

УДК 532.516.013.4:536.25

© 1997 г. М.К. ЕРМАКОВ, С.А. НИКИТИН, В.И. ПОЛЕЖАЕВ

СИСТЕМА И КОМПЬЮТЕРНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

Излагаются концепция, результаты и перспективы применения компьютерной лаборатории, предназначенной для моделирования конвекции и тепломассообмена на основе двумерных нестационарных уравнений Навье – Стокса в приближении Обербека – Буссинеска и включающей вынужденные течения несжимаемой жидкости, естественную термомоноконцентрационную конвекцию гравитационного и негравитационного вида в однородной и пористой средах, а также взаимодействие различных видов конвекции в случаях постоянной и переменной массовых сил.

Развитие методов моделирования в гидродинамике на основе уравнений Навье – Стокса и накопленный опыт решения многих конкретных задач [1–3] создают новые возможности для исследований, в особенности при изучении многопараметрических задач, их применения для управления, а также при обучении нового поколения исследователей в области гидродинамики. В данной работе излагается подход к реализации этой цели для двумерных нестационарных задач конвективного теплообмена на основе модели конвекции в приближении Обербека – Буссинеска.

Потребности в решении многопараметрических задач, представлении и обобщении данных проявились особенно остро в области гидродинамики и тепломассообмена в связи с проблемой анализа и интерпретации экспериментов, выполненных в условиях микрогравитации, характеризующихся сложным пространственно-временным изменением внешних сил. Многопараметрический характер таких экспериментов обусловлен поиском оптимальных технологий, основанных на существенном изменении характера взаимодействия процессов гравитационного и негравитационного типов для широкого класса рабочих веществ (см., например, [4–5]). Поэтому важной является разработка специальных средств, предназначенных для проверки адекватности моделей в сложных условиях, оперативного количественного анализа процессов гидромеханики в условиях микрогравитации и их практического применения, например для экспериментов с помощью телекоммуникаций, и др. Более подробное обсуждение этой проблемы и обзор состояния разработки специальной системы на персональном компьютере COMGA (аббревиатура Convection in Microgravity and Application) представлены в [6]. С помощью этой системы уже выполнен ряд тестов классических задач и решены многие новые задачи [7–9].

В данной работе, развивая идеи работы [10], представлены концепция, результаты и перспективы компьютерной лаборатории, представляющей интеллектуальную оболочку системы COMGA. Содержание компьютерной лаборатории в условиях микрогравитации, намеченное в [10], дополнено более широким классом задач конвекции в однородных и пористых средах в замкнутых двумерных областях прямоугольной и цилиндрической (осесимметричной) геометрии при различных типах граничных условий, физических свойств и внешних массовых сил (вращение, вибрации, включая использование реальных микроускорений). Приведены конкретные примеры, содержащиеся в компьютерной лаборатории, с использованием полученных ранее, а также

новых результатов, и подробная библиография решенных задач. В качестве новых возможностей обсуждается использование данных измерений для изучения влияния конвективных процессов, обусловленных реальными условиями микрогравитации.

На формирование излагаемой ниже концепции, а также на разработку численных методов и программного обеспечения существенное влияние оказал предшествующий опыт авторов, обобщенный в упоминавшихся монографиях [1–3]. Учитывая эти публикации, здесь не рассматриваются вычислительные аспекты приведенных исследований, имеющие существенное значение для эффективности их компьютерной реализации.

1. Система на персональном компьютере COMGA как ядро компьютерной лаборатории. Системой для моделирования процессов гидродинамики и теплообмена ниже называется совокупность всех средств, необходимых для их математического моделирования и объединенных в удобном для применения на персональном компьютере. Отдельные версии рассматриваемой ниже системы, содержащие все эти средства, излагавшиеся в процессе ее развития, начиная с [7], в [8–10], являются довольно компактными и занимают память, соответствующую одной компьютерной дискете. Ниже дано краткое изложение текущего состояния разработки системы на момент написания этой статьи.

Математические модели в системе COMGA. Рассматриваемая ниже версия системы основана на двумерных (плоских или осесимметричных, с тремя компонентами скорости, но двумя пространственными переменными) нестационарных уравнениях Навье – Стокса. Учитываются угол наклона и изменение во времени (вращение, вибрация) массовой силы. Для моделирования термоконцентрационной конвекции используются две формулировки определяющих уравнений Навье – Стокса в приближении Буссинеска – в переменных скорость – давление и вихрь – функция тока.

Эта система уравнений является приближением общей системы уравнений Навье – Стокса [11] в случае, когда уравнение состояния имеет вид $\rho = \rho_0(1 \pm \beta_T \Delta T \pm \beta_C \Delta C)$.

В случае термоконцентрационной гравитационной конвекции исходная система имеет вид

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) \mathbf{V} - 2(\mathbf{V} \times \boldsymbol{\Omega}) = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{V} + (\beta_T T + \beta_C C)(\mathbf{g}(t) - \boldsymbol{\Omega}(t) \times (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\Omega}) - \mathbf{r} \times \dot{\boldsymbol{\Omega}}) \quad (1.1)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{V} = 0 \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) T = a \nabla^2 T, \quad \frac{\partial C}{\partial t} + (\mathbf{V} \nabla) C = D \nabla^2 C \quad (1.3)$$

Здесь \mathbf{V} – вектор скорости, T – температура, p – давление, ρ – плотность, C – концентрация примеси, \mathbf{g} – ускорение массовой силы (силы тяжести), \mathbf{r} – радиус-вектор между данной точкой и осью вращения, $\boldsymbol{\Omega}(t)$ – угловая скорость системы, $\dot{\boldsymbol{\Omega}}$ – угловое ускорение, $\mathbf{g}(t)$ – вектор микроускорений, не зависящих от вращения, ν , a , D – коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности и диффузии соответственно. Выражение для ускорения, зависящее в общем случае от времени, может включать в качестве частных случаев вращение и вибрацию.

Эти уравнения и граничные условия можно привести к безразмерному виду, определяя соответствующим образом масштабы времени L^2/ν , длины L , скорости ν/L и т.д. Их безразмерные решения будут определяться в простейшем случае следующими безразмерными числами: Грасгофа (Gr), концентрационного числа Грасгофа (Gr_c),

Тейлора (Ta), Рейнольдса (Re), Прандтля (Pr), Шмидта (Sc), отношения сторон области (L/H), где

$$\text{Gr} = g \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \frac{\Delta T L^3}{\nu^2}, \quad \text{Gr}_c = g \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial C} \right) \frac{\Delta C L^3}{\nu^2} \quad (1.4)$$

$$\text{Ta} = \frac{\Omega L^2}{\nu}, \quad \text{Pr} = \frac{\nu}{a}, \quad \text{Sc} = \frac{\nu}{D}, \quad \text{Re} = \frac{U_0 L}{\nu}$$

Для свободной конвекции в проницаемых мелкодисперсных пористых средах используется модель Буссинеска – Дарси, которая для изотропного случая имеет вид

$$\frac{\mu \mathbf{v}}{k} = -\nabla p + \rho g \beta \Delta T, \quad \text{div} \mathbf{v} = 0 \quad (1.5)$$

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) T \right) = \lambda^* \nabla^2 T \quad (1.6)$$

где β – коэффициент объемного расширения, μ – коэффициент динамической вязкости, c_p – удельная теплоемкость газа (жидкости), заполняющего поры, λ^* – эффективная теплопроводность пористой среды без учета конвекции, T – средняя температура среды, ΔT – разность между местной и некоторой характерной температурами, k – коэффициент проницаемости пористой среды.

