

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕХАНИКИ МГУ
им. М.В. Ломоносова

На правах рукописи

КРАСНОПОЛЬСКИЙ Борис Иосифович

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ
ОБТЕКАНИИ ТРЕХМЕРНЫХ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАВЕРН**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в лаборатории общей аэродинамики Научно исследовательского института механики МГУ им. М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Н.В. Никитин

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В.И. Полежаев
доктор физико-математических наук
А.В. Сетуха

Ведущая организация: Федеральное государственное образо-
вательное учреждение высшего профес-
сионального образования “Южный фе-
деральный университет”, г. Ростов-на-
Дону

Защита состоится 15 октября 2010 года в 15 часов 00 минут на заседа-
нии диссертационного совета Д.501.001.89 при Московском государствен-
ном университете им. М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва,
Ленинские горы, Главное здание МГУ, аудитория 16-24.

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

Автореферат разослан “ ” сентября 2010 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



А.Н. Осипцов

1. Общая характеристика работы

Актуальность темы. Актуальность вопросов интенсификации тепло-массообмена при обтекании различных выемок и каверн обусловлена широким спектром применения таких конструктивных решений в различных теплообменных устройствах и химических аппаратах. Например, одно из активно развивающихся направлений – использование жидкостного охлаждения вычислительных серверов и других электронных устройств, где использование более компактных и эффективных элементов пассивного охлаждения в условиях ограниченности размеров и высокой плотности упаковки оборудования может приводить к значительному уменьшению общих размеров конструкций и повышению их эксплуатационных свойств.

Цели работы:

- Разработка эффективного вычислительного алгоритма для моделирования гидродинамических течений на неравномерных прямоугольных сетках, ориентированного на использование на многопроцессорной вычислительной технике.
- Анализ структуры течения в кавернах, обтекаемых набегающим потоком.
- Изучение зависимости теплообмена на дне каверны от толщины пограничного слоя и частоты крупномасштабных пульсаций в набегающем потоке.
- Исследование особенностей теплообмена с каверной, ориентированной под углом относительно направления потока: определение зависимости потока тепла от угла поворота каверны и исследование вклада пульсаций в основном потоке на теплообмен в повернутой каверне.

Научная новизна:

- Проведен численный анализ обтекания каверны невозмущенным потоком, получена зависимость интегрального потока тепла на дне подогреваемой каверны от толщины пограничного слоя набегающего потока. Описана вихревая картина течения в каверне и отражены отличительные особенности течения в сравнении с течением в каверне

с движущейся крышкой.

- Исследовано влияние крупномасштабных пульсаций в набегающем потоке на теплообмен с каверной. Показано, что имеется выделенный диапазон частот, в котором наблюдается значительный рост потока тепла. Установлено, что этот диапазон совпадает с диапазоном частот нарастания возмущений в слое смещения между основным потоком и каверной, а рост потока тепла обусловлен увеличением массообмена.
- Определены характеристики течения и теплообмена в каверне, ориентированной под углом к набегающему потоку.
- Предложена новая модификация итерационного метода градиентного типа (BiCGStab) для решения систем линейных алгебраических уравнений с сильно разреженной матрицей, ориентированная на эффективную параллельную реализацию на многопроцессорной вычислительной технике.

Достоверность результатов обусловлена использованием современных апробированных численных методов, хорошо зарекомендовавших себя в расчетах ламинарных нестационарных течений. Точность разработанного вычислительного алгоритма и его программной реализации подтверждена большим количеством тестовых и методических расчетов, результаты которых были сопоставлены как с результатами расчетов других авторов, так и с экспериментальными данными.

Практическая значимость. Разработанный алгоритм и набор программ моделирования гидродинамических течений позволяет варьировать граничные условия и геометрию расчетной области и может быть использован для решения широкого круга задач. Результаты исследования теплообмена с каверной могут быть использованы для выработки рекомендаций при проектировании различных теплообменных устройств. Предложенная модификация итерационного метода и его программная реализация могут быть использованы для решения любых систем линейных алгебраических уравнений на многопроцессорной вычислительной технике.

Апробация работы. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на 14 международных и российских научных конференциях: на

научной сессии МИФИ-2007 (Москва, 2007); на научной конференции Ломоносовские чтения (Москва, 2007, 2008, 2010); на конференции молодых ученых Института механики МГУ им. М.В. Ломоносова, (Москва, 2007, 2008, 2009); на международной школе-семинаре “НеЗаТеГиУс” (Звенигород, 2008, 2010) (работы отмечены грамотами конкурса молодых ученых в 2008 и 2010 годах); на международной конференции молодых ученых “Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей”, (Новосибирск, 2008); на региональной научно-технической конференции “Применение многопроцессорных суперкомпьютеров в исследованиях, наукоемких технологиях и учебной работе” (Иваново, 2008); на X всероссийской школе-конференции молодых ученых “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики”, (Новосибирск, 2008) (работа отмечена дипломом третьей степени); на 3-й Европейской конференции по гидродинамике для аспирантов и молодых ученых (EPFDC-2009, Nottingham, UK, 2009); на международной конференции по вычислительным наукам (ICCS-2010, Amsterdam, The Netherlands, 2010).

Результаты работы обсуждались на семинаре “Гидромеханическая неустойчивость и турбулентность” НИИ механики МГУ (2007, руководитель д.ф.-м.н. С.Я. Герценштейн); на семинаре по газовой динамике НИИ механики МГУ (2007, руководитель акад. Г.Г. Черный); на семинаре по механике многофазных сред НИИ механики МГУ (2009, руководитель д.ф.-м.н. А.Н. Осипцов).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 2 статьях в реферируемых журналах из перечня ВАК [1, 2], в 5 сборниках и статьях конференций [3–7] и 8 тезисах конференций [8–15].

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. В работе содержится 52 рисунка, 10 таблиц и 109 библиографических ссылок. Общий объем диссертации составляет 105 страниц.

2. Содержание работы

Введение

Во введении представлен обзор имеющихся работ по тематике исследования, приведена аннотация работы и сформулирована ее цель.

Первая глава

Первая глава посвящена описанию постановки задачи. Рассматривается течение вязкой теплопроводной жидкости при обтекании плоской пластины, в которой имеется трехмерная прямоугольная каверна. На дне каверны поддерживается постоянной температура или поток тепла. В приближении Буссинеска рассматриваемое течение описывается системой уравнений Навье-Стокса, неразрывности и энергии:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{Ra}{Re^2 Pr} \theta (\mathbf{e}_g, \mathbf{e}_i), \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_j}{\partial x_j} = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial u_j \theta}{\partial x_j} = \frac{1}{Re Pr} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x_j \partial x_j}. \quad (3)$$

Здесь u_i - компоненты вектора скорости, p - давление, θ - температура, t - время, \mathbf{e}_g - орт вектора силы тяжести, $Re = UD/\nu$ - число Рейнольдса, $Pr = \rho C_p \nu / \kappa$ - число Прандтля, $Ra = \rho C_p g \beta \delta T D^3 / \nu \kappa$ - число Рэлея, ρ, ν, β, C_p и κ - постоянные плотность, кинематическая вязкость, коэффициент сжимаемости, удельная теплоемкость и теплопроводность жидкости. Все величины приведены к безразмерному виду, в качестве масштаба длины и скорости использованы соответственно глубина каверны D и скорость набегающего потока U .

На твердых стенках каверны и на пластине ставятся условия прилипания, а на входе в расчетную область, $x = 0$ задаются три компоненты скорости как функции времени t и поперечных координат y и z : $u_i = f_i(y, z, t)$. На входе температура потока считается постоянной, $\theta = 0$; на дне каверны задается либо постоянная температура $\theta = 1$, либо постоянный поток тепла $q = -\partial\theta/\partial n = 1$. Все остальные стенки считаются теплоизолированными $\partial\theta/\partial n = 0$.

