндрических тел с вязкой жидкостью, является энергетическое оборудование с поперечным обтеканием пучков труб потоком жидкости или газа (например, потоком теплоносителя в парогенераторах и теплообменных аппаратах различного назначения). Согласно данным статистики, до 30% остановок энергетических блоков происходит вследствие поломок оборудования теплообменных аппаратов различного назначения, ко-

торые обусловлены интенсивными вибрациями теплообменных труб и их сборок. В практике проектирования теплообменных аппаратов существуют многие проблемы, относящиеся к моделированию взаимодействия потока с колеблющимися трубами и к пониманию сложной структуры обтекания, что не всегда позволяет получать адекватные данные о характеристиках теплообмена и нестационарных гидродинамических нагрузках при нахождении режимов течения с минимальной гидродинамической интенсивностью.

До недавнего времени вопросу о структуре вихревых полей при обтекании нагретых тел не уделялось достаточного внимания. Усилия исследователей были направлены, в основном, на определение интегральных характеристик теплообмена – зависимостей среднего числа Нуссельта от чисел Рейнольдса и Прандтля. Можно отметить недостаток на сегодняшний день экспериментальных данных и достоверных аналитических зависимостей, позволяющих проводить расчёты различного рода технических устройств, использующих взаимодействие потока с нагретой цилиндрической поверхностью, совершающей продольные, поперечные, вращательные и смешанные колебания.

Решающую роль могли бы сыграть методы виртуального вычислительного эксперимента. Однако применение традиционных разностных, конечно-объемных и иных сеточных методов численного моделирования, реализованных, в том числе, в широко известных коммерческих пакетах инженерного анализа (Fluent, Star CD, CFX и др.), сталкивается с известными трудностями учета изменяющейся во времени геометрии области течения при колебаниях тел, поэтому соответствующие известные результаты носят ограниченный характер по конфигурации течений и диапазону параметров колебаний. Указанные трудности можно обойти, обратившись к лагранжевым бессеточным методам, которых к настоящему времени в мире разработано уже немало. Для решения плоских задач моделирования нестационарных термогидродинамических процессов при обтекании систем тел, перемещающихся в пространстве с большими знакопеременными ускорениями,

наибольшее теоретическое обоснование получил разработанный в России бессеточный метод ВВТД (вязких вихре-тепловых доменов метод Г.Я. Дынниковой, С.В. Гувернюка и П.Р. Андропова).

В связи с вышесказанным, очевидна актуальность создания и верификации «бессеточного» программного комплекса для адекватного воспроизведения в виртуальном вычислительном эксперименте сложных нестационарных гидродинамических явлений взаимодействия вязкой жидкости с колеблющимися телами и численное исследование сопутствующих механизмов нестационарного теплообмена. В том числе – нахождение корреляций между изменением гидродинамического сопротивления тел и интенсивностью их теплоотдачи, в частности, при обтекании колеблющихся одиночных цилиндров и их тандемов.

Цель диссертационной работы. Целью работы является создание и детальная верификация программного комплекса, реализующего бессеточный численный метод ВВТД, и на этой основе – исследование процессов вихреобразования и вынужденной тепловой конвекции при обтекании колеблющихся нагретых цилиндров в вязкой жидкости с выявлением закономерностей и механизмов влияния вихревых структур на характеристики нестационарного теплообмена.

Научная новизна. Разработан и верифицирован распараллеленный вычислительный код VVHDFlow бессеточного численного моделирования, реализующий метод ВВТД для решения широкого класса плоских задач нестационарного обтекания колеблющихся тел в неограниченном пространстве вязкой теплопроводной жидкости.

Впервые с помощью вычислительного эксперимента воспроизведен и исследован наблюдавшийся в физических экспериментах Танеды¹ эффект угнетения периодической вихревой дорожки за цилиндром, совершающим высокочастотные вращательные колебания. В пространстве параметров подобия найдены границы перехода между режимами «захвата частоты», симметризации и хаотизации вихре-

¹ Taneda S. Visual observations of the flow past a circular cylinder performing a rotatory oscillation // Computational Mechanics. 1978. Pp. 1038–1043.

вой системы в ближнем гидродинамическом следе при продольных колебаниях одиночного и тандема цилиндров.

Впервые получены систематические данные о нестационарной теплопередаче при обтекании колеблющихся цилиндров и их тандемов. Обнаружен диапазон параметров продольных колебаний цилиндра, в котором суммарная теплопередача в несколько раз превышает теплопередачу от неподвижного цилиндра. Для случая смешанных поперечно-продольных колебаний цилиндра обнаружено, что могут достигаться оптимальные с точки зрения термогидродинамической эффективности соотношения между сопротивлением и теплоотдачей цилиндра, когда происходит рост теплообмена при одновременном снижении гидродинамического сопротивления.

Практическая значимость. Результаты проведенного в диссертации анализа термогидродинамических свойств обтекания колеблющихся цилиндрических тел будут полезны при решении задач создания практических методик и программных средств, позволяющих автоматизировать процессы моделирования и анализа влияния вибраций труб и трубных пучков на нестационарные гидродинамические нагрузки и теплообмен при поперечном обтекании в различных теплообменных устройствах.

Верифицированные программные коды VVHDFlow позволяют рассчитывать обтекание и теплоотдачу недеформируемых контуров произвольной формы при произвольных плоских движениях, что может быть использовано для расчета ряда технических устройств, а также при проведении фундаментальных исследований, связанных с разработкой и определением границ применимости феноменологических моделей нестационарных сил при движении тел в сопротивляющейся сплошной среде.

Результаты работы углубляют понимание гидродинамических и тепловых явлений, происходящих при вибрационных взаимодействиях тел. Полученные качественные и количественные результаты используются в научно-

исследовательской работе НИИ механики МГУ при планировании и проведении физических экспериментов.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