В этом случае числа Грасгофа и Прандтля модифицируются к следующему виду:

$$\text{Gr}_* = \frac{\rho g \beta \Delta T H^2}{\mu k}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu c_p}{\lambda^*}, \quad \text{Ra}_* = \frac{\rho c_p g \beta \Delta T H^2}{\lambda^* k} \quad (1.7)$$

Предусмотрено несколько вариантов граничных условий. Нормальная к границе компонента скорости может быть задана на каждой из границ. Для касательной компоненты скорости граничные условия могут быть заданы либо в виде условий первого рода $u = v = 0$ (твердая стенка), либо второго рода, что допускает наличие градиента сил поверхностного натяжения.

В системе COMGA реализованы краевые задачи для прямоугольной области со следующими граничными условиями.

На твердой поверхности для систем (1.1)–(1.2) и (1.5) соответственно имеем

$$u = v = 0 \quad (1.8)$$

Для уравнений (1.3)–(1.5)

$$T = T_w \quad \text{или} \quad q_w = -k \frac{\partial T}{\partial n} \quad (1.9)$$

где T_w , q_w – температура и поток тепла соответственно.

На линии симметрии, например для оси y

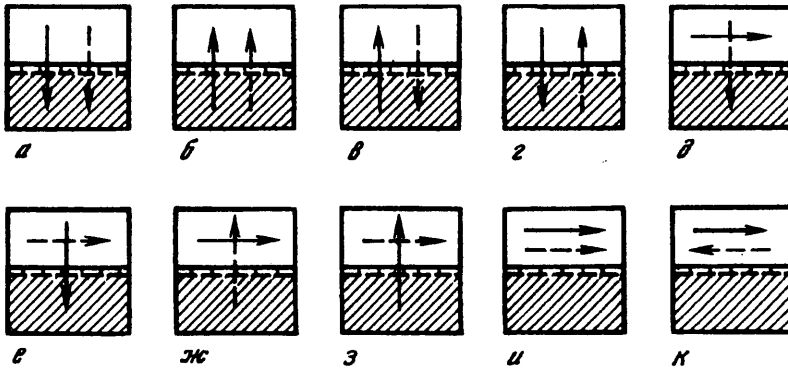
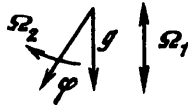
$$u = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad (1.10)$$

Асимптотические условия на бесконечности, например

$$u \rightarrow u_\infty, \quad v \rightarrow v_\infty, \quad \rho \rightarrow \rho_\infty, \quad T \rightarrow T_\infty \quad (y \rightarrow \infty) \quad (1.11)$$

Граничные условия, учитывающие действие градиентов сил поверхностного натяжения на свободной поверхности, реализованы в случае, когда эта поверхность плоская и недеформируемая

$$\mu \frac{\partial u_s}{\partial n} = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial s} + \frac{\partial \sigma}{\partial C} \frac{\partial C}{\partial s} \quad (1.12)$$



Фиг. 1. Классификация (а–к) возможностей компьютерной системы для моделирования термоконцентрационной конвекции: пунктирные стрелки обозначают направление потока тепла, сплошные стрелки – направление потока массы, сплошные линии – твердую поверхность, пунктирные линии – свободную поверхность

Безразмерный вид этих граничных условий может быть получен, если ввести масштабы времени, длины, скорости и т.д., при этом возникают два безразмерных параметра Mn и Mn_c – тепловое и концентрационное числа Марангони

$$Mn = \frac{1}{\mu\alpha} \frac{\partial \sigma}{\partial T} \Delta TH, \quad Mn_c = \frac{1}{\mu\alpha} \frac{\partial \sigma}{\partial C} \Delta CH$$

Начальные данные задаются в виде полей искоемых функций

$$u_0 = u(x, y, 0), \quad v_0 = v(x, y, 0), \quad C_0 = C(x, y, 0), \quad T_0 = T(x, y, 0) \quad (1.13)$$

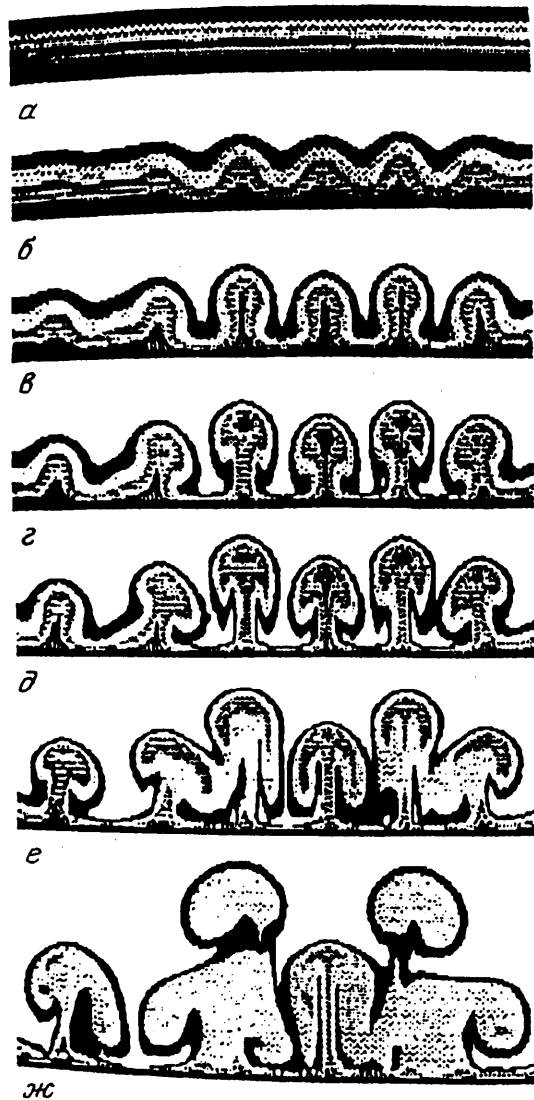
Компоненты вектора микроускорений $g_x(t)$ и $g_y(t)$ в двумерном случае записываются в виде

$$g_x(t) = g_{x0} + (g_s + g_t \sin(\Omega_1 t)) \sin(\Omega_2 t + \varphi_0) \quad (1.14)$$

$$g_y(t) = g_{y0} + (g_s + g_t \sin(\Omega_1 t)) \cos(\Omega_2 t + \varphi_0)$$

где g_{x0}, g_{y0} – компоненты постоянной составляющей микроускорения, g_s, g_t – постоянные и переменные компоненты микроускорения, обусловленные вращением, Ω_1, Ω_2 – частоты вибраций и вращения, φ_0 – начальный угол отклонения. Такое общее представление включает основные частные случаи пространственно-временного изменения вектора микроускорения, которые использовались в предшествующих работах, посвященных анализу остаточной конвекции в условиях микрогравитации (см., например, [4–6]). Вместе с тем имеется возможность использовать данные о микроускорениях непосредственно из файлов (см. разд. 6). Для конвекции в проницаемой анизотропной пористой среде в обоих из упоминавшихся выше случаях плоской и осесимметричной геометрии реализована также запись закона Дарси с различными коэффициентами проницаемости в различных направлениях [8].

Программная реализация системы. Система COMGA представляет собой гибкое и удобное программное средство для моделирования на персональном компьютере вы-



Фиг. 2. Развитие нестационарных конвективных течений (термиков) после потери устойчивости гидростатического равновесия для различных моментов времени ($\nu t/L^2 = 0,0135$ (а), $0,0138$ (б),..., $0,0145$ (жс))

нужденных, а также естественных термоконцентрационных течений гравитационного и негравитационного типов. Программная оболочка системы COMGA имеет многоуровневое "Меню" и предоставляет широкие возможности для ввода-вывода информации (пре- и постпроцессорные этапы моделирования). Построение геометрии расчетной области и назначение граничных условий происходят в интерактивном режиме. Различные средства визуализации доступны на всех этапах решения задачи и включают как картины и различные характеристики полей течения, температуры и концентрации, так и "треки" движущихся частиц. Особое внимание уделено созданию удобного интерфейса с пользователем и развитых средств визуализации результатов решения. Все части системы – поддержка постановки задачи, ввод определяющих

параметров задачи (препроцессор), вычислительная подпрограмма, дополнительные средства обработки данных, их визуализация, преобразование данных в формат других программных комплексов для анализа и печати данных – работают под управлением общей графической оболочки в единой среде пользователя. Программная оболочка основана на использовании падающих "Меню", горячих ключей и многооконного графического интерфейса, а также управления с помощью мыши. Система работает на IBM-совместимых персональных компьютерах с математическим сопроцессором и EGA/VGA-монитором.