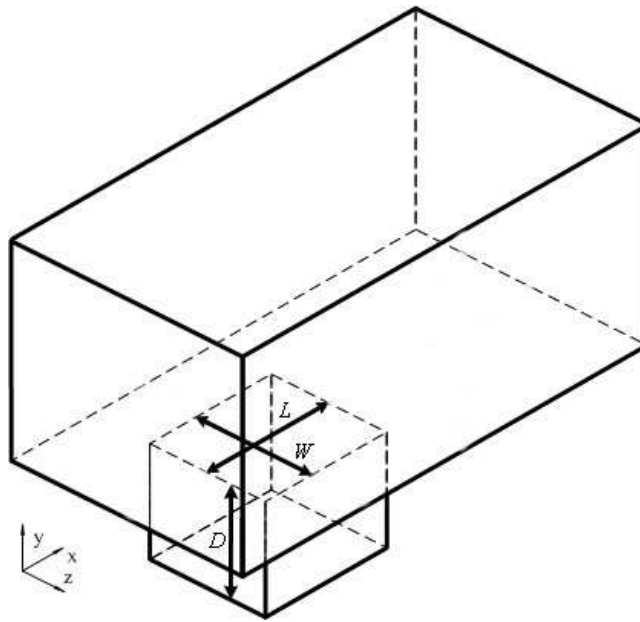


Рис. 1. Геометрия расчетной области задачи.

Для численного решения задачи выделяется расчетная область над пластиной с каверной (рис. 1). Верхняя и боковые границы расчетной области считаются непроницаемыми и свободными от касательных напряжений $\mathbf{u}_n = 0$, $\partial \mathbf{u}_\tau / \partial n = 0$. На выходе из расчетной области задается распределение давления $p = const$ и условие Неймана на тангенциальные компоненты скорости $\partial \mathbf{u}_\tau / \partial n = 0$. С физической точки зрения, данное граничное условие можно трактовать как “вытекание потока в атмосферу”. Для температуры на выходе также используется условие Неймана $\partial \theta / \partial n = 0$, то есть предполагается, что убыль энергии происходит только за счет конвективного выноса нагретой жидкости через заднюю стенку расчетной области. Размеры расчетной области определены по результатам методических расчетов исходя из того, чтобы используемые в расчете граничные условия не оказывали существенного влияния на основные характеристики течения и теплообмен в каверне.

В качестве начальных условий использовались либо распределения скоростей над каверной, соответствующие скорости на входе, и линейное распределение температуры по высоте каверны, либо распределения скорости и температуры, полученные в предшествующих расчетах с близкими значениями определяющих параметров.

В большинстве случаев, расчеты были проведены для кубической ка-

верны при $Re_D = 5000$, $Pr = 0.7$ и $Ra = 0$. В качестве распределения продольной компоненты скорости на входе задавался профиль скорости Блазиуса. Отдельные результаты по обтеканию прямоугольных некубических каверн и учету вклада сил плавучести были опубликованы в работах [1, 3, 4, 6, 9], однако они не были в полной мере систематизированы и в текст диссертации не вошли.

Вторая глава

Во второй главе изложена методика решения задачи. В **разделах 2.1** и **2.2** приведено краткое описание реализованных алгоритмов интегрирования по времени и разностных схем аппроксимации уравнений Навье-Стокса и энергии. Для решения задачи используются сеточные методы. Пространственная аппроксимация уравнений (1)-(3) выполняется с помощью метода контрольных объемов. Для интегрирования по времени системы уравнений Навье-Стокса, неразрывности и энергии используются две схемы: неявная схема первого порядка точности и полу-неявная схема третьего порядка точности с выбором оптимального шага интегрирования¹. Использование первой схемы целесообразно для расчетов стационарного решения, когда не требуется аккуратное моделирование процесса эволюции течения. Вторая схема применяется для проведения эволюционных расчетов когда исследуются течения с нестационарными возмущениями в набегающем потоке, либо в самом течении наблюдается развитие неустойчивости.

В **разделе 2.3** обсуждается выбор методов решения систем линейных алгебраических уравнений, а также особенности их эффективной реализации на многопроцессорных вычислительных системах с распределенной памятью. Для решения уравнения Пуассона был выбран итерационный стабилизированный метод би-сопряженных градиентов (BiCGStab)² с алгебраическим многосеточным предобуславливателем для ускорения сходимости. В настоящей работе предложена модификация этого метода, которая позволяет избежать потерь времени на коммуникации при вычислении ска-

¹*Nikitin N.* Third-order-accurate semi-implicit Runge-Kutta scheme for incompressible Navier-Stokes equations // *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2006. Vol. 51, Pp. 221-233.

²*Van der Vorst H.A.* BI-CGSTAB: a fast smoothly converging variant of BI-CG for the solution of non-symmetric linear systems // *SIAM J.Sci. Stat. Comput.*, 1992. Vol. 13, No. 2, Pp. 631-644.

лярных произведений векторов, возникающих при распараллеливании исходного варианта метода. Последовательность вычислений в этом методе организована таким образом, что во время ожидания данных для вычисления скалярных произведений векторов могут выполняться вычисления предобуславливания, которое, зачастую, является самой вычислительно-трудоемкой операцией на итерации. На тестовых задачах это позволило добиться ускорения решения системы линейных алгебраических уравнений более, чем на три порядка при использовании нескольких тысяч вычислительных ядер.

Третья глава

В третьей главе представлены результаты тестовых и методических расчетов, определены оптимальные параметры расчетных сеток, размеры расчетной области.

В **разделе 3.1** обсуждаются результаты тестовых расчетов двумерной и трехмерной задач о течении в каверне с движущейся крышкой, а также задачи о естественной конвекции в трехмерной кубической каверне. По всем параметрам сравнения результатов расчетов с опубликованными в литературе данными наблюдается расхождение не более 1-2%. По итогам этих расчетов, выбраны наиболее подходящие схемы аппроксимации конвективных членов уравнений (1) и (3).

В **разделе 3.2** и **3.3** определены размеры расчетной области и параметры расчетных сеток для адекватного разрешения основных особенностей течения и теплообмена при обтекании кубической каверны.

В **разделе 3.4** приводится сопоставление результатов расчетов с известными экспериментальными данными. Проведен ряд исследований по определению зависимости интегрального числа Нуссельта от скорости набегающего потока³ (числа Рейнольдса). В качестве экспериментальных данных использован эмпирический закон⁴ $Nu_L \sim Re^{0.596}$ для ламинарного набега-

³На дне каверны в соответствии с экспериментом задавался постоянный поток тепла.

⁴Yamamoto H., Seki N., Fukusako S. Forced convection heat transfer on a heated bottom surface of cavity with different wall-height // *Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983. Vol. 17, No. 2. Pp 73–83.

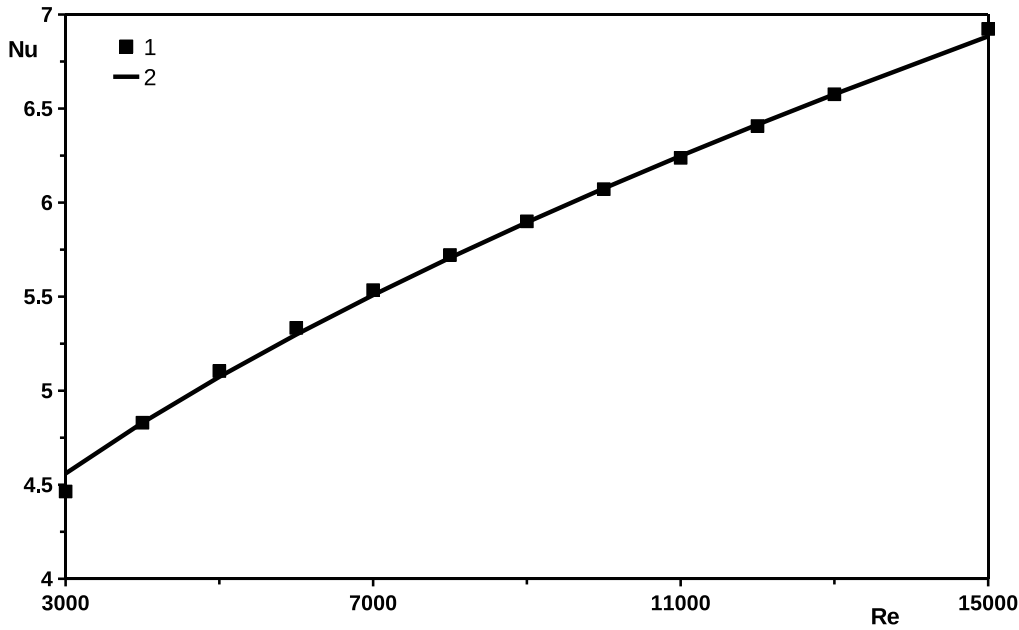


Рис. 2. Зависимость числа Нуссельта Nu_L , определенного по длине каверны, от числа Рейнольдса: 1 – расчет, 2 – эксперимент