- Программный комплекс VVHDFlow для численного решения бессеточным методом ВВТД плоских задач нестационарной гидродинамики и теплообмена при произвольном движении систем твердых тел в неограниченном пространстве несжимаемой жидкости постоянной плотности и вязкости.
- Детальное тестирование бессеточного метода на репрезентативных задачах, имеющих экспериментальные и численные аналоги: распространение в следе за цилиндром визуализирующей пассивной примеси ($Re=140$); мгновенные и осредненные распределения давления, трения и теплового потока по поверхности кругового и треугольного цилиндров ($Pr=0.7$, $10^2 \leq Re \leq 10^4$); до- и сверхкритические режимы обтекания вращающегося с постоянной скоростью цилиндра ($Re = 200$); развитие динамического и теплового пограничных слоев на тонкой прямоугольной пластине ($0.7 \leq Pr \leq 100$, $Re \leq 1000$); структура поля возмущений вокруг цилиндра, совершающего линейно-поляризованные осцилляции конечной амплитуды в неограниченном пространстве покоящейся вязкой жидкости.
- Параметрическая классификация режимов обтекания колеблющихся цилиндров, включающая определение границ перехода между режимами захвата частоты, симметризации, стабилизации, а также хаотизации вихревых систем в ближнем гидродинамическом следе при поступательных и вращательных колебаниях цилиндров и их тандемов.
- Закономерности нестационарного теплообмена при различных типах колебаний цилиндров и их тандемов, в том числе - корреляции между перестройкой вихревых систем и изменением теплоотдачи, а также выявление оптимальных с точки зрения термодинамической эффективности диапазонов параметров, когда происходит рост теплообмена при одновременном снижении гидродинамического сопротивления.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях и симпозиумах: конференция МГУ «Ломоносовские чтения» (2009, 2010, 2012 гг.); XVII и XVIII школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева (Москва, 2009, 2011 гг.); XIV международный симпозиум «Методы дискретных особенностей в задачах математической физики» (Херсон, Украина, 2009 г.); конференция-конкурс молодых ученых НИИ механики МГУ (2009, 2010, 2011 гг.); XXI научно-техническая конференция ЦАГИ по аэродинамике (пос. им. Володарского, 2010 г.); международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, Украина, 2010 г.); VII Всероссийская межвузовская конференция молодых ученых (Санкт-Петербург, 2010 г.); XVI школа-семинар «Современные проблемы аэрогидромеханики» под руководством академика Г.Г. Черного (Сочи, 2010 г.); The 5th International Conference of Vortex Flows and Vortex models (Казерта, Италия, 2010 г.); V Российская национальная конференция по теплообмену (Москва, 2010 г.); международная научная школа молодых ученых и специалистов «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил: Вихри и волны» (Москва, 2011 г.); международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность» (Звенигород, 2012 г.).

Работа докладывалась и получила одобрение на научно-исследовательских семинарах: по газовой и волновой динамике под руководством академика Р.И. Нигматулина, по теплофизике под руководством академика А.И. Леонтьева, по механике сплошных сред под руководством профессора В.П. Карликова, академика А.Г. Куликовского, члена-корреспондента РАН О.Э. Мельника, а также на объединенном видеосеминаре ЦАГИ – ИТПМ СО РАН – СПбГПУ – НИИМ МГУ по аэрогидромеханике.

За работы «Нестационарная термогидродинамика осциллирующего цилиндра» и «Развитие программного комплекса для бессеточного численного метода ВВТД», вошедшие в состав диссертации, автору присуждена 1-я премия на конфе-

рентии Ломоносов-2010 и диплом I степени VII Всероссийской межвузовской конференции молодых ученых в 2010 г. За работы «Численное моделирование нестационарного теплопереноса в несжимаемой жидкости методом вязких вихре-тепловых доменов» и «Численное моделирование влияния осцилляций нагретого цилиндра на его сопротивление и теплоотдачу», вошедшие в состав диссертации, автор удостоена дипломов III степени на XVII школе-семинаре молодых ученых и специалистов под руководством академика А.И. Леонтьева и на V Всероссийской национальной конференции по теплообмену. За работу «Влияние колебаний на нестационарную теплопередачу элементов теплообменников», лежащую в основе диссертации, автор удостоена звания победителя конкурсной программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» У.М.Н.И.К. фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере при поддержке Минобрнауки РФ в 2010 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 22 печатных работах, среди которых 3 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК и одно свидетельство о госрегистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы [1 - 22]. Автор диссертации участвовала в математической постановке задач и обсуждении результатов исследования, а также отбирала наиболее интересные результаты расчетов для оформления в виде печатных работ, внесла непосредственный вклад в создание оригинальных распараллеленных вычислительных кодов VVHDFlow и лично выполнила все описанные в диссертации расчеты на суперкомпьютерных платформах МГУ.

Статьи [2, 3, 15, 17, 21] опубликованы без соавторов.

Структура работы. Работа состоит из введения, обзора, четырех глав, заключения и списка литературы. В работе содержится 105 рисунков, 5 таблиц и 120 библиографических ссылок. Общий объем диссертации 150 страниц.

Краткое содержание работы.

Во **введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения. Приводится **обзор** литературы по проблемам вязкого обтекания колеблющихся цилиндров и вынужденной конвекции, а также краткий обзор существующих методов расчета нестационарных течений вязкой несжимаемой жидкости и конвективного теплообмена.

В **первой главе** дается постановка задачи, изложены теоретические основания бессеточного метода ВВТД для численного решения плоских уравнений Навье-Стокса и теплопроводности, описана структура программного комплекса VVHDFlow.

Всюду в работе предполагается, что сплошная среда представляет собой вязкую несжимаемую жидкость постоянной плотности $\rho = const$ с постоянным коэффициентом кинематической вязкости $\nu = const$. Внешние массовые силы отсутствуют. Жидкость занимает все неограниченное пространство, ее движение описывается уравнениями Навье-Стокса и неразрывности, распространение тепла описывается уравнением теплопроводности:

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} = \mathbf{V} \cdot \boldsymbol{\Omega} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} - \frac{1}{\rho} \left(p + \frac{V^2}{2} \right), \quad \nabla \mathbf{V} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{V} \nabla T = a \nabla^2 T; \quad \boldsymbol{\Omega} = \nabla \times \mathbf{V}, \quad a = \frac{\nu}{Pr}.$$

В начальный момент времени $t=0$ среда покоится во всем пространстве относительно некоторой абсолютной неподвижной декартовой системы координат $\{x_0, y_0, z_0\}$ и имеет постоянную температуру $T = T_\infty$. В жидкость погружено некоторое количество абсолютно твердых цилиндрических тел произвольного поперечного сечения с образующей параллельной оси z_0 , так что в плоскости x_0, y_0 имеется конечный набор замкнутых недеформируемых непроницаемых контуров (характерный поперечный размер D). При $t > 0$ допускается произвольное движение этих контуров в плоскости x_0, y_0 по детерминированным законам без соударений.

Предполагается, что на поверхности всех тел выполняются граничные условия прилипания, а вызванное движением тел возмущенное течение жидкости остается плоскопараллельным в любой момент времени $t > 0$, то есть: $\mathbf{V} = \{V_{x_0}, V_{y_0}, 0\}$, $\mathbf{\Omega} = \Omega \mathbf{e}_z$, где $\mathbf{e}_z = \{0, 0, 1\}$ - единичный вектор, направленный перпендикулярно плоскости движения x_0, y_0 . На поверхности тел, кроме условий прилипания, ставится условие изотермической стенки $T=T_w > T_\infty$, а в бесконечности - условие затухания всех возмущений.