В "Меню" системы среди прочих включены следующие важные разделы.

"Файлы": в этом разделе предоставляется возможность ввести информацию из файлов или записать ее на файлы с последующим использованием в расчетах.

"Параметры": в этом разделе осуществляется идентификация расчетных случаев, обозначение и ввод всей информации, необходимой для постановки задачи при использовании меню (например, выбор плоской или цилиндрической геометрии, задание отношения сторон области, граничных условий (1.8)–(1.12), начальных условий (1.13), теплофизических свойства среды, характеристик массовой силы (1.14) и др.).

"Метод": в этом разделе предоставляется возможность выбрать определяющие уравнения изотермической жидкости (1.1)–(1.2), течения с теплообменом (1.1)–(1.3) и/или массообменом (1.1)–(1.4), а также разностную сетку и схему решения (явную или неявную), и задать сеточные параметры задачи.

Так как в упомянутых разделах содержится в наглядной форме вся информация, необходимая для моделирования, то меню может служить вспомогательным средством при преподавании основ математического моделирования, а также при проведении многопараметрических расчетов процессов конвективного тепло- и массообмена и управления ими.

Потенциальные возможности системы для анализа процессов конвективного теплообмена. На фиг. 1 показана простейшая классификация возможностей этой системы для анализа процессов термоконцентрационной конвекции ("двойной диффузии"), обусловленной силами плавучести или эффектами Марангони при различных направлениях потоков тепла и массы по отношению друг к другу или по отношению к направлению действия массовой силы, а также (что важно для конвекции Марангони) по отношению к свободной поверхности жидкости, если таковая имеется.

Эта классификация дана для естественных конвективных течений в плоской квадратной области с одним типом граничных условий, или направлением потока тепла (массы). В более общем случае следует учесть наличие различных режимов течения, в частности нестационарность конвективного течения, возможную для всех указанных случаев. Предусмотрена возможность изучения всех упомянутых процессов в полноту, частично замкнутых или открытых областях.

В качестве примера одного из нестационарных конвективных течений, описываемых системой, на фиг. 2 показано развитие термик в воде ($Pr = 7$) после потери устойчивости гидростатического равновесия при внезапном подогреве нижней границы начально покоящейся жидкости с равномерной начальной температурой ($V = 0$, $T_0 = \text{const}$). Здесь картинам *a–ж* соответствуют изотермы жидкости при различных значениях безразмерного времени, иллюстрирующие образование и подъем термик (см. картины термик в лабораторном эксперименте [12]).

Принимая во внимание, что каждая разновидность течений из классификации на фиг. 1 может иметь переходный или турбулентный характер, а также возможность описания упомянутых процессов для осесимметричной геометрии в однородной и изотропной или анизотропной пористых средах при различных типах граничных условий, наличия стратификации и взаимодействия конвективных течений различной природы, можно видеть, что класс потенциальных возможностей этой системы весьма обширен, что и является одной из причин разработки рассматриваемой ниже компьютерной лаборатории.

2. Концепция и содержание компьютерной лаборатории на основе системы COMGA. Получение новых знаний является творческим процессом, которому могут лишь способствовать, но который не могут заменить компьютерные средства. К этому приводит и опыт применения данной системы для решения новых гидродинамических задач как ее авторами, так и независимыми пользователями.

Понятие компьютерной лаборатории является распространением традиционного понятия лаборатории (от латинского *laborare – laboratorium* – специально оборудованное помещение для проведения научных, производственно-контрольных или учебных экспериментов, а также учреждение или его отдел, где проводятся такие эксперименты) на тот случай, когда эксперименты имеют вычислительный характер и основаны на достаточно представительной и адекватной вычислительной системе или на сочетании таких систем.

Компьютерная лаборатория на основе рассмотренной выше вычислительной системы представляет наряду с самой этой системой ее интеллектуальную оболочку, включающую помощь в подготовке постановки задачи и выбора подходящей численной схемы и ее параметров, тесты результатов расчета, а также результаты выполненных ранее исследований фундаментальных и прикладных задач и возможность быстрого решения новых задач. Целью компьютерной лаборатории является также осуществление более тесной связи между "компьютерными знаниями" и реальными знаниями, полученными в физической лаборатории, а также упорядочение информации о предшествующих работах, помощь новым исследователям в постановке и решении задач, экспертиза, обучение и др.

Компьютерная лаборатория напоминает широко применяемые шахматные системы, которые содержат дебюты, сыгранные партии (т.е. постановки исходных задач и результаты выполненных ранее решений задач), анализ типичных позиций (т.е. некоторых режимов данного процесса) и, наконец, играющую программу, с помощью которой можно как повторять старые, так и находить новые ходы. Однако последние, имея дело с объектом, более приспособленным к формализации, и постоянно участвуя в состязаниях, опережают по действенности и распространению соответствующие научные информационно-вычислительные системы.

Представляемый ниже план компьютерной лаборатории на основе системы COMGA включает все основные случаи рассмотренной выше классификации. Каждая задача, формулируемая ниже, может быть использована как поддержка известных учебников по механике вязкой жидкости и теплообмену [11–13], монографий по конвективным течениям, устойчивости конвективных течений [1, 2, 14–16] и приложений исследований конвективных процессов в условиях микрогравитации. Ее описание снабжено дополнительными ссылками на экспериментальные и теоретические исследования, соответствующими каждой конкретной постановке. Ввиду ограничения объема статьи ниже приведены конкретные примеры только части компьютерной лаборатории, необходимые прежде всего для понимания ее концепции. Ссылки даны в основном на наиболее важные экспериментальные исследования, а также на предшествующие работы авторов статьи, опубликованные преимущественно в журнале "Механика жидкости и газа".

Значком (*) в приводимых ниже конкретных примерах из содержания лаборатории отмечены задачи, уже решенные в предшествующих работах с помощью различных методов и потенциально содержащиеся в приводившемся на фиг. 1 классификаторе системы. Значком (**) помечены задачи, решенные ранее и повторно решенные с помощью системы COMGA в процессе ее отработки. Наконец, значком (***) отмечены некоторые новые задачи, решенные с ее помощью.

3. Вынужденные течения изотермической жидкости. Для реализации этого класса задач в "Меню" системы COMGA нужно выбрать наименование "Гидродинамика", что позволяет обойти решение уравнений переноса тепла (1.3) и массы (1.4). Следует отметить возможность исследования течений вдоль твердых или свободных (но фикси-

рованных) границ, что достигается выбором соответствующей позиции в разделе, соответствующем граничным условиям.

*Простейшие типы течений в пограничном слое и в плоском канале (**)* [3, 4, 11–13]. Цель: определение профилей скорости, коэффициента трения вдоль длины канала и пластины, а также длины участка стабилизации течения в канале в зависимости от числа Re .

*Сдвиговое течение в замкнутой области с движущимися верхней и нижней границами (**)* [3, 17]. Параметры: число Re , отношение сторон области, взаимное направление движения границ (движется одна граница, две границы в одном и том же или в противоположном направлениях). Цель: определение структуры основного и вторичного течений, а также коэффициента трения в зависимости от параметров.

*Течение вблизи вращающегося диска в замкнутом цилиндре (**)* [1, 18]. Параметры: отношение диаметра цилиндра к диаметру диска, отношение высоты цилиндра к его диаметру, отношение скоростей вращения цилиндра и диска. Цель: определение структур, интенсивностей, устойчивости основного и вторичного течений и режимов течения, обусловленных вращением в зависимости от динамических и геометрических параметров.