ющего потока и диапазона чисел Рейнольдса $3 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^4$. Здесь

$$Nu_L = \frac{1}{L} \int_L \frac{q_w}{T_w - T_\infty} dx,$$

q_w и T_w - поток тепла и локальная температура на дне каверны, T_∞ - температура набегающего потока. Показано хорошее согласие между экспериментальными и расчетными данными (рис. 2).

Четвертая глава

В четвертой главе приводятся и обсуждаются результаты проведенных расчетов. **Раздел 4.1** посвящен исследованию особенностей течения и теплообмена при стационарном профиле Блазиуса на входе. Обнаружено, что толщина пограничного слоя δ существенным образом влияет на течение. Так, для $\delta = 0.10 \div 0.25$ во всей области реализуется стационарное течение, в то время как при более тонком пограничном слое $\delta = 0.05$ возникает периодический режим.

В **параграфе 4.1.1** исследуется взаимосвязь колебаний в потоке с развитием неустойчивости в слое смешения, возникающим между каверной и основным потоком. Для периодического режима ($\delta = 0.05$) определены

частота ω и длина волны λ возникающих колебаний: $\omega = 6.17$ и $\lambda = 0.62$. Показано, что нарастание возмущений происходит экспоненциально, определен коэффициент нарастания возмущений по пространству $\kappa_x \approx 5$.

Полученные значения частоты и коэффициента нарастания амплитуды колебаний по пространству сопоставлены с соответствующими параметрами развития неустойчивости в слое смещения. По линейной теории получены оценки частоты и коэффициента нарастания возмущений в слое смещения вида⁵ $U(y) = \tanh(y)$. Коэффициент нарастания возмущений по пространству для слоя смещения составил $\kappa_x \approx 2.6$, а частота возмущений $\omega \approx 5.5$.

Несмотря на всю схематичность и грубость проведенных оценок, близость полученных частот позволяет предполагать, что возникновение колебаний для тонкого профиля скорости на входе вызвано развитием неустойчивости в слое смещения между каверной и основным потоком. Наблюдаемая стационарность течения для профилей скорости $\delta \geq 0.10$, по-видимому, обусловлена стабилизирующим воздействием на слой смещения стенок каверны.

В **параграфе 4.1.2** приведено подробное описание структуры течения в каверне, расположение вихревых зон, представлены картины растекания жидкости у стенок.

В случае стационарного течения ($\delta = 0.10 \div 0.25$) в каверне образуется три зоны вихревого течения. Основной вихрь располагается в центре и занимает большую часть объема каверны (рис. 3). Ось этого вихря ориентирована вдоль оси z и смещена вниз по потоку относительно центра каверны. В этом вихре возникает поперечное течение. Около оси вихря формируется перенос жидкости от боковых стенок к центру каверны, тогда как по периферии вихря образуется обратный поток от плоскости симметрии к боковым стенкам.

Две зоны вторичных вихревых течений образуются в донной области в окрестности передней и задней стенок каверны. В этих зонах также возникает дополнительный поперечный перенос жидкости из центральной части к боковым стенкам, однако интенсивность основного и поперечного течений оказывается значительно ниже.

⁵Бетцов Р., Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. – М.: Мир, 1971, 392 с.

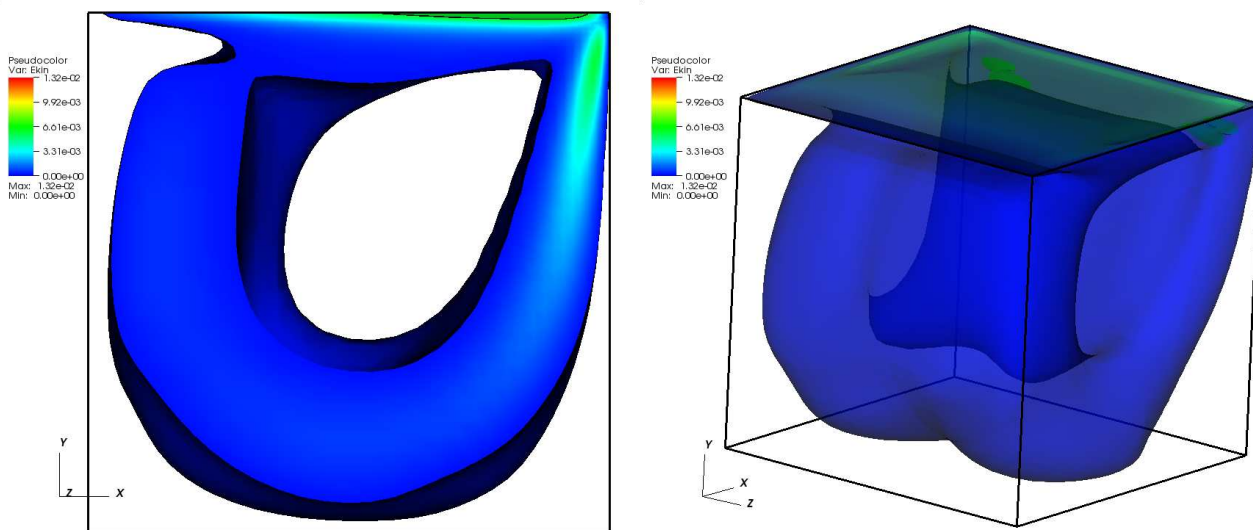


Рис. 3. Распределение кинетической энергии жидкости в каверне.

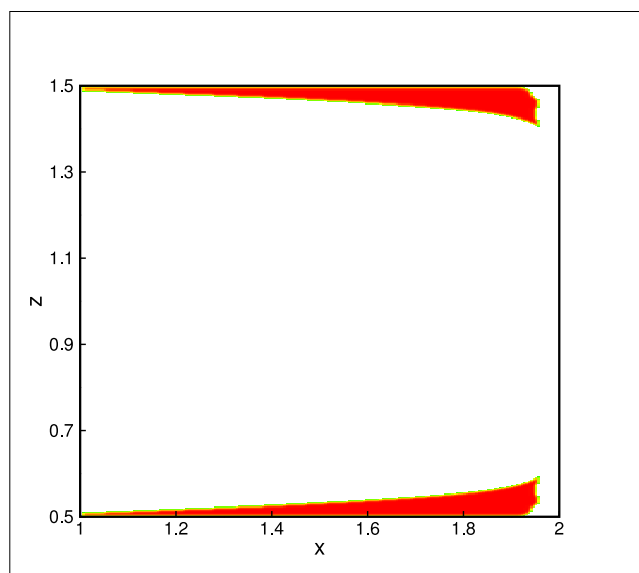


Рис. 4. Положение области затекания жидкости из основного потока в каверну для $\delta = 0.25$.