Класс движений тел ограничивается случаем, когда каждый контур в плоскости x_0, y_0 совершает поступательные и/или вращательные колебания относительно сопутствующей декартовой системы координат x, y , перемещающейся с постоянной скоростью $\mathbf{V}_\infty = -\mathbf{e}_x V_\infty$ относительно абсолютной системы x_0, y_0 : $x_0 = x - t V_\infty$, $y_0 = y$. Параметры подобия: число Рейнольдса $Re = V_\infty D / \nu$ и число Прандтля $Pr = \rho \nu c / \lambda$. Тепловой поток q с поверхности тела при переходе к безразмерным переменным характеризуется числом Нуссельта $Nu = qD / \lambda(T_w - T_\infty)$.

Бессеточный метод ВВД² основан на лагранжевом представлении двумерных вихревых и тепловых полей в виде дискретных вихревых и тепловых элементов (доменов), движущихся в пространстве по законам, вытекающим из уравнений Навье-Стокса и теплопроводности, он является обобщением на случай учета теплопроводности жидкости метода вязких вихревых доменов³. Движение доменов относительно жидкости происходит с диффузионной и термодиффузионной скоростями, зависящими от градиента завихренности и температуры соответственно. Не требуется каким-либо специальным образом постулировать условия отрыва или местоположение точек схода вихревой пелены на теле. Образование и отрыв пограничного слоя на гладкой поверхности получается автоматически в ходе общего

² Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Лагранжев численный метод решения двумерных задач свободной конвекции // Труды IV Российской национальной конференции по теплообмену, т.3. М.: Изд.дом МЭИ, 2006. С. 38 - 41.

³ Андронов П.Р., Гувернюк С.В., Дынникова Г.Я. Вихревые методы расчета нестационарных гидродинамических нагрузок. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2006. 184 с.

расчета вязкого обтекания тела с граничным условием прилипания на его поверхности. В **разделе 1.3** дано изложение основных интегральных представлений метода ВВТД для расчета диффузионной и термодиффузионной скорости, а также давления и напряжений трения.

Программная реализация метода ВВТД представлена в **разделе 1.4**. Разработанные вычислительные коды VVHDFlow реализуют алгоритм расчета на системах с общей памятью с использованием стандарта OpenMP. В основе параллельного алгоритма для многопроцессорных систем с общей памятью лежит последовательный алгоритм метода ВВТД (на рис. 1 приведена блок-схема). Обсуждаются вопросы контроля схемной вязкости и ускорения вычислений.

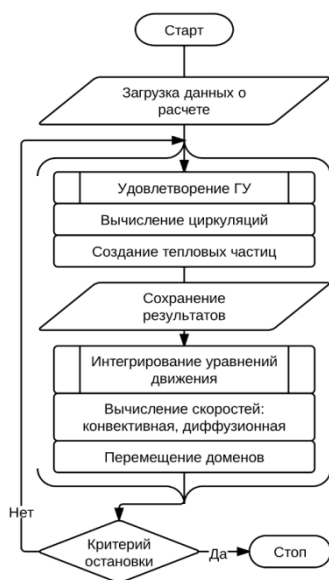


Рис. 1

Поскольку первичным результатом расчета при данном бессеточном моделировании является дискретный набор доменов – абстрактных математических объектов, важное значение имеет специализированный постпроцессор, позволяющий строить физические поля скорости, давления, температуры, а так же линии тока, линии меченых частиц и изотермы.

Во **второй главе** приводятся результаты систематического тестирования программного комплекса VVHDFlow на задачах, имеющих экспериментальные и известные численные аналоги. В **разделе 2.1** рассмотрена

задача о ламинарном обтекании нагретого цилиндра при $Re = 140$, $Pr = 0.7$. Результаты бессеточного моделирования сравниваются с данными сеточных расчетов С.А. Исаева (ТВТ, 2005) и с экспериментальными данными из альбома Ван-Дайка, рис. 2. Здесь же исследована задача о формировании дрейфующих вторичных отрывов на кормовой части цилиндра, влияющих на интенсивность теплообмена. Воспроизведен известный эффект возрастания вклада теплоотдачи кормовой части цилиндра в суммарный тепловой поток при увеличении числа

Рейнольдса в диапазоне $Re = 10^2 - 10^4$. Результаты бессеточного моделирования сравниваются с данными сеточных расчетов S. Bouhairie (JFM, 2007) и с экспериментальными данными из нескольких литературных источников.

В разделе 2.2 представлены результаты тестирования комплекса VVHDFlow на примере задачи о продольном обтекании тонкой прямоугольной пластины со скруглением передней и задней кромок при значениях чисел Рейнольдса 100, 1000 (по длине пластины) и изменении чисел Прандтля в диапазоне от 0.7 до 100. Результаты для плоского участка вдали от кромок пластины хорошо согласуются с известными соотношениями теории ламинарного гидродинамического и теплового пограничных слоев.