Основные режимы: вращение только диска [1, 18], вращение только цилиндра, вращение цилиндра и диска в одну сторону (изовращение), вращение цилиндра и диска в противоположные стороны (противовращение) [1].

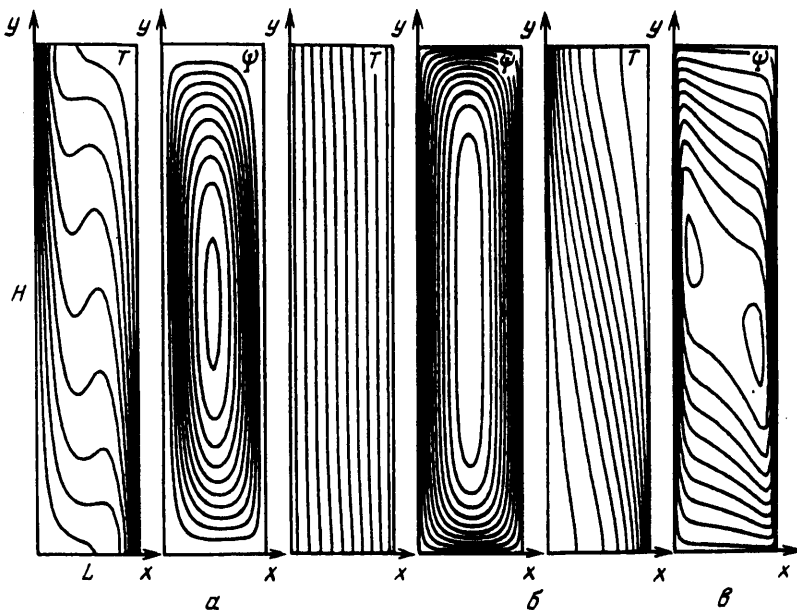
Отрыв пограничного слоя и течение за уступом ()* [19]. Цель: определение длины зоны отрыва и структуры течения в этой зоне, коэффициента трения, устойчивости течения для плоского и осесимметричного течений. Работа [19] содержит, в частности, данные международных тестов этой задачи.

4. Естественная гравитационная конвекция. Для реализации этого класса задач в "Меню" следует назначить позиции "Гидродинамика", "Температура" и (или) "Концентрация", соответствующие классам тепловой и (или) концентрационной и (или) их совместному действию, т.е. термоконцентрационной конвекции, а в разделе "Граничные условия" назначить позицию, соответствующую условиям прилипания, что позволит избежать рассмотрения конвективных течений, обусловленных градиентами сил поверхностного натяжения. При необходимости рассмотрения задач естественной гравитационной конвекции с границами без трения следует использовать в разделе "Граничные условия" позицию, соответствующую свободной границе, исключив конвекцию поверхностного типа, положив равными нулю коэффициенты $\beta_{\sigma T}$, $\rho_{\sigma c}$ и определяющих силы поверхностного натяжения в разделе "Свойства".

*Тепловая гравитационная конвекция в вертикальном слое при боковом подогреве (**)* [1–3, 20–25]. Параметры: Ra , Pr , L/H . Цель: изучение структуры течения и температурного поля, локальной и средней теплопередачи (числа Нуссельта) и температурной стратификации, вызываемой конвекцией, в зависимости от параметров, определение границ режимов конвекции (теплопроводности, пограничного слоя, колебательной и т.д.).

Основные варианты: тепловой режим боковых границ (случай заданной разности температур или заданного потока тепла на боковых границах [20, 25]), тепловой режим верхнего и нижнего оснований; возможные случаи теплоизолированных границ или заданного (линейного) распределения температур на этих границах. Подробные ссылки на предшествующие работы содержатся в [1, 3].

Все задачи, решенные в [20] на основе уравнений Навье – Стокса сжимаемого газа при определяющих параметрах, соответствующих случаю слабой сжимаемости, могут быть решены также и с помощью системы COMGA. Вместе с тем в настоящее время находится в стадии разработки расширенная версия этой системы, использующая полные уравнения Навье – Стокса сжимаемого газа в постановке, приведенной в [20]. Случай квадратной области, подогреваемой сбоку, при заданной разности температур и теплоизолированных



Фиг. 3. Линии тока и изотермы в вертикальном слое, заполненном однородной (а – воздух, $Pr = 0,71$, $Gr = 5 \cdot 10^4$) и пористой (б – изотропная, $k_x/k_y = 1$, в – анизотропная, $k_x/k_y = 1500$) средами

верхней и нижней границах, заполненной воздухом ($Pr = 0,73$), является хорошо известным международным тестом [21].

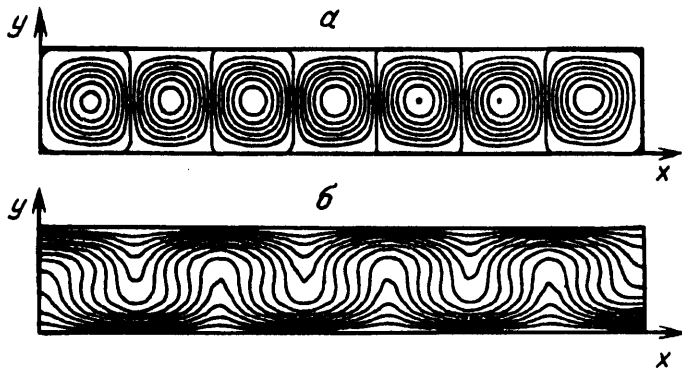
На фиг. 3 представлен пример решения с помощью системы COMGA задачи о стационарной тепловой гравитационной конвекции в вертикальном слое, заполненном однородной или пористой средой ($H/L = 5$) [8]. На боковых изотермических границах слоя поддерживаются различные температуры, а верхнее и нижнее основание теплоизолированы. Здесь показаны изотермы и линии тока в слое, заполненном воздухом (а), и в слое, заполненном пористой средой (б, в – $Ra^* = 2,5$), во всех случаях использована сетка 21×51 . Приведенные результаты хорошо согласуются с данными предшествующих расчетов, однако получены с помощью единой системы. При этом как подготовка данных, так и расчет и вывод графической информации осуществляется намного быстрее.

Тепловая гравитационная конвекция в вертикальном цилиндре, частично заполненном жидкостью, при заданном подводе тепла ()* [1, 26–27]. Параметры: Ra и Pr , отношение высоты к радиусу цилиндра. Цель: определение динамики нестационарного прогрева жидкости в сосуде, а также границ режимов (теплопроводный, промежуточный, квазистационарный), характеристик теплообмена и температурного расслоения в зависимости от параметров.

Основные варианты: подвод тепла только к боковой поверхности при теплоизолированных свободной поверхности и дне [1], подвод тепла к боковой и свободной поверхностям [27], подвод тепла ко дну [*] [27], подвод тепла к боковой и свободной поверхностям и дну [*] [27].

Статьи [14, 27] содержат подробные ссылки на многочисленные предшествующие работы, в том числе параметрические расчеты характерных режимов во времени, их границ и т.д.

*Тепловая гравитационная конвекция в горизонтальном слое при боковом потоке тепла (**)* [2, 28–29]. Параметры: Ra и Pr , L/H . Цель: определение структуры полей температуры и скорости, устойчивости течения и появления вторичных течений и ко-



Фиг. 4. Линии тока (а) и изотермы поля температур (б) в горизонтальном слое за порогом устойчивости гидростатического равновесия ($Ra = 10^4$, $Pr = 1$, $L/H = 6$)

лебаний, являющихся потенциальной причиной микронеоднородности кристаллов, выращиваемых из жидкой фазы.