Приведены сопоставления с течением в кубической каверне с движущейся крышкой, отражены основные отличия, главным из которых является наличие массообмена между каверной и основным потоком при обтекании открытой каверны. Исследовано расположение зон затекания жидкости в каверну: на верхней грани каверны эта область формируется вдоль боковых стенок и в углах у задней стенки каверны (рис. 4). Положение зон затекания практически не зависит от толщины профиля скорости набегающего потока. Баланс массы в каверне сохраняется за счет выноса

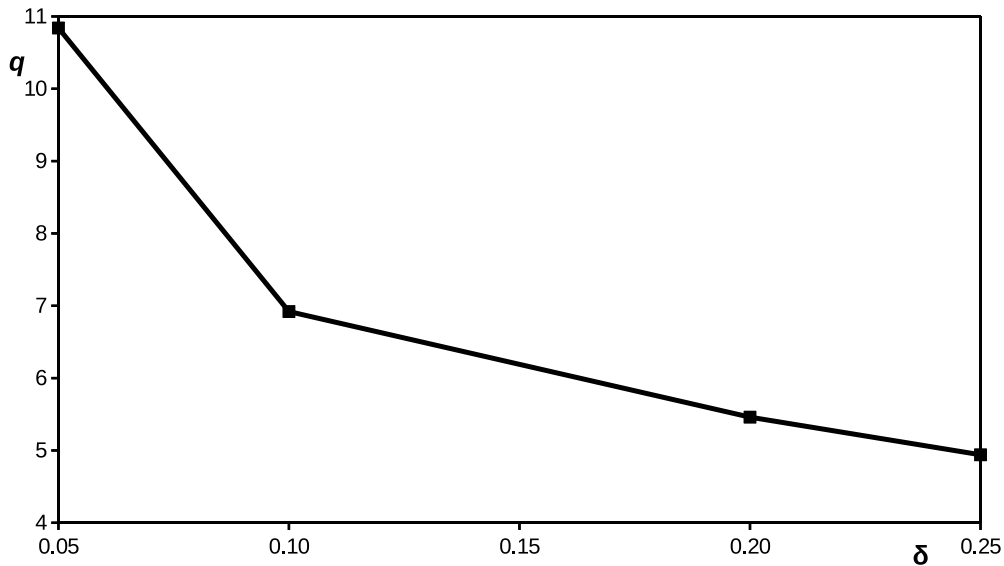


Рис. 5. Зависимость интегрального потока тепла q со дна каверны от толщины пограничного слоя набегающего потока.

жидкости у задней стенки каверны, преимущественно в центральной ее части.

В **параграфе 4.1.3** обсуждаются особенности теплообмена с каверной. Показано, что уменьшение толщины пограничного слоя набегающего потока способствует росту потока тепла на дне каверны (рис. 5). Двукратное уменьшение толщины пограничного слоя, в среднем, сопровождается 30-40%-ным ростом интегрального потока тепла. Наблюдаемый рост теплообмена на дне каверны обусловлен влиянием нескольких факторов: ростом массообмена между каверной и набегающим потоком и увеличением скорости вращения основного вихря. Показано, что изменение толщины профиля скорости с $\delta = 0.25$ до $\delta = 0.10$ сопровождается ростом массообмена на 10%. Распределение скорости в каверне также существенным образом зависит от толщины пограничного слоя (рис. 6). При уменьшении толщины с $\delta = 0.25$ до $\delta = 0.10$ вдвое возрастает скорость течения в основном вихре, что приводит к увеличению градиента скорости на дне каверны.

Локальное распределение потоков тепла на дне каверны также заметно видоизменяется при уменьшении δ (рис. 7). Для $\delta = 0.10 \div 0.25$ качественное распределение потоков тепла оказывается схожим и существенно трехмерным: наблюдаются две области экстремальных потоков тепла на расстоянии примерно $1/4$ от боковых стенок, которые во многом повторя-

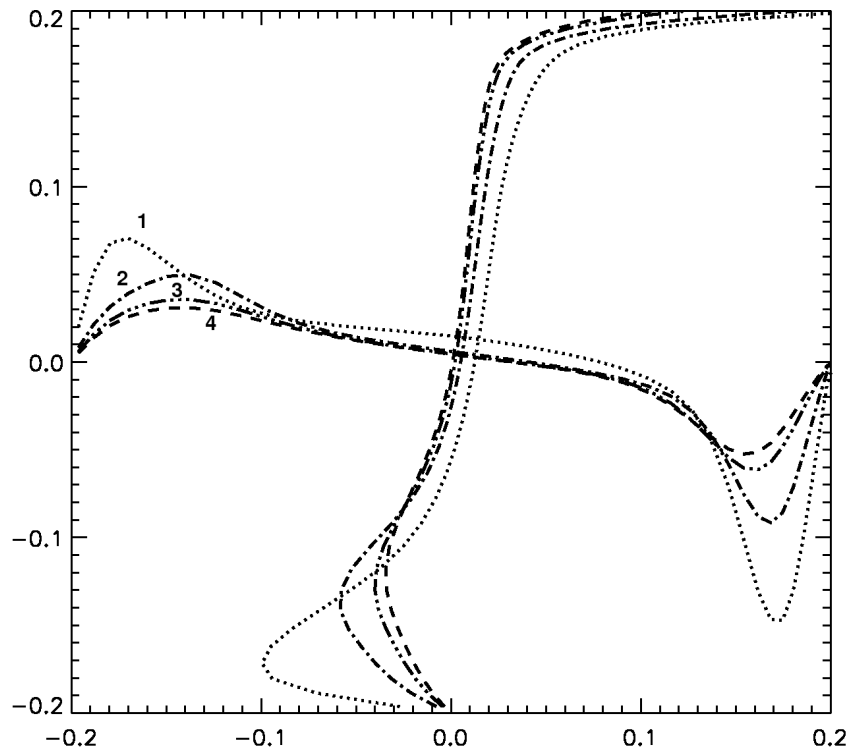


Рис. 6. Распределения продольной компоненты скорости по высоте и вертикальной компоненты скорости по длине в плоскости симметрии вдоль линий, проходящих через центр каверны: 1-4 – $\delta = 0.05, 0.10, 0.20$ и 0.25 соответственно.

ют картину растекания жидкости у дна каверны.

Несколько отличная ситуация наблюдается для тонкого пограничного слоя на входе $\delta = 0.05$. Развивающаяся неустойчивость в слое смешения существенным образом влияет на качественные и количественные параметры течения. Значительно возрастает скорость вращения вихря (рис. 6), причем также и качественно меняется распределение профилей скорости в каверне: наблюдается смещение наиболее высокоскоростной части вихря ближе к стенкам каверны, что приводит к дополнительному увеличению градиента скорости на стенках. В сравнении с массообменом за счет затягивания холодного потока из основного канала у боковых стенок каверны, доминирующую роль в увеличении теплообмена на дне каверны (рис. 7, на 60% в сравнении с $\delta = 0.10$) играет другой механизм, который рассмотрен в разделах 4.2 и 4.3.

В **разделе 4.2** исследуется влияние крупномасштабных пульсаций в набегающем потоке на теплообмен на дне каверны. На входе в расчетах