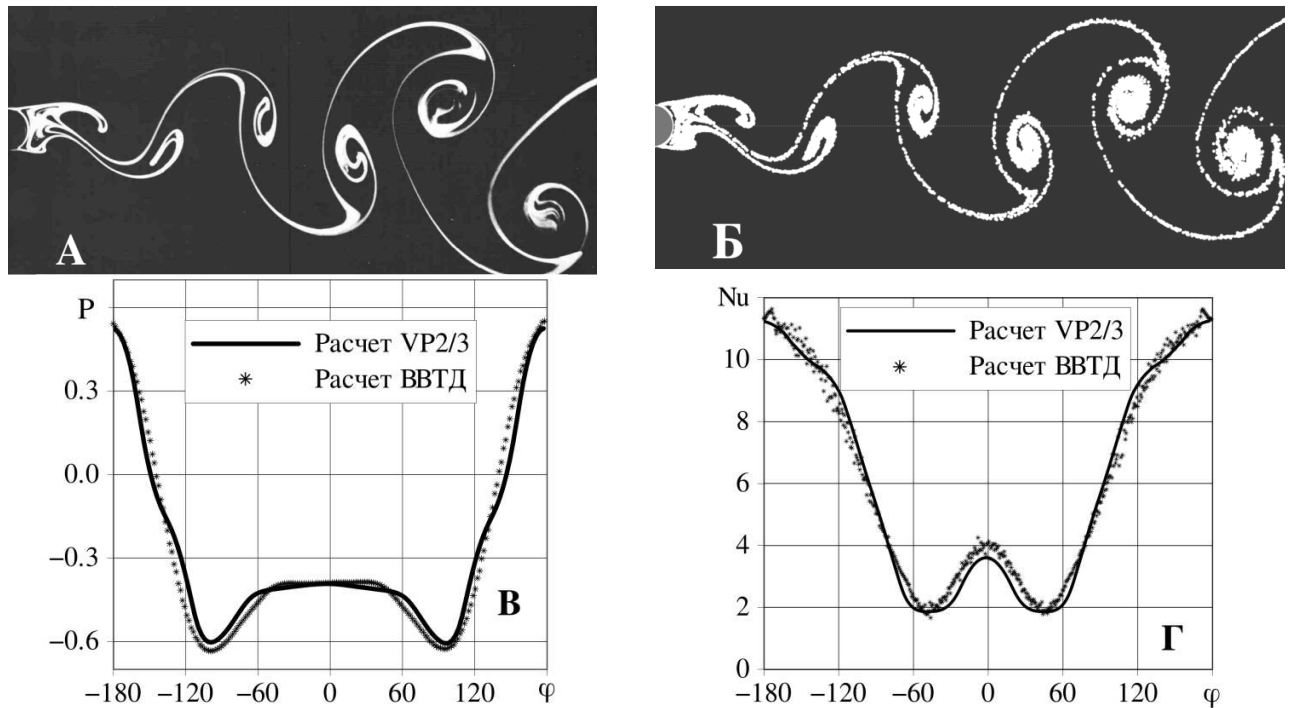


Рис. 2. Ламинарное обтекание неподвижного цилиндра при $Re = 140$, $Pr = 0.7$; (А) – эксперимент, (Б) – расчет (VVHDFlow) распространения визуализирующей пассивной примеси; (В), (Г) – распределение давления и тепловых потоков по поверхности цилиндра при сеточном (VP2/3) и бессеточном (VVHDFlow) моделировании ($P = (p - p_\infty) / \rho V_\infty^2$).

В разделе 2.3 рассматривается задача о теплопередаче с поверхности трехгранного стержня при числах Re от 50 до 150 и $Pr = 0.71$. Результаты бессеточных расчетов структуры вихревого следа и распределения по граням треугольного профиля локального числа Нуссельта хорошо согласуются с известными данными сеточного

моделирования с помощью пакета FLUENT (ISRN Mech. Engineerin, 2005 и IJNMF, 2011). В **разделе 2.4** рассчитаны примеры до- и сверхкритических режимов обтекания вращающегося с постоянной скоростью цилиндра. Картины линий тока и зависимость коэффициента сопротивления от параметра вращения цилиндра сравниваются с известными расчетными данными, полученными сеточными методами, базирующимися на переменных функция тока – завихренность. В конце главы 2 рассмотрен пример бессеточного расчета вихревого поля вокруг цилиндра, совершающего возвратно-поступательные колебания в покоящейся вязкой жидкости. Результаты расчета осредненных за период колебаний линий тока качественно согласуются с известным экспериментом из альбома Ван-Дайка, рис. 3.

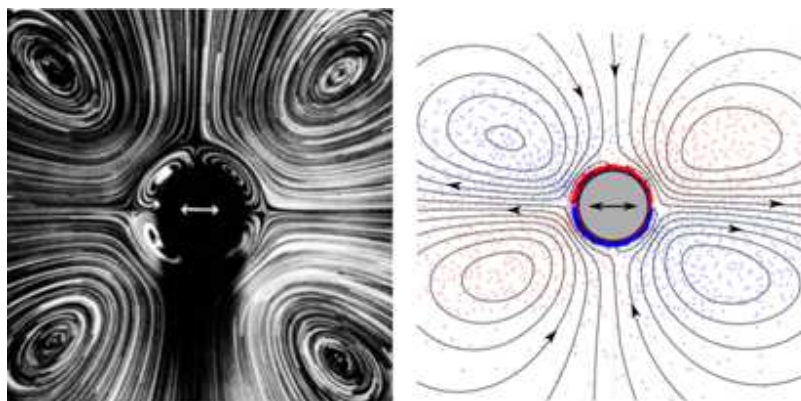


Рис. 3

В целом, результаты тестирования кодов VVHDFlow на репрезентативных задачах подтверждают эффективность разработанного программного комплекса VVHDFlow как исследовательского инструмента для решения широкого класса плоских задач вязкого взаимодействия и нестационарного теплообмена.

Результаты второй главы опубликованы в работах [6, 7, 21] и в отчетах НИИ механики МГУ.

В **третьей главе** с помощью разработанного программного комплекса VVHDFlow проводится систематическое исследование нестационарных вихревых полей и гидродинамических нагрузок в задачах о поступательных и вращательных колебаниях цилиндров и их тандемов в потоке вязкой несжимаемой жидкости при $10^2 < Re < 10^4$. В **разделе 3.1** рассмотрены продольные колебания одиночного ци-

линдра, рис. 4, анализируется структура вихревого следа и гидродинамические нагрузки в зависимости от параметра f / f_0 , характеризующего соотношение между частотой вынужденных колебаний f и характерной гидродинамической частотой f_0

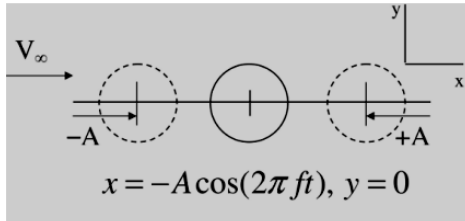


Рис. 4

вихревой дорожки за неподвижным цилиндром при том же самом числе Рейнольдса. Диапазон f / f_0 охватывает пять режимов взаимодействия колеблющегося цилиндра с потоком жидкости

(рис.5): при малых f / f_0 вихревая картина мало отличается от случая неподвижного цилиндра (режим I); затем при $f / f_0 = 0.6 - 1.3$ наблюдаются существенные изменения, характеризующиеся образованием несимметричных систем крупных парных вихревых сгустков (режимы II — III); далее, в диапазоне $f / f_0 \approx 1.4 - 3.2$, наблюдается симметризация следа, когда с нижней и верхней сторон цилиндра одновременно сходят одинаковые вихревые сгустки противоположного знака, формируя устойчивую симметричную структуру ближнего следа (режим IV); наконец, при $f / f_0 > 3$ симметричная структура следа нарушается и происходит хаотизация вихревых систем в следе (режим V).