Варианты: адиабатические горизонтальные границы, заданный (линейный) профиль скорости на границах. Для случая $Pr \ll 1$ ($Pr = 0,015$, $H/L = 4$) выполнены международные тесты различными численными методами [28]. Предельный случай $Pr = 0$, при котором поля скоростей в вертикальном и горизонтальном слоях, подогреваемых сбоку, не различаются, также является базовым тестовым примером, подробно рассмотренным в [2, 28].

*Тепловая гравитационная конвекция в горизонтальном слое, подогреваемом снизу (задача Рэлея – Бенара) (**)* [7, 16, 30–32]. Параметры: Ra , Pr , L/H . Цель: определение критического числа Рэлея, характеризующего возникновение конвекции после потери устойчивости гидростатического равновесия, горизонтального масштаба конвективных ячеек, локальной и средней теплопередачи.

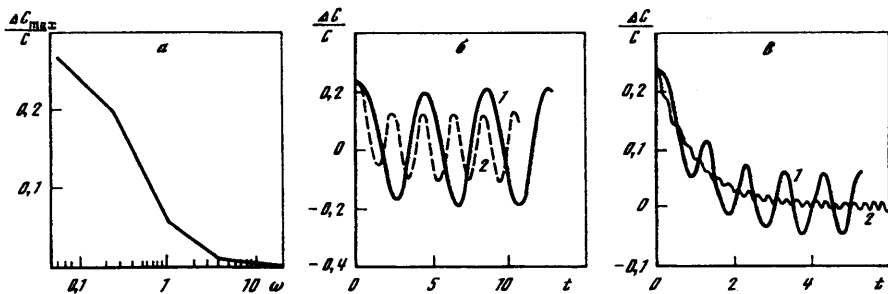
Варианты: замкнутая область при $L/H < 1$ и горизонтальный слой, подогреваемые снизу [30], горизонтальный слой при $L/H \gg 1$, в том числе представление конвекции в бесконечно длинном горизонтальном слое набором ячеек с фиксированной длиной волны [31].

На фиг. 4 приведен пример стационарной валиковой структуры тепловой гравитационной конвекции в горизонтальном слое, подогреваемом снизу, которые также получены в ряде предшествующих работ [31].

*Термоконцентрационная конвекция (двойная диффузия) подогреваемой сбоку замкнутой области при наличии устойчивого вертикального градиента концентрации и образование слоистых структур (**)* [1–2, 14, 33–34] (случай δ в классификации, показанной на фиг. 1). Параметры: Ra , Ra_c , Pr , Sc , H/L . Цель: определение структуры течения, полей температур и концентраций примеси и границ характерных режимов конвекции (тепловой, концентрационной, термоконцентрационной) на диаграмме $Ra-Ra_c$, в том числе определение границ образования слоистых структур.

*Термоконцентрационная конвекция и распределение концентрации примеси в горизонтальном слое при боковом подогреве при наличии горизонтального градиента концентрации (**)* (случай ε в классификации на фиг. 1). Параметры: числа Ra , Ra_c , Pr , St , L/H . Цель: определение структуры течения, полей температур и концентраций, концентрационных неоднородностей поперек слоя, вызываемых слабой тепловой гравитационной конвекцией, в том числе эффекта максимума концентрационной неоднородности, вызываемого тепловой гравитационной конвекцией.

*Тепловая конвекция и распределение температуры (примеси) в плоском слое при медленном изменении ориентации (***)* [35–36]. Параметры: Ra , Pr , Sc , L/H , Ω – часто-



Фиг. 5. Изменение поперечных разностей концентраций в слое при медленном изменении его ориентации при $Gr = 10^3$, $Pr = 0,014$, $Sc = 10$, $L/H = 4$ (а – зависимость неоднородности от частоты; б – зависимость неоднородности от времени: 1 – $\omega = 0,25$, 2 – $\omega = 0,5$; в – то же: 1 – $\omega = 1$, 2 – $\omega = 4$)

та вращения. Цель: определение изменения полей температуры (концентрация тепловых (диффузионных) потоков) и возможностей выравнивания неоднородностей температуры/концентрации распределения примеси при медленном изменении ориентации слоя.

На фиг. 5 показан пример эффективного использования системы в задаче об уменьшении поперечных концентрационных макронеоднородностей в горизонтальном слое, вызываемых конвекцией в условиях невесомости с помощью медленного изменения ориентации слоя (см. [36]). Изменение частоты вращения $\omega = \Omega L^2/\nu$ в диапазоне от 0 до 10 позволяет практически полностью исключить поперечную концентрационную неоднородность распределения легирующей примеси (базовыми взяты параметры расплава полупроводника, которым соответствует максимальная макронеоднородность распределения примеси, отмечавшаяся в работе [33]).

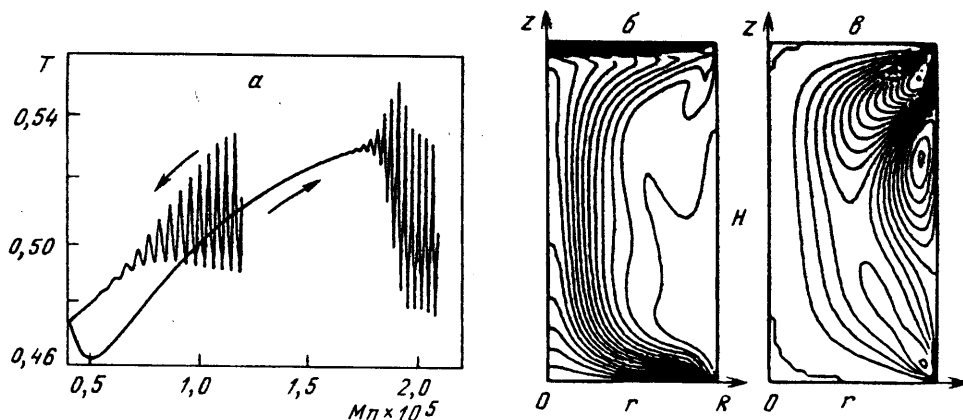
5. Термокапиллярная и капиллярно-концентрационная конвекция (конвекция Марангони). Этот класс течений, соответствующих в классификации на фиг. 1 случаю области со свободной поверхностью жидкости, реализуется в меню системы COMGA выбором позиции, соответствующей свободной границе в разделе "Параметры", а также "Гидродинамика", "Температура", "Концентрация" в разделе "Метод", и заданием соответствующих физических свойств ($\beta_{\sigma T}$, $\rho_{\sigma c}$) в разделе "Свойства", определяющих силы поверхностного натяжения.

Возникновение термокапиллярной конвекции в слое со свободной поверхностью, подогреваемом снизу ()* [37]. Параметры: Mn , Pr , H/L . Цель: определение, реализация течения при потере устойчивости гидростатического равновесия, критического числа Марангони, структуры полей течения, температуры и характеристик теплообмена.

*Термокапиллярная конвекция в горизонтальной кювете со свободной поверхностью при боковом подогреве (**)* [1–2, 37]. Параметры: Mn , Pr , L/H . Цель: определение структуры и интенсивности течения, температур, теплообмена, температурной стратификации, вызываемой конвекцией, конвективной устойчивости и образования вторичных структур (*) [1, 2, 37].

Варианты: цилиндрическая кювета (сосуд) при заданном боковом потоке тепла и адиабатических горизонтальных границах [37], плоский горизонтальный слой при заданной горизонтальной разности температур и теплоизолированных основаниях [1, 2].

*Конвекция и температурные колебания в модели плавающей зоны (цилиндр со свободными адиабатическими боковыми поверхностями) и твердыми горизонтальными границами при заданной разности температур (***)* [38–39]. Параметры: Mn , Pr , H/r . Цель: определение структуры и интенсивности течения, поля температуры, изучение условий возникновения конвективной неустойчивости и температурных колебаний.