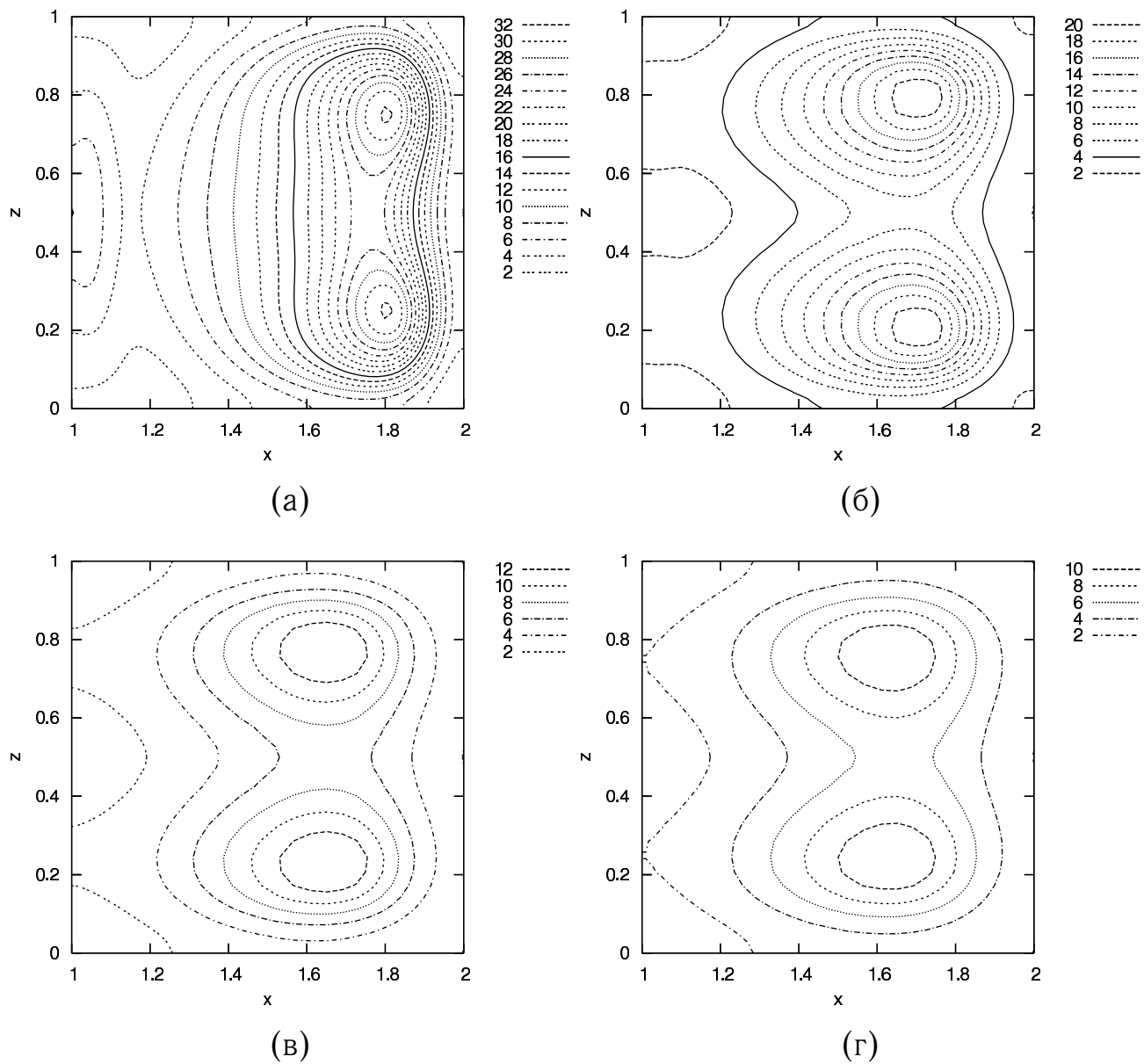


Рис. 7. Распределение потока тепла на дне каверны: (а)-(г) – $\delta = 0.05, 0.10, 0.20$ и 0.25 соответственно.

задавался профиль скорости Блазиуса с периодическими возмущениями по толщине пограничного слоя:

$$u_1(0, y, z, t) = U_{Bl}(y, \delta) + 0.1\eta(\delta - y) \sin\left(\frac{2\pi}{T}t\right) \sin\left(\frac{2\pi}{\delta}y\right),$$

где: δ – толщина пограничного слоя; $U_{Bl}(y, \delta)$ – профиль скорости Блазиуса; T – период возмущений; $\eta(y)$ – единичная функция Хевисайда. Суммарный расход, обеспечиваемый пульсационной составляющей скорости, обращается в нуль, что сохраняет постоянным расход жидкости, протекающей через расчетную область в единицу времени.

Проведенные расчеты показали, что осредненный интегральный поток тепла на дне каверны существенным образом зависит от частоты возмущений в набегающем потоке. В зависимости от толщины пограничного слоя имеется выделенная частота, при которой наблюдается наиболее интенсивный теплообмен с каверной (рис. 8). Вместе с тем, максимальные значения потока тепла для рассмотренных пограничных слоев оказываются близкими и разброс не превышает 10%.

Было выдвинуто предположение, что определяющую роль в рассматриваемых течениях в каверне и теплообмене играют колебания, возникающие в слое смешения между каверной и основным потоком. В рамках линейной теории была рассмотрена устойчивость слоя смешения, образующегося при обтекании каверны невозмущенным потоком (стационарное течение). Для этого численно решена задача на собственные значения для уравнения Орра-Зоммерфельда. В качестве профиля скорости плоскопараллельного течения было использовано распределение x -компоненты скорости u_1 , взятое в плоскости симметрии каверны на расстоянии $x = 0.11$ от передней стенки каверны. Как показали проведенные методические расчеты, расстояние до передней стенки каверны при выборе профиля скорости не оказывает существенного влияния на результаты. Полученные зависимости коэффициентов нарастания от частоты возмущений и толщины профиля скорости пограничного слоя на входе в расчетную область приведены на рис. 9. Сравнение графиков на рис. 8 и 9 свидетельствует об имеющейся корреляции между потоком тепла на дне каверны и коэффициентом нарастания возмущений в слое смешения между каверной и основным потоком. Так, например, для $\delta = 0.20$ максимальный поток тепла ($q > 20$) на дне ка-

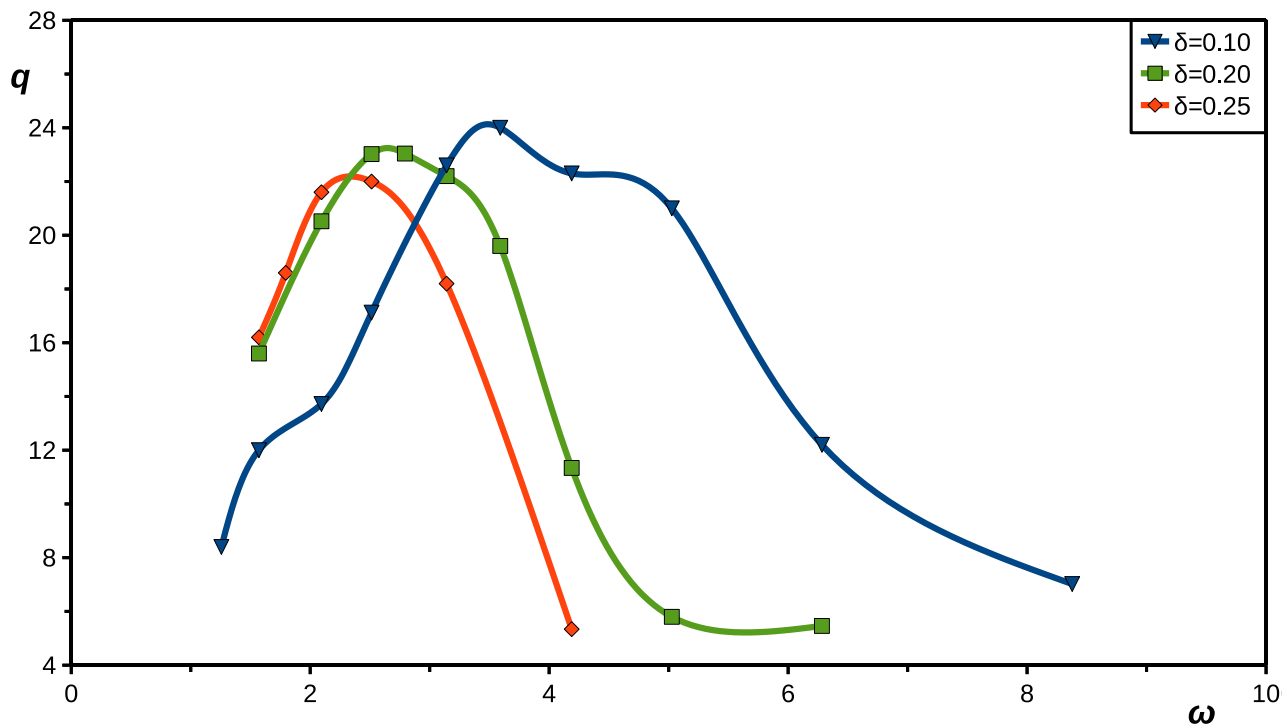


Рис. 8. Зависимость осредненного потока тепла q на дне каверны, от частоты возмущений ω для различных $\delta = 0.10, 0.20, 0.25$.