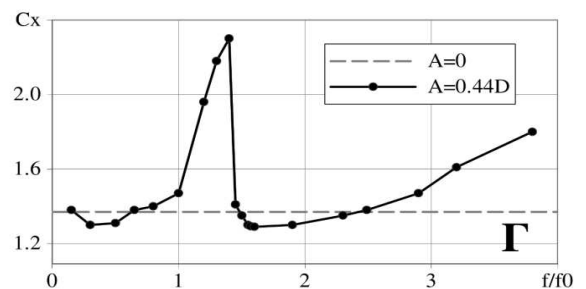
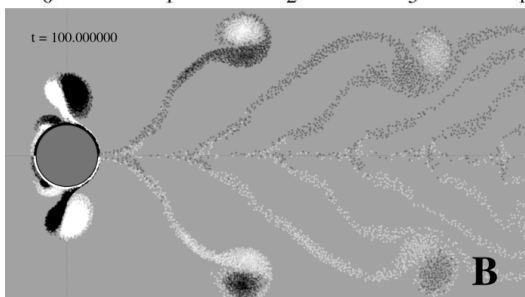
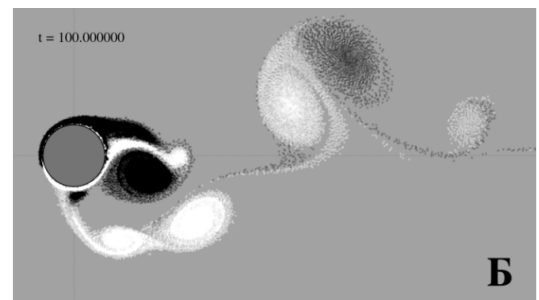
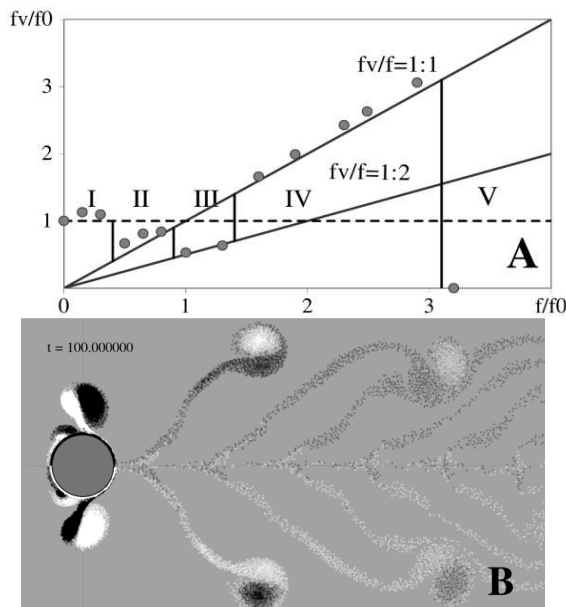


Рис. 5. Продольные колебания при $Re = 570$, $A = 0.44D$: (А) – классификация режимов обтекания I - V, (Б) – режим III, (В) – режим IV, (Г) – зависимость коэффициента сопротивления от частоты колебаний цилиндра.

На рис. 5, (А) величина f_v определена как главная частота колебаний коэффициента подъемной силы $C_y(t)$, действующей на цилиндр в процессе вынужденных колебаний. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными Y. Yokoi⁴ в которых аналогичная классификация выполнена по результатам измерения скорости в следе за колеблющимся цилиндром. В разделе 3.2 исследуются поперечные колебания круглых и трехгранных цилиндрических стержней, диапазон рассмотренных частот вынужденных колебаний $0 < f / f_0 < 5$. Получено, что коэффициент сопротивления кругового стержня с увеличением частоты колебаний монотонно растет, в то время как в случае треугольного стержня имеются участки резкого падения сопротивления. В разделе 3.3 изучаются вихревые структуры и гидродинамические нагрузки, действующие на пару цилиндров при их различном расположении в тандеме с учетом взаимной интерференции. Определены параметры задачи, при которых интерференция вихревых систем за цилиндрами существенно влияет на их сопротивление.

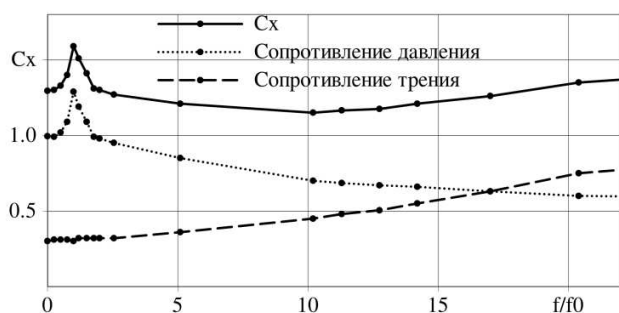


Рис. 6. Влияние частоты угловых колебаний на суммарное сопротивление C_x и его составляющие по давлению и трению ($Re=111$).

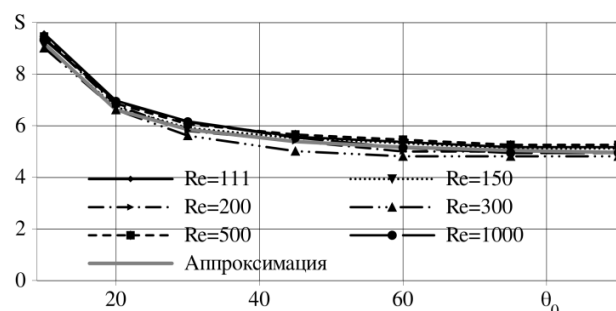


Рис. 7. Границы перехода к режиму стабилизации ближнего следа при обтекании цилиндра, совершающего вращательные колебания ($S=fD/V_\infty$)

В разделе 3.4 детально исследуется задача о вращательных колебаниях $\theta = \theta_0 \cos(2\pi f t)$ кругового цилиндра в потоке вязкой жидкости. Впервые в расчетной практике удалось воспроизвести наблюдавшийся в экспериментах Танеды эффект угнетения вихревой дорожки Кармана при высокочастотных угловых колебаниях. Приводятся картины последовательных фаз стабилизации течения в следе за

⁴ Yokoi Y., Hirao K. Vortex flow around an in-line forced oscillating circular cylinder // Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. 2008. Vol. 74, No. 746. Pp. 2099–2108.