Фиг. 6. Структура термокапиллярной конвекции и температурные колебания в модели плавающей зоны при $Mn = 10^5$, $Pr = 32$, $H/R = 2$ (а – изменение температуры во времени в точке $x = 0,25$, $y = 0,5$, б – изотермы, в – линии тока)

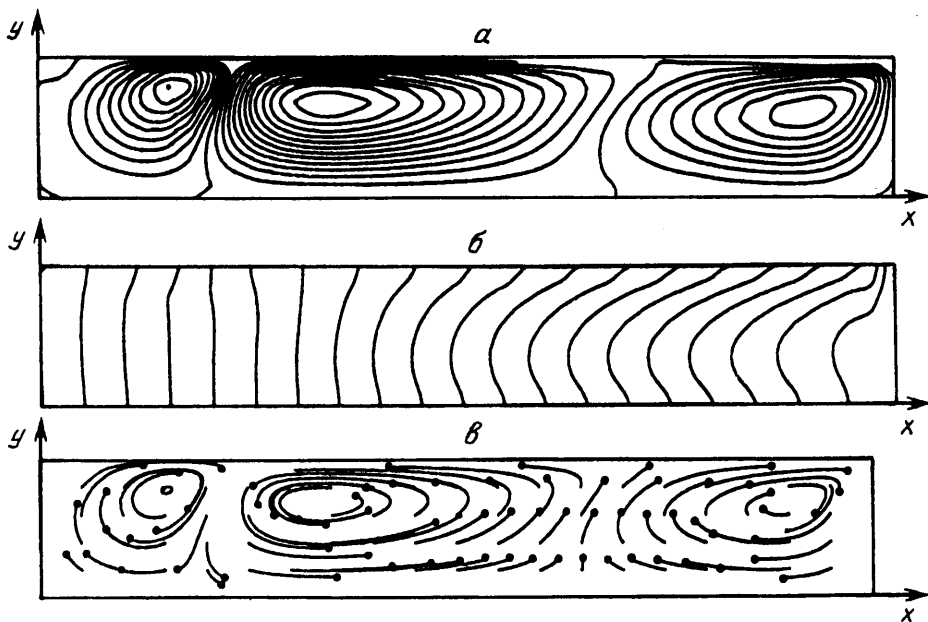
На фиг. 6 показаны результаты решения с помощью системы COMGA этой задачи, для которой потребовалось применение рабочей станции HP-735 [38]. На фиг. 6, а показаны температурные колебания в режимах увеличения и уменьшения числа Марангони. На фиг. 6, б, в даны структуры изотерм и линий тока в колебательном режиме. Эти результаты показывают, что, в отличие от плоского, в осесимметричном случае существует колебательная мода при достаточно больших числах Pr . Факт существования такой моды подтверждается в экспериментах [39], где получена качественно согласующаяся с результатами [38] область существования колебаний на диаграмме число Марангони – отношение сторон зоны.

Решение с помощью системы COMGA этой задачи, являющейся одной из основных для экспериментов по физике жидкости в условиях невесомости, открывает определенные возможности для анализа, интерпретации и управления экспериментами с плавающей зоной с помощью телекоммуникаций.

*Термоконцентрационная конвекция Марангони (двойная диффузия Марангони) в плоском слое со свободной поверхностью (**)* [1–2, 7, 40]. Параметры: Mn , Pr , Sc , Mn_c . Цель: изучение взаимодействия между термокапиллярной и капиллярно-концентрационной конвекцией, образования вторичных течений, возникновения колебаний полей температуры и концентрации.

На фиг. 7 показана типичная картина такого течения (случай k в классификации на фиг. 1), опубликованная в [1] и повторенная в тестовых расчетах с помощью системы COMGA [7]. Вторичные структуры являются следствием взаимодействия термокапиллярной и капиллярно-концентрационной конвекции и приводят к автоколебаниям более ранним, чем в предыдущем случае. Взаимодействие действующих в противоположных направлениях градиентов сил поверхностного натяжения приводит к образованию вторичных структур и автоколебаний. В последующем выполнены серии многопараметрических исследований [40], показавшие эффективность системы COMGA при выявлении временных масштабов развития конвекции с целью обеспечения кратковременных экспериментов на башне сбрасывания.

6. Специализированные модели конвективного тепло- и массообмена и прикладные проблемы. Перечисленные выше конкретные задачи конвективного тепло- и массообмена основаны на так называемых моделях общего назначения [1, 2], реализуемых с помощью основной версии системы COMGA и входящих в классификацию конвективных процессов на фиг. 1. Постановки их могут быть полностью реализованы с помощью меню (во многих типичных случаях тестовые примеры хранятся в соответствующих файлах).



Фиг. 7. Взаимодействие термокапиллярной и капиллярно-концентрационной конвекции: *a* – линии тока, *б* – линии равной концентрации, *в* – линии отмеченных частиц ($Mn = 1000$, $Mn_c = 1100$)

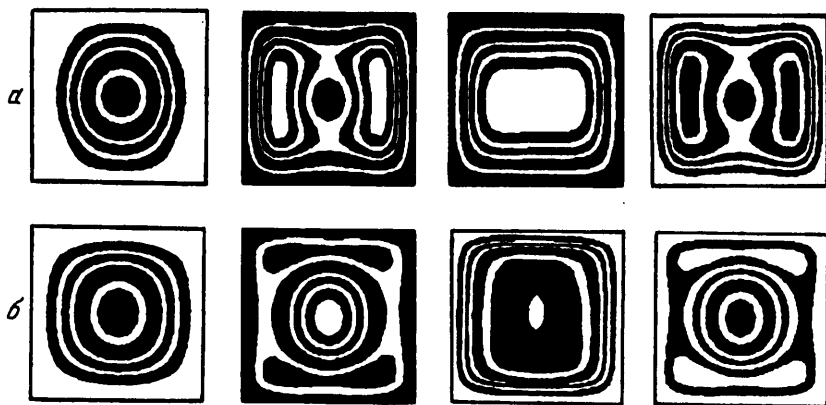
В этом разделе перечисляются некоторые задачи, которые также содержатся в системе COMGA, но в отличие от моделей общего назначения не обслуживаются общим меню, а представляют специализированные версии этой системы.

*Тепловая гравитационная конвекция и перенос тепла в проницаемых пористых изотропных и анизотропных слоях (**)* [41–44]. Параметры: Ra , Pr , модифицированные для конвекции в пористой среде (см. разд. 2), H/L , k_x/k_y . Цели: прикладная – изучение эффективности пористой теплоизоляции и теплопередачи (чисел Нуссельта) от параметров, фундаментальная – изучение структуры конвективного течения, характерных режимов конвекции, сопоставление с опытными данными, определение диапазона применимости модели конвекции в пористой среде.

Варианты: вертикальные слои изотропной и анизотропной пористой теплоизоляции при заданной разности температур поперек слоя и теплоизолированных основаниях (**) [8, 43–44]; горизонтальные слои (*) [43].

*Гидродинамическая модель конвективного тепло- и массообмена в методе роста кристаллов вытягиванием из расплава (метод Чохральского) (**)* [45]. Эта задача является обобщением на неизотермический случай задачи. Параметры: Re , Ra , Pr . Цели: прикладная – определение диапазона параметров, при которых достигается режим равномерного перемешивания в подкристалльной области, в том числе и исследование возможностей реализации этого режима с помощью различных (например, тепловых, динамических) управляющих воздействий; фундаментальная – определение структуры поля течения и температуры, в том числе условий возникновения вторичных течений, неустойчивости, перехода.