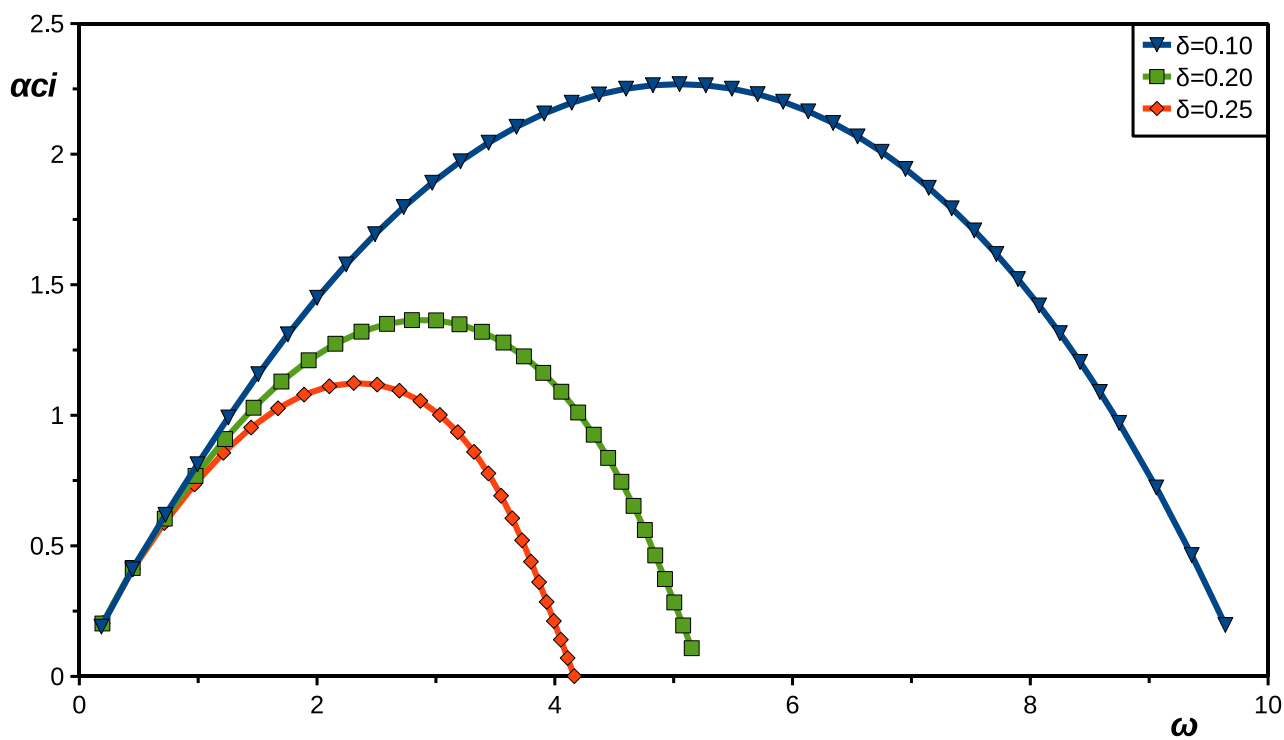


Рис. 9. Зависимость коэффициента нарастания от частоты возмущений ω для различных $\delta = 0.10, 0.20, 0.25$.

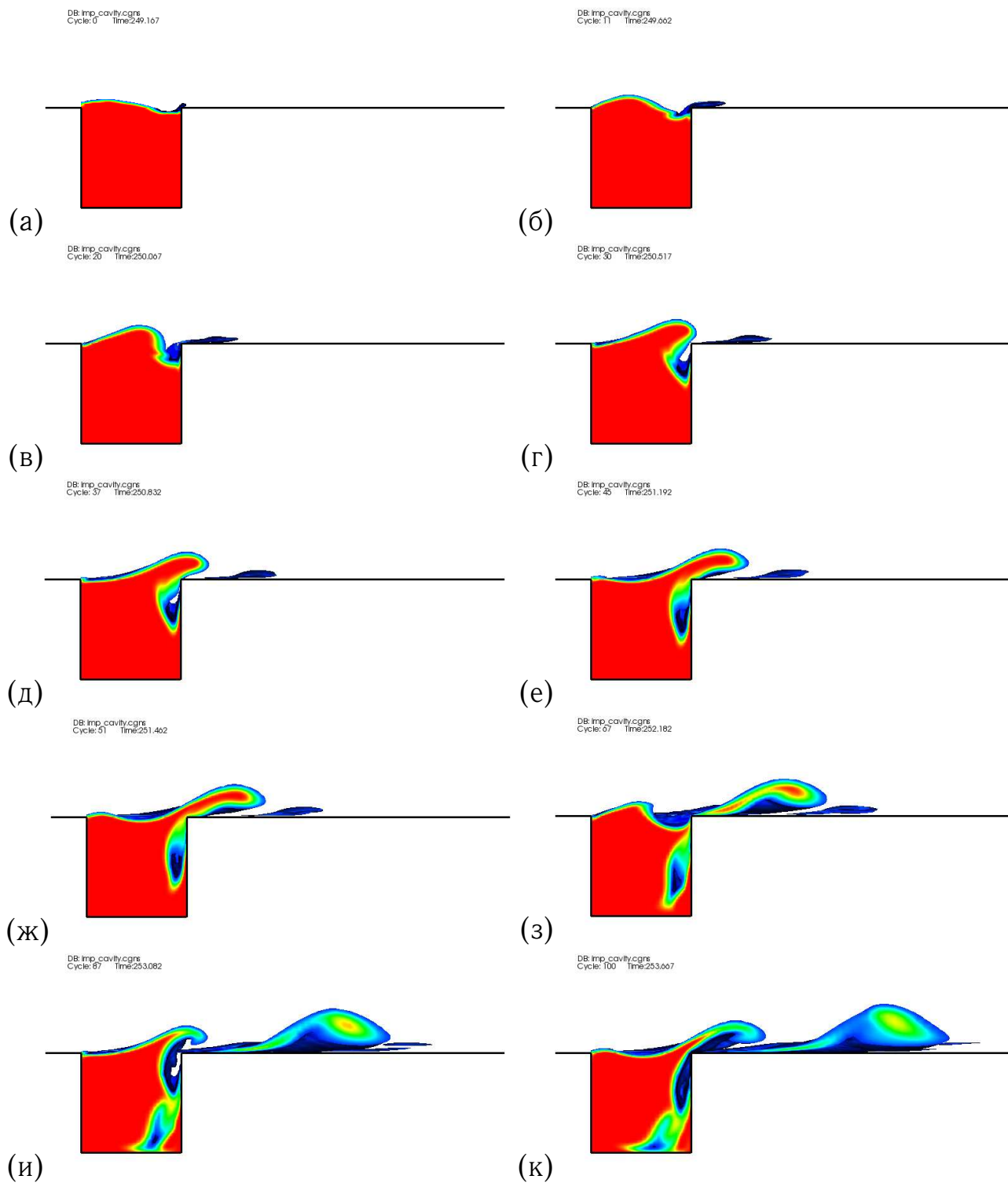


Рис. 10. Эволюция распределения пассивного скаляра в каверне, вид в плоскости симметрии каверны.