цилиндром при «включении» высокочастотных вынужденных вращательных колебаний, а также – последующих фаз потери устойчивости следа после «выключения» колебаний, и фаз повторной стабилизации следа после возобновления колебаний. Исследовано влияние относительной частоты угловых колебаний f / f_0 на суммарное сопротивление цилиндра C_x и на его составляющие от вклада сил давления и трения рис. 6. До сих пор в литературе не было данных по C_x при $f / f_0 > 6$, поэтому принято было считать, что с ростом частоты вынужденных колебаний коэффициент сопротивления цилиндра продолжает уменьшаться. В наших расчетах диапазон вынужденных частот был существенно расширен и обнаружено немонотонное поведение суммарного C_x , вызванное действием двух противоположных факторов: с ростом $f / f_0 > 1$ вклад сил давления монотонно убывает, а вклад сил трения монотонно возрастает, что в итоге приводит к существованию минимума суммарного сопротивления, при этом аномальный всплеск суммарного гидродинамического сопротивления цилиндра в окрестности $f / f_0 = 1$ полностью обусловлен поведением сил давления, рис. 6. На рис. 7 представлена диаграмма границ области существования режимов обтекания со стабилизированным следом. В параметрическом пространстве $(Re, \theta_0, S = fD / V_\infty)$ расчетные данные, в которых был получен эффект Танеды, удовлетворяют критерию

$$S > F(\theta_0, Re) \approx a \theta_0^k + b \cdot Re^m + c$$

с коэффициентами $a \approx 0.56, k \approx -1.2, b \approx 73.3, m \approx -0.63, c \approx 4.64$, полученными методом наименьших квадратов при $100 < Re < 1000, 0 < \theta_0 < \pi / 2$.

При высокой частоте колебаний ($S > F$) в пристеночном слое вокруг цилиндра образуются тонкие концентрические слои знакопеременной завихренности (рис. 8), которые в значительной степени успевают аннигилировать, прежде чем сносятся набегающим потоком, в результате в след поступает существенно меньше завихренности, чем при медленных колебаниях, и он оказывается более устойчивым. В этом, по-видимому, состоит механизм эффекта Танеды. Для его воспроиз-

ведения в вычислительном эксперименте необходимо обеспечить высокое разрешение поля завихренности в пристеночной области и устойчивость вычислительной схемы по отношению к резким градиентам напряженности этого поля. Очевидно, разработанные на базе метода ВВД вычислительные коды VVHDFlow удовлетворяют перечисленным требованиям.

Результаты третьей главы опубликованы в работах [1, 2, 3, 10, 17].

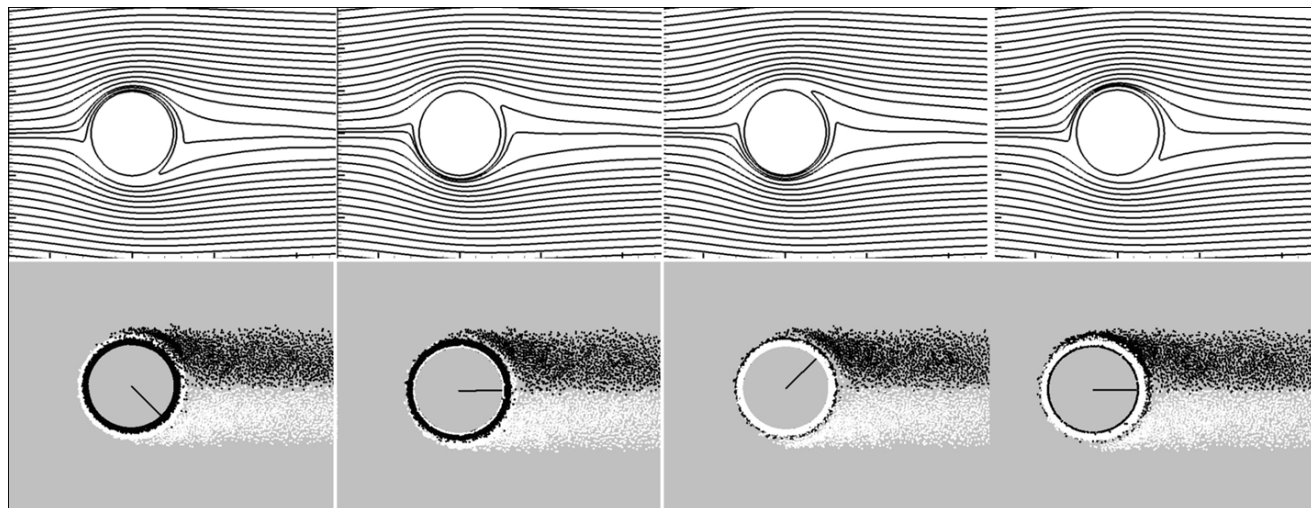


Рис. 8.

В четвертой главе исследуется влияние вынужденных колебаний нагретых цилиндрических тел и вызванных этими колебаниями возмущений гидродинамических полей (рассмотренных в главе 3) на характеристики теплообмена. Из-за нестационарности течения тепловая часть задачи должна решаться совместно с гидродинамической.

В разделе 4.1 приводятся результаты расчета теплообмена при обтекании цилиндра, вращающегося с постоянной скоростью α ($0 < \alpha < 5$, $100 < Re < 4000$, $Pr = 1$) или совершающего гармонические угловые колебания (как в 3.4). Постоянное вращение во всех случаях приводит к уменьшению теплообмена, причем для больших Re наблюдается более интенсивное падение - почти на порядок при $Re = 4000$, что можно объяснить подавлением вторичных отрывов на кормовой части цилиндра при докритических режимах обтекания вплоть до ликвидации первичного отрыва на сверхкритических режимах. При гармонических вращательных колебаниях с не-

большими и умеренными частотами $f / f_0 < 10$ также наблюдается уменьшение теплоотдачи по сравнению со случаем неподвижного цилиндра, и лишь при высоких частотах, близких к границе перехода на режим стабилизированного следа $S \approx F(\theta_0, Re)$, происходит превышение начального уровня теплоотдачи.

В разделе 4.2 исследовано влияние поступательных колебаний круглых и трехгранных стержней на характеристики теплообмена. В целом зависимость, теплоотдачи от частоты колебаний цилиндра менее сложна, чем зависимость коэффициента сопротивления. Так для случая колебаний, при которых получена зависимость $C_x(f / f_0)$ на рис. 5, (Г), суммарная теплоотдача $Nu(f / f_0)$ всюду возрастает, рис. 9, (А), при этом локальный скачок соответствует переходу на режим IV симметризации вихревого следа (рис. 5, (В)). Структура температурных полей до и после симметризации следа показана на рис. 9, (Б). В этом же разделе представлены результаты для поперечно колеблющихся круглых и трехгранных стержней. Показано, что при больших амплитудах ($A \approx 0.3$) существенный рост теплоотдачи наступает при частотах $f / f_0 > 2$, в то время как при малых амплитудах ($A \approx 0.1$) стержней слабо зависит от частоты колебаний.