Гидродинамическая модель конвективного массообмена при получении тонких слоев полупроводниковых структур методом жидкостной эпитаксии ()* [1, 2, 46]. Параметры: Ra , Pr , относительная толщина и ориентация эпитаксиальной ячейки. Цели: прикладная – уменьшение геометрической неоднородности эпитаксиальных слоев. Этой цели служит, в частности, выращивание слоев в условиях невесомости или выбор оптимальной ориентации слоев, в том числе медленное вращение ячейки (см. [46]);



Фиг. 8. Структуры конвективного течения в модели датчика конвекции при различных частотах качания (*а* – 0,2 Гц, *б* – 1 Гц)

фундаментальная – изучение режимов концентрационной конвекции, структуры течения и поля концентраций, влияние режимов концентрационной конвекции на неравномерность распределения диффузионного потока (змеевидный, клинообразный и т.д.).

*Модель конвективного датчика (тепловая конвекция в квадратной ячейке при сложном пространственно-временном изменении микроускорения, включая использование реальных записей микроускорений с помощью акселерометра) (***)* [2, 6, 47]. Параметры: Ra , Pr , режим микроускорения. Цели: прикладная – оценка уровня микроускорений, оперативная связь показаний акселерометра и компьютерной программы для экспресс-анализа и управления; фундаментальная – исследование структуры конвекции и поля температур при сложном пространственно-временном изменении микроускорений в реальном космическом полете или при их наземном моделировании.

В специальной версии системы COMGA используются данные микроускорений, записанные с помощью акселерометра вдоль осей x, y, z , и в результате их обработки на экран выводятся данные об ориентации и амплитуде вектора микроускорений в течение космического полета. Для анализа гравитационной чувствительности процессов переноса (например, распределения примеси в расплаве) в условиях микрогравитации в упомянутом разделе компьютерной лаборатории используются библиотека физических свойств рабочих средств и наборы конкретных постановок задач.

С помощью раздела компьютерной лаборатории по использованию данных о микроускорениях, записанных в полете станции Спейс-Шаттл [48], была рассчитана тепловая конвекция в расплаве полупроводника ($Pr = 0,014$, $Sc = 10$) в квадратной ячейке (2×2 см) при разности температур поперек ячейки 50 К. Полученный результат [6] показал существенную гравитационную чувствительность распределения легирующей примеси в расплаве, появившуюся в наличии заметной конвективной составляющей в картине распределения. Это дает основание для реализации датчика конвекции [2, 6, 47], в котором осуществляется измерение температурного поля в условиях полета в контролируемых условиях при записи микроускорений с помощью акселерометра и обработке результатов с помощью системы COMGA.

На фиг. 8 приведены результаты расчета с помощью системы COMGA структуры конвекции в ячейке, заполненной воздухом, при наземной обработке такого датчика, осуществляемой с помощью качания, на кафедре физики Пермского государственного университета. Показаны картины нестационарного конвективного течения в ячейке при медленном качании с двумя основными частотами: ниже (*а*) и выше (*б*) критической.

Ввиду ограничения объема статьи здесь не приводятся многие другие применения компьютерной лаборатории, например в случае частично открытых областей, в каналах с загромождением, которые содержатся в системе COMGA и прошли тестовую

апробацию (см., например, [8, 9]), а также возможности, которые возникают при использовании видеокарт для преобразования численных реализаций в видеофильмы, удобные для анализа и сопоставления с экспериментальными данными.

7. Использование системы и компьютерной лаборатории для преподавания в области механики жидкости и процессов тепло- и массообмена. Использование в учебном процессе системы и компьютерной лаборатории, рассмотренных выше, может быть начато еще в курсе общей физики, например при иллюстрации основных понятий гидростатики, гидродинамики и элементарных процессов переноса. Так, разд. 3, 4, 5 компьютерной лаборатории могут иллюстрировать понятия ламинарного течения жидкости, пограничного слоя, устойчивости гидростатического равновесия и т.д.

Для специальных курсов в области механики жидкости и процессов тепло-массообмена разд. 4 поддерживает изложение основ кинематики жидкости (наглядное представление линий тока, траекторий, линий отмеченных частиц и т.д.), а также элементов теории пограничного слоя, теории гидродинамической устойчивости и турбулентности. Для общеинженерных курсов по основам теплопередачи (см., например, [13]) могут демонстрироваться элементарные примеры теории теплопроводности, а также конвективной теплопередачи через газы, жидкостные и пористые прослойки с одновременной демонстрацией внутренней структуры течения. Многие из разделов компьютерной лаборатории могут быть рекомендованы для студентов старших курсов и аспирантов в качестве дополнения к учебным пособиям по вычислительной гидродинамике и тепломассообмену (см., например, [3], где приведены описания соответствующих разностных схем и библиография).

Заключение. В цикле задач о течениях несжимаемой жидкости, а также задач конвекции, обусловленной силами тяжести, градиентами поверхностных сил и сложным пространственно-временным изменением массовых сил, компьютерная лаборатория продемонстрировала свою эффективность. Наиболее существенным является продемонстрированная на тестовых примерах возможность удобного и достаточно быстрого решения с достаточной точностью основных нелинейных задач конвекции при сформулированных выше предположениях, а также оперативность при решении новых нелинейных многопараметрических задач и возможности обобщения и опыта решенных задач.

При дальнейшем развитии имеются перспективы применения компьютерной лаборатории непосредственно оператором на производственном объекте (например, непосредственно на борту орбитальной станции) для управления процессами тепло- и массообмена. К числу задач, которые еще необходимо решить для этого, принадлежат, в частности, обработка и представление в удобном для компьютерной лаборатории виде достаточно длительных во времени реализаций данных, записанных прибором, а также расширение модели конвекции на случаи течений, не удовлетворяющих исходной модели в приближении Обербека – Буссинеска, и развитие системы COMGA на случай трехмерных течений.

В заключение авторы благодарят Д.И. Павловского и В.Л. Грязнова за участие в отдельных этапах этой работы. Данная работа поддержана частично Российским фондом фундаментальных исследований (код проекта 94-01-01551), а также Международным фондом научных исследований (грант JE9100).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаев В.И., Бунэ А.В., Верезуб Н.А. и др. Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье – Стокса. М.: Наука, 1987. 271 с.
2. Полежаев В.И., Белло М.С., Верезуб Н.А. и др. Конвективные процессы в невесомости. М.: Наука, 1991. 240 с.
3. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука, 1984. 285 с.