верны достигается при частотах пульсаций $\omega \sim 2.0 \div 3.6$, а максимальным значениям коэффициента нарастания возмущений соответствуют частоты $\omega \sim 2.2 \div 3.5$ ($\alpha c_i > 0.95(\alpha c_i)_{max}$). При сдвиге в область высокочастотных возмущений наблюдается достаточно быстрое уменьшение выносимого потока тепла. Отклик на пульсации в набегающем потоке в виде увеличения потока тепла со дна каверны для высокочастотных возмущений практически исчезает начиная с $\omega \sim 5$, что соответствует частоте, при которой коэффициент нарастания возмущений обращается в ноль. Аналогичным образом происходит уменьшение потока тепла и для низкочастотных возмущений в потоке. При $\omega \rightarrow 0$ поток тепла уменьшается до значений невозмущенного обтекания, что также соответствует стремлению к нулю коэффициента нарастания возмущений. Приведено описание трансформации вихревых картин и распределений осредненных потоков тепла на дне каверны по мере изменения частоты возмущений.

Обнаруженная закономерность позволяет, при наличии стационарного решения для обтекания каверны невозмущенным потоком, по линейной теории устойчивости получить оценки диапазона частот в потоке, приводящих к наиболее интенсивному теплообмену с каверной. Зависимость течения и теплообмена в каверне от частот возмущений в потоке объясняет наблюдаемую интенсификацию для невозмущенного тонкого профиля скорости на входе. В этом случае система за счет развития неустойчивости в слое смешения сама порождает в потоке возмущения с частотой наиболее быстрорастущей амплитуды, что и приводит к перестроению течения в каверне и росту теплообмена.

В **главе 4.3** приведено описание схемы процесса конвективного выноса нагретой жидкости из каверны при обтекании возмущенным потоком. Для визуализации процесса конвективного выноса тепла проведен отдельный демонстрационный расчет. В качестве начальных данных для этого расчета было задано мгновенное поле скоростей в развитом течении при обтекании каверны возмущенным потоком с частотой возмущений $\omega = 8\pi/9$ (для $\delta = 0.20$ эта частота соответствует режиму наиболее интенсивного теплообмена на дне каверны). Уравнение теплопроводности путем зануления коэффициента при вязком члене сведено у трехмерному уравнению переноса пассивного скаляра. В качестве начальных данных для этой переменной

задано нулевое распределение $\theta = 0$ в потоке над пластиной и каверной, и равномерное распределение $\theta = 1$ в каверне.

На рис. 10 представлена эволюция распределения пассивного скаляра, которая демонстрирует схему процесса массообмена между каверной и основным потоком. По мере развития неустойчивости в слое смешения (рис. 10, (а)-(б)), наблюдается рост амплитуды волны возмущения. При приближении к задней кромке каверны, за счет большей продольной скорости движения гребня волны, увеличивается угол наклона переднего фронта волны (в), и происходит ее обрушение на заднюю кромку каверны (г). Часть жидкости из основного потока, находившегося перед фронтом этой волны, отсекается верхним гребнем волны и захватывается в рециркуляционный вихрь каверны (д)-(е). В свою очередь, часть жидкости из верхнего гребня волны при натекании на заднюю кромку каверны перехлестывается через преграду и уносится вместе с основным потоком в след за каверной. Развитие этого процесса за следующий период возмущений в набегающем потоке показано на рис.10, (ж)-(к).

Глава 4.4 посвящена исследованию теплообмена при обтекании каверны, ориентированной под углом к набегающему потоку. Поворот каверны в расчете задавался за счет изменения направления натекания потока. Для формирования согласованных граничных условий на входе, соответствующих распространяющимся волнам возмущений в потоке, параллельно с основным расчетом проводился еще один вспомогательный расчет. В двумерной постановке рассчитывалось поле скорости для потока над пластиной, которое в дальнейшем проецировалось на боковые стенки расчетной области в качестве входных условий для исходной задачи. Это позволило без существенных искажений воспроизвести развитие волны возмущений в потоке, что дало возможность исследовать роль пульсаций набегающего потока на теплообмен в повернутой каверне.

Графики зависимости потока тепла на дне от угла поворота каверны для обтекания невозмущенным потоком для $\delta = 0.20$ приведены на рис. 11. Наблюдается монотонный рост интегрального потока тепла при увеличении угла поворота каверны, что связано с интенсификацией массообмена через угловые зоны каверны. Максимальные значения достигаются при угле поворота $\varphi = 45^\circ$ и превышают значения потока тепла для обтекания под

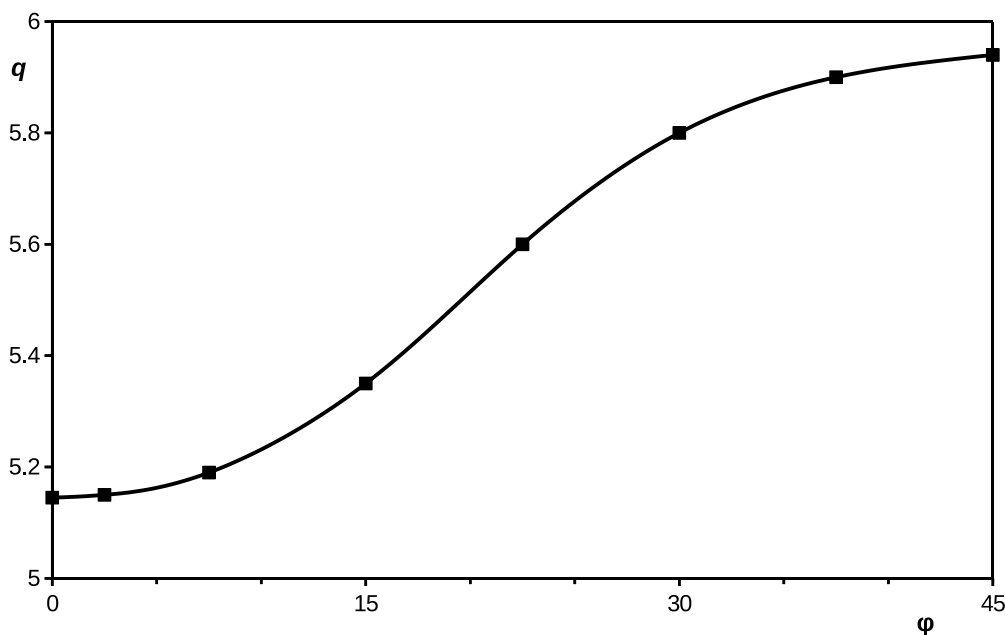


Рис. 11. Зависимость интегрального потока тепла со дна каверны от угла поворота относительно направления набегающего потока.

нулевым углом на 20%.

Рассмотрено влияние частот возмущений в потоке на теплообмен на дне каверны. Графики зависимости потока тепла от частот пульсаций в набегающем потоке для различных углов поворота каверны приведены на рис. 12. Как и в случае обтекания под нулевым углом, наблюдается эффект значительного роста теплообмена, причем как максимальные значения потоков тепла, так и диапазоны частот возмущений, при которых наблюдается это увеличение потока, оказываются близкими для всего рассмотренного диапазона углов поворота каверны.

Заключение

В заключении подведены итоги и сформулированы основные результаты работы.

Приложение

В приложении приведено описание технических характеристик вычислительных систем СКИФ МГУ “Чебышев” и “Ломоносов”, использованных для проведения исследований.