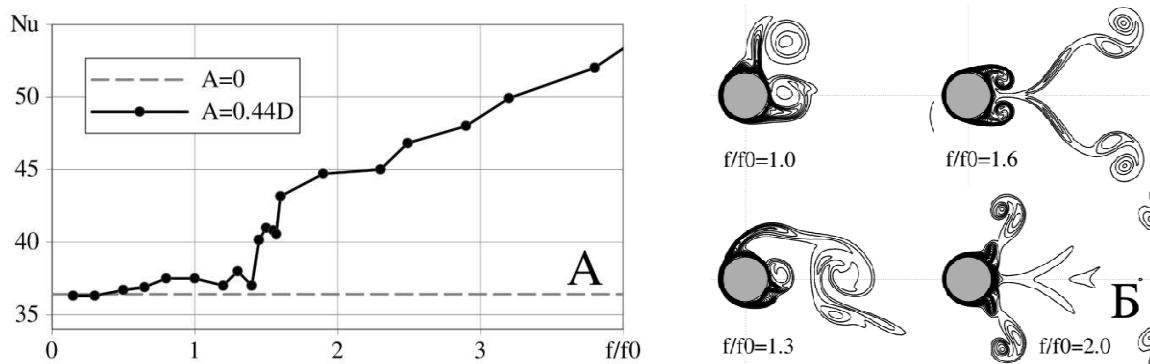


Рис. 9. Теплопередача при продольных колебаниях круглого цилиндра ($Re=570, A=0.44D$): (А) – зависимость интегрального числа Нуссельта, (Б) – структура мгновенных изотерм.

Большой объем расчетов обтекания и теплоотдачи круглого цилиндра выполнен для смешанных колебаний, представляющих собой суперпозицию поперечных и продольных гармонических колебаний общего вида (с различными амплитудами A_x, A_y и частотами по продольному и поперечному направлениям S_x, S_y). Выявлены

оптимальные сочетания параметров колебаний, обеспечивающие минимум сопротивления при максимуме теплоотдачи, рис. 10.

В разделе 4.3 исследованы особенности теплоотдачи колеблющихся тандемов в виде последовательной или параллельной сборки одинаковых цилиндров. Получено, что в зависимости от относительного расстояния между элементами сборки и ее ориентации в потоке суммарная теплоотдача тандемов может быть как ниже так и значительно выше, чем удвоенная теплоотдача уединенного цилиндра.

Результаты главы 4 опубликованы в работах [3, 5, 8, 12, 15, 16, 17, 21, 22].

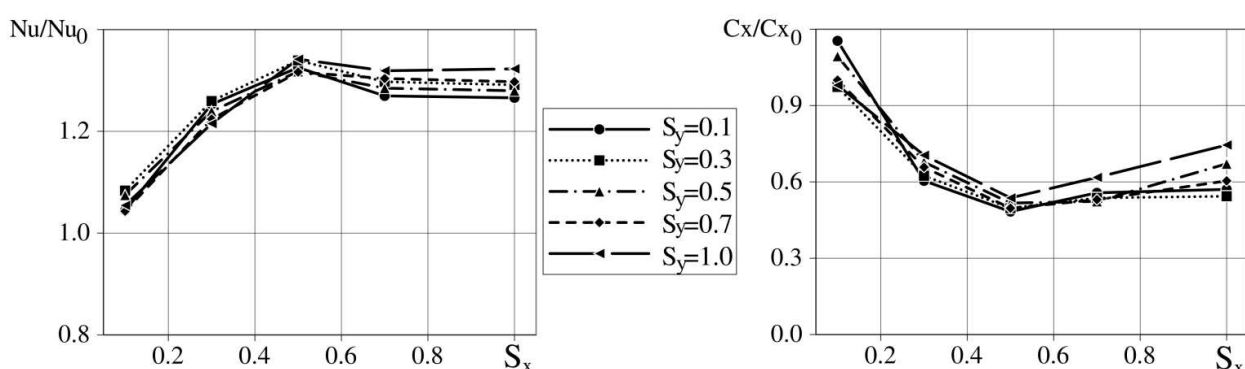


Рис. 10. Характеристики сопротивления и теплоотдачи при смешанных колебаниях при $Re = 3000$, $Pr = 1$, амплитудах $A_x = 0.5D$, $A_y = 0.1D$.

В заключении к диссертации подведены итоги работы и сформулированы результаты и выводы.

Основные выводы.

1. На теоретической основе бессеточного метода вязких вихре-тепловых доменов разработан и верифицирован распараллеленный программный комплекс VVHDFlow, позволяющий строить численные решения плоских задач нестационарной гидродинамики и теплообмена при произвольном движении систем твердых тел в неограниченном пространстве несжимаемой жидкости постоянной плотности и вязкости.

2. Тестирование комплекса выполнено на репрезентативном наборе задач термогидродинамики, имеющих экспериментальные аналоги или известные численные решения с помощью апробированных сеточных методов: нестационарное

обтекание неподвижных нагретых цилиндров круглого и треугольного сечения, развитие динамического и теплового пограничных слоев на пластине, обтекание вращающегося цилиндра, определение структуры результирующего возмущенного течения вокруг цилиндра, совершающего линейно-поляризованные осцилляции в пространстве вязкой жидкости.

3. С помощью разработанного программного комплекса VVHDFlow выполнены систематические исследования нестационарных вихревых и температурных полей и сопутствующих термогидродинамических характеристик тел в задачах о поступательных и вращательных колебаниях нагретых цилиндров и их тандемов в потоке вязкой несжимаемой жидкости при $100 < Re < 10000$. Идентифицированы переходы между режимами «захвата частоты», симметризации, угнетения и хаотизации вихревых систем в ближнем гидродинамическом следе за колеблющимися цилиндрическими телами, прослежены корреляции между осредненными гидродинамическими тепловыми характеристиками цилиндров при различных параметрах колебаний.

3.1 В задаче о гармонических вращательных колебаниях круглого цилиндра найдена граница области существования режима обтекания со стабилизированным гидродинамическим следом и предложена аналитическая аппроксимация этой границы в пространстве безразмерных определяющих параметров при $0 < Re < 1000$.

3.2 В задаче о продольных возвратно-поступательных колебаниях цилиндра дана классификация режимов с различными структурами вихревого следа в зависимости от частоты вынужденных колебаний цилиндра: I – классическая дорожка Кармана, II – несимметричная вихревая система с частотой вынужденных колебаний, III – несимметричная вихревая система с главной частотой вдвое меньшей частоты вынужденных колебаний, IV – симметричная вихревая дорожка, V – нерегулярная вихревая структура.