4. *Polezhaev V.I., Lebedev A.P., Nikitin S.A.* Mathematical simulation of disturbing forces and material sciences processes under low gravity // Proc. 5th Symp. on Material Sciences under Microgravity. ESA SP-222. Noordwijk: ESTEC, 1984. P. 237–243.
5. *Alexander J.I.D.* Low gravity experiment sensitivity of residual acceleration: a review // *Microgravity Sci. and Technol.* 1990. V. 3. № 2. P. 52–69.
6. *Полежаев В.И.* Режимы микроускорений, гравитационная чувствительность и методы анализа технологических экспериментов в условиях невесомости // *Изв. РАН. МЖГ.* 1994. № 5. С. 22–36.
7. *Грязнов В.Л., Ермаков М.К., Никитин С.А., Павловский Д.С.* Решение задач конвекции на персональном компьютере: Препринт № 481. М.: ИПМ АН СССР, 1990. 20 с.
8. *Ermakov M.K., Gryaznov V.L., Nikitin S.A. et al.* A PC-based system for modelling of convection in enclosures on the basis of Navier – Stokes equations // *Intern. J. Numer. Methods in Fluids.* 1992. V. 15. № 9. P. 975–984.
9. *Polezhaev V.I., Ermakov M.K., Griaznov V.L.* Modelling of convective heat/mass transfer processes in microgravity // *Heat Transfer in Microgravity / Ed. Avedisian C.T., Arpacı V.A. The 1993 Winter Annu. Meet. New Orleans; N.Y.: ASME, 1993. HTD – V. 269. P. 35–41.*
10. *Polezhaev V.I., Ermakov M.K., Griaznov V.L. et al.* Computer laboratory on convective processes in microgravity: Concepts, Current Results and Perspective // 46th Intern. Astron. Congr. Oslo, Norway: IAF-95, 1995. J. 3.11. P. 1–9.
11. *Лойцянский Л.Д.* Механика жидкости и газа. М.: Наука, 1987. 840 с.
12. *Ван Дайк М.* Альбом течений жидкости. М.: Мир, 1986. 181 с.
13. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи. М.; Л.: Госэнергоиздат, 1956. 392 с.
14. *Тернер Дж.* Эффекты плавучести в жидкостях. М.: Мир, 1977. 431 с.
15. *Геххарт Б., Джалуря И., Махаджан Р., Саммакия Б.* Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991. Т. 1. 678 с.; Т. 2. 528 с.
16. *Гершуни Г.З., Жуховицкий Е.М.* Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука, 1972. 392 с.
17. *Брайловская В.А., Коган В.Р., Полежаев В.И., Феоктистова Л.В.* Структуры и режимы сдвигового течения жидкости в плоской области с движущимися границами // *Изв. РАН. МЖГ.* 1995. № 2. С. 53–56.
18. *Бердников В.С., Полежаев В.И., Простомолотов А.И.* Течение вязкой жидкости в цилиндрическом сосуде при вращении диска // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1985. № 5. С. 33–40.
19. *Analysis of laminar flow over a backward facing step / Ed. K. Morgan et al. / F. Braunschweig. Wiesbaden: Vieweg, 1984. 420 p.*
20. *Полежаев В.И.* Численное исследование естественной конвекции жидкостей и газов // Некоторое применение метода сеток в газовой динамике. М.: Изд-во МГУ, 1971. Вып. 4. С. 86–180.
21. *De Vahl Davis G.* Natural convection of air in a square cavity: a bench mark numerical solution // *Intern. J. Numer. Methods Fluids.* 1983. V. 3. № 3. P. 249–264.
22. *Eckert E.R., Carlson W.O.* Natural convection in an air layer enclosed between two vertical plates with different temperatures // *Intern. J. Heat and Mass Transfer.* 1961. V. 2. № 1/2. P. 106–120.
23. *Полежаев В.И.* Течение и теплопередача при ламинарной конвекции в вертикальном слое // Тепло- и массоперенос. М.: Энергия, 1968. Т. 1. С. 631–640.
24. *Дайковский А.Г., Полежаев В.И., Федосеев А.И.* Исследование структуры переходного и турбулентного режимов конвекции в вертикальном слое // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1978. № 6. С. 66–75.
25. *Полежаев В.И.* Нестационарная ламинарная тепловая конвекция в замкнутой области при заданном потоке тепла // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1970. № 4. С. 109–117.
26. *Полежаев В.И.* Эффект максимума температурного расслоения и его приложения // Докл. АН СССР. 1974. Т. 218. № 4. С. 783–786.
27. *Полежаев В.И.* Конвективное взаимодействие в цилиндрическом сосуде, частично заполненном жидкостью, при подводе тепла к боковой и свободной поверхностям и дну // *Изв. АН СССР. МЖГ.* 1972. № 4. С. 77–88.
28. *Numerical simulation of oscillatory convection in low – Pr fluids // Ed. B. Roux: F. Braunschweig: Vieweg, 1990. 365 p.*
29. *Кирдяшкин А.Г., Полежаев В.И., Федюшкин А.И.* Тепловая конвекция в горизонтальном слое при боковом подводе тепла // ПМТФ. 1983. № 6. С. 122–128.

30. *Полежаев В.И.* Течение и теплообмен при естественной конвекции газа в замкнутой области после потери устойчивости гидростатического равновесия // Изв. АН СССР. МЖГ. 1968. № 5. С. 124–129.
31. *Полежаев В.И., Власюк М.П.* О ячейковой конвекции в бесконечно длинном горизонтальном слое газа, подогреваемом снизу // Докл. АН СССР. 1970. Т. 195. № 5. С. 1058–1061.
32. *Silveston P.L.* Wärmedurchgang in waagerechten Flüssigkeitsschichten // Forsch. Ing. Wess. 1958. В. 24. N 1. S. 29–32; Н. 2. S. 59–68.
33. *Полежаев В.И., Федюшкин А.И.* Гидродинамические эффекты концентрационного расслоения в замкнутых объемах // Изв. АН СССР. МЖГ. 1980. № 3. С. 11–18.
34. *Бунэ А.В., Грязнов В.Л., Полежаев В.И.* Некоторые математические модели конвекции и внутренних волн в стратифицированной жидкости // Современные вопросы механики сплошной среды. М.: МФТИ, 1985. С. 41–46.
35. *Polezhaev V.I., Ermakov M.K.* Thermal convection in microgravity during a slow rotation // Microgravity Sci. and Technol. 1991. V. 4, № 2. P. 101–103.
36. *Gryaznov V.L., Ermakov M.K., Nikitin S.A. et al.* Space and temporal behavior and control of the residual convection in microgravity // Abstrs Europ. Symp. on Materials and Fluid Sci. in Microgravity. Brussels, Belgium: ESA, 1992. SP-333. P. 80–81.
37. *Полежаев В.И.* Термокапиллярная конвекция жидкости в цилиндрическом сосуде при заданном подводе тепла // Некоторые применения метода сеток в газовой динамике. М.: Изд-во МГУ, 1971. Вып. 3. С. 175–213.
38. *Gryaznov V.L.* CFD simulation of the oscillatory floating-zone convection for high Prandtl numbers // Proc. Microgravity Sci. and Appl. Sess. Intern. Aerospace Congr., Moscow, 1994. М.: NASA/IPMech., 1995. P. 113–118.
39. *Schwabe D., Velten R., Scharmann A.* The instability of surface tension driven flow in models for floating zones under normal and reduced gravity // J. Crystal Growth. 1990. V. 99. № 1/4. P. 1258–1264.
40. *Polezhaev V.I., Ermakov M.K.* Thermosolutal Marangoni convection short-time regimes: proposal for drop tower experiments and real time computer simulation // Microgravity Sci. Technol. 1992. V. 5. № 3. P. 172–175.
41. *Klarsfeld S.* Champs de temperature associes aux mouvements de convection naturelle dans un milieu poreux limite // Rev. Gen. Therm. 1970. V. 9. № 108. С. 1403–1423.
42. *Katto Y., Masuoka T.* Criterion for the onset of convective flow in a fluid in a porous medium // Intern. J. Heat Mass Transfer. 1967. V. 10. № 3. P. 297–309.
43. *Власюк М.П., Полежаев В.И.* Исследование переноса тепла при естественной конвекции в проницаемых пористых материалах // Тепло- и массоперенос. Минск, 1972. Т. 1. С. 366–373.
44. *Егоров С.Д., Полежаев В.И.* Конвективный теплообмен в вертикальных слоях анизотропного пористого материала // Проблемы механики и теплообмена в космической технике. М.: Машиностроение, 1982. С. 232–241.
45. *Kosushkin V.G., Polezhaev V.I., Zakharov B.G.* Ground-based experiments and microgravity alternatives in GaAs crystal growth // Proc. Microgravity Sci. and Appl. Sess. Intern. Aerospace Congr., Moscow, 1994. Moscow: NASA/IPMech., 1995. P. 141–146.
46. *Верезуб Н.А., Полежаев В.И.* Получение слоев полупроводниковых материалов в условиях микрогравитации при медленном вращении ячейки // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 46–52.
47. *Богатырев Г.П., Ермаков М.К., Иванов А.И. и др.* Экспериментальное и теоретическое исследование тепловой конвекции в наземной модели конвективного датчика // Изв. РАН. МЖГ. 1994. № 5. С. 67–75.
48. *Baughner C.R., Marshall J.C., Martin J.L., De Lombard R.* Review of the Shuttle Vibration Environment // 31st Aerospace Sci. Meeting and Exhibit, Reno: NV; AIAA. Paper