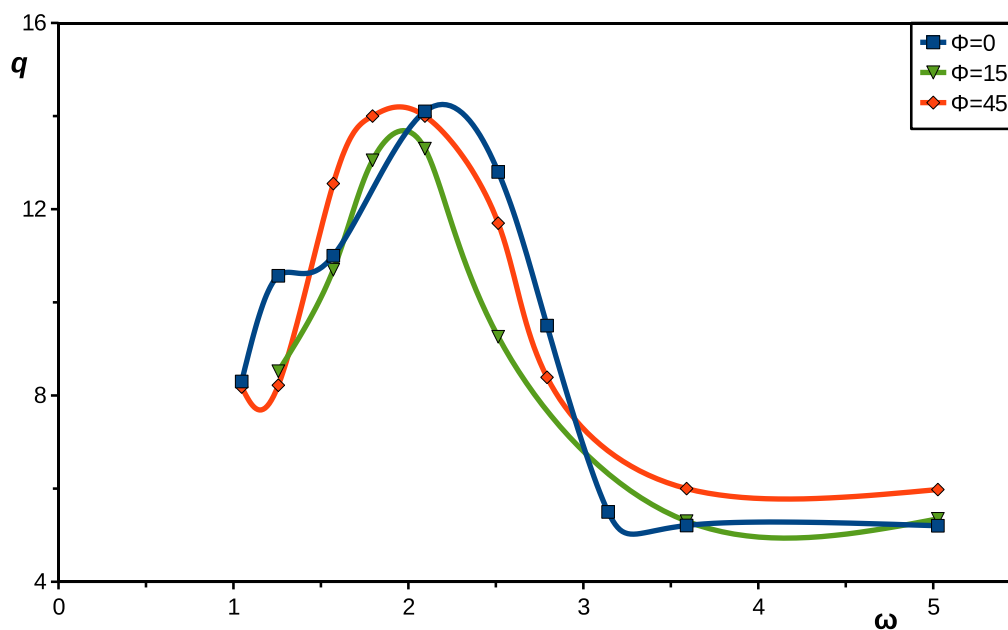


Рис. 12. Зависимость осредненного потока тепла от частоты возмущений ω при различных углах поворота каверны.

3. Основные результаты и выводы

- Разработан вычислительный алгоритм моделирования гидродинамических течений несжимаемой жидкости и процессов тепломассопереноса (в приближении Буссинеска), ориентированный на использование на многопроцессорной вычислительной технике. При разработке параллельной программы предложена новая модификация итерационного метода градиентного типа (BiCGStab), которая позволила добиться высокой эффективности параллельной реализации этого метода.
- Проведен численный анализ обтекания каверны стационарным потоком с профилем скорости Блазиуса для диапазона толщин $\delta = 0.05 \div 0.25$. Получена зависимость интегрального потока тепла на дне каверны от толщины пограничного слоя набегающего потока. Обнаружен значительный рост теплообмена при уменьшении толщины профиля скорости набегающего потока ($\delta = 0.05$). Показано, что этот рост вызван развитием неустойчивости в слое смешения и формированием нестационарного режима течения в каверне. Описана картина течения в каверне и отражены отличительные особенности от тече-

ния в каверне с движущейся крышкой.

- Проведено исследование теплообмена при наличии периодических возмущений в набегающем потоке. Показано, что в определенном диапазоне частот поток тепла может 4-кратно превышать его значения при стационарном набегающем потоке. Установлено, что диапазон частот, при котором наблюдается увеличение теплообмена, определяется неустойчивостью слоя смещения между каверной и основным потоком. Показано, что доминирующую роль при увеличении теплообмена в выделенном диапазоне частот играет возрастающий массообмен жидкости между каверной и основным потоком. Определена схема соответствующего процесса массообмена.
- Исследованы характеристики теплообмена при обтекании кубической каверны, ориентированной под углом к набегающему потоку. Установлено, что при невозмущенном обтекании каверны увеличение угла поворота каверны приводит к монотонному росту потока тепла. Максимальные значения достигаются при угле поворота $\varphi = 45^\circ$ и превышают значения потока тепла для обтекания под нулевым углом на 20%. Задание крупномасштабных пульсаций в потоке также позволяет увеличить теплообмен с каверной, причем как максимальные значения потоков тепла, так и диапазоны частот возмущений, при которых наблюдается это увеличение потока, оказываются близкими для всего рассмотренного диапазона углов поворота каверны.

Публикации по теме диссертации

1. Герценштейн С.Я., Краснопольский Б.И. О пространственной структуре неустойчивости течения в трехмерной каверне // Докл. Росс. Акад. Наук, 2008, Т. 421, № 4, С. 475–477.
2. Герценштейн С.Я., Краснопольский Б.И. О влиянии частоты возмущений и толщины пограничного слоя на теплообмен при обтекании кубической каверны // Изв. РАН. МЖГ, 2010, № 1, С. 32–39.
3. Краснопольский Б.И. О пространственной структуре течения в трехмерной каверне // Труды конференции-конкурса молодых ученых. 10-

- 12 октября 2007 г. / Под ред. ак. Г.Г. Черного, проф. В.А. Самсонова. — М.: Изд-во Московского университета, 2008, 244 с. — С. 120–125.
4. *Краснопольский Б.И.* Численное исследование теплообмена в обтекаемой трехмерной каверне // Устойчивость и турбулентность течений гомогенных и гетерогенных жидкостей: Докл. Молодежной конф. Вып. XI / Под ред. В.В. Козлова. — Новосибирск: Параллель, 2008, 284 с. — С. 194–197.
 5. *Краснопольский Б.И.* Влияние толщины пограничного слоя на теплообмен при обтекании прямоугольных каверн // Труды конференции-конкурса молодых ученых. 8-10 октября 2008 г. / Под ред. ак. Г.Г. Черного, проф. В.А. Самсонова. — М.: Изд-во Московского университета, 2009, 244 с. — С. 122–130.
 6. *Герценштейн С.Я., Краснопольский Б.И.* Численное моделирование теплообмена в трехмерной прямоугольной каверне, обтекаемой турбулизующимся потоком // Проблемы современной механики: к 85-летию со дня рождения академика Г.Г. Черного [сборник] / Под ред. А.А. Бармина. — М.: Изд-во Моск. ун-та; изд-во «Омега-л», 2008, 639 с. — С. 94–105.
 7. *Krasnopolsky B.I.* The reordered BiCGStab method for distributed memory computer systems // *Procedia Computer Science*, 2010, Vol. 1, Pp. 213–218.
 8. *Герценштейн С.Я., Краснопольский Б.И.* Исследование гидродинамической устойчивости течения при обтекании двумерной каверны по отношению к трехмерным возмущениям // Научная сессия МИФИ-2007. Сборник научных трудов. В 17 томах. — Т. 7. Астрофизика и космофизика. Проблемы современной математики. Физика пучков и ускорительная техника. — М.: МИФИ, 2007, 232 с. — С. 97–99.
 9. *Краснопольский Б.И.* Трехмерное обтекание выемки // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. 16-25 апреля 2007 г., Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. — М.: Изд-во Московского университета, 2007, 167 с. — С. 96–97.

10. *Краснопольский Б.И.* О пространственной неустойчивости течения в трехмерной каверне // Материалы международной конференции “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность”, 24 февраля – 02 марта 2008 г. Моск. обл., панс. “Университетский”. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008, 157 с. — С. 82.
11. *Краснопольский Б.И.* Теплообмен в обдуваемой трехмерной прямоугольной каверне // Материалы международной конференции “Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность”, 24 февраля – 02 марта 2008 г. Моск. обл., панс. “Университетский”. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 2008, 157 с. — С. 83.
12. *Краснопольский Б.И.* Исследование течения при обдуве подогреваемой трехмерной прямоугольной каверны // Ломоносовские чтения. Тезисы докладов научной конференции. Секция механики. Апрель 2008, Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова. — М.: Изд-во Московского университета, 2008, 105 с. — С. 105.
13. *Краснопольский Б.И.* Моделирование гидродинамических процессов на многопроцессорных вычислительных установках // Применение многопроцессорных суперкомпьютеров в исследованиях, наукоемких технологиях и учебной работе [текст]: сборник материалов региональной научно-технической конференции. — Иваново: ИГТА, 2008, 40 с. — С. 15–17.
14. *Краснопольский Б.И.* Влияние толщины пограничного слоя на теплообмен при обтекании кубической каверны // X Всероссийская школа-конференция молодых ученых "Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики". Тезисы докладов / Под ред. чл.-корр. РАН С.В. Алексеенко. — Новосибирск: ИТ СО РАН, 2008, 168 с. — С. 90–91.
15. *Krasnopolsky B.I.* Numerical investigation of flow stability and heat transfer past an open cubic cavity // 3-rd European postgraduate fluid dynamics conference / University of Nottingham. — 2009, 22 pp. — Pp. 19–20.