3.3 Показано, что:

- постоянное вращение цилиндра во всех случаях приводит к уменьшению теплообмена, причем для больших чисел Рейнольдса наблюдается более интенсивное падение;
- при периодических вращательных колебаниях рост теплоотдачи наблюдается лишь при больших частотах, отвечающих режиму угнетения вихревого следа;
- на режиме обтекания с симметричным следом суммарная теплоотдача продольно колеблющегося цилиндра в несколько раз больше, чем неподвижного;
- при смешанных поперечно-продольных колебаниях цилиндра могут достигаться оптимальные с точки зрения термодинамической эффективности соотношения между сопротивлением и теплоотдачей, когда происходит рост теплообмена при одновременном снижении гидродинамического сопротивления тела;
- в зависимости от относительного расстояния между элементами сборки цилиндров в тандеме и ее ориентации в потоке, суммарная теплоотдача тандемов может быть как ниже, так и значительно выше, чем удвоенная теплоотдача уединенного цилиндра.

Основные публикации по теме диссертации.

- 1** Гувернюк С. В., Дынникова Г. Я., Дынников Я. А., Малахова Т. В. О стабилизации следа за круговым цилиндром, совершающим высокочастотные вращательные колебания // Доклады Российской Академии наук. 2010. Т. 432, № 1. С. 45–49.
- 2** Малахова Т. В. Численное моделирование влияния осцилляций нагретого цилиндра на его сопротивление и теплоотдачу // Тепловые процессы в технике. 2011. № 3. С. 108–112.
- 3** Малахова Т. В. Теплоотдача колеблющегося цилиндра в потоке вязкой несжимаемой жидкости // Теплофизика и аэромеханика. 2012. Т. 19, № 1. С. 75 - 82.
- 4** Дынников Я. А., Малахова Т. В., Сыроватский Д. А. и др. VVHDFlow. Программы для ЭВМ. RU ОБПБТ 30.10.2010, Свидетельство № 210616504.
- 5** Малахова Т. В. Численное моделирование нестационарной теплопередачи при обтекании нагретого цилиндра вязкой несжимаемой жидкостью // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. М.: Издательство Московского ун-та, 2009. С. 113.
- 6** Дынников Я. А., Малахова Т. В. Численное моделирование нестационарного теплопереноса в несжимаемой жидкости методом вязких вихре-тепловых доменов // Труды XVII Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством

- академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в аэрокосмических технологиях». Т. 25. М.: Издательский дом МЭИ, 2009. С. 52–55.
- 7 Дынников Я. А., Малахова Т. В. Численное моделирование нестационарной теплоотдачи цилиндра в потоке вязкой жидкости методом вихре-тепловых доменов // Праці XIV Міжнародного симпозіума «Методи дискретних особливостей в задачах математичної фізики»; МДОЗМФ-2009. Т. 1. Харків: Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, 2009. С. 95–98.
 - 8 Малахова Т. В. Термогидродинамика осциллирующего нагретого цилиндра // Труды конференции-конкурса молодых ученых под редакцией академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Издательство Московского ун-та, 2009. С. 135–138.
 - 9 Гувернюк С. В., Дынникова Г. Я., Дынников Я. А., Малахова Т. В. О механизмах стабилизации следа за цилиндром, совершающим высокочастотные вращательные колебания // Материалы десятой международной школы-семинара Модели и методы аэродинамики. М.: МЦНМО, 2010. С. 52–53.
 - 10 Гувернюк С. В., Дынникова Г. Я., Дынников Я. А., Малахова Т. В. Численное моделирование эффекта Танеды при обтекании цилиндра, совершающего высокочастотные угловые колебания // Материалы XXI научно-технической конференции по аэромеханике. М.: Изд. ЦАГИ, 2010. С. 63–65.
 - 11 Дынников Я. А., Малахова Т. В., Сыроватский Д. А. Развитие программного комплекса для бессеточного численного метода ВВТД // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 16—25 апреля 2010. М.: Издательство Московского ун-та, 2010. С. 78.
 - 12 Гувернюк С. В., Малахова Т. В. Нестационарная термогидродинамика осциллирующего цилиндра // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 2010. Р. 74.
 - 13 Дынников Я. А., Малахова Т. В., Сыроватский Д. А. Развитие программного комплекса для бессеточного численного метода ВВТД // Сборник тезисов VII всероссийской межвузовской конференции молодых ученых. С.-П.: 2010. С. 78.
 - 14 Малахова Т. В. Нестационарная теплопередача при обтекании осциллирующего цилиндра // Современные проблемы аэрогидродинамики: Тезисы докладов XVI школы-семинара под руководством Г.Г. Черного, 6—16 сентября 2010г., Сочи, «Буревестник» МГУ. М.: Издательство Московского ун-та, 2010. С. 79.
 - 15 Малахова Т. В. Теплоотдача вибрирующего цилиндра // Труды конференции-конкурса молодых ученых под редакцией академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Издательство Московского ун-та, 2010. С. 214–223.
 - 16 Malakhova T. V., Dynnikova G. Y., Guvernyuk S. V. Investigation of the heat transfer from oscillating cylinder by the VVHD Method // Proc. of The 5th International Conference of Vortex Flows and Vortex Models, Caserta, Italy 7- 10 Nov. 2010. Caserta: 2010. P. 30.
 - 17 Малахова Т. В. Численное моделирование влияния осцилляций нагретого цилиндра на его сопротивление и теплоотдачу // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. Т. 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2010. С. 173–175.

- 18 Дынников Я. А., Малахова Т. В. Использование метода ВВД для решения задач термогидродинамики // Конкурс научных работ молодых ученых МГУ имени М.В. Ломоносова: Сборник рефератов. М.: Издательство Московского ун-та, 2010. С. 165–168.
- 19 Малахова Т.В. Численное моделирование термогидравлических свойств двумерных впадин и выступов // Тезисы докладов XVIII Школы-семинара молодых учёных и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и теплообмена в новых энергетических технологиях», 23–27 мая 2011, г. Звенигород, Россия. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. С. 291–292.
- 20 Malakhova T. V., Dynnikov Y. A. Investigation of the heat transfer from oscillating cylinder by the VVD method // Сборник тезисов докладов Международной научной школы молодых ученых и специалистов «Механика неоднородных жидкостей в полях внешних сил: Вихри и волны». М.: 2011. С. 32–32.
- 21 Малахова Т. В. Нестационарная теплопередача при ламинарном обтекании цилиндра, сеточное и бессеточное моделирование // Труды конференции-конкурса молодых ученых под редакцией академика РАН Г.Г. Черного, профессора В.А. Самсонова. М.: Издательство Московского ун-та, 2011. (в печати).
- 22 Гувернюк С. В., Дынникова Г. Я., Малахова Т. В. Гидродинамическое сопротивление и нестационарная теплопередача при отрывном обтекании колеблющихся тел // Международная конференция «НЕЗАТЕГИУС2012», Тезисы докладов. М.: Издательство Московского ун-та, 2012. С. 12–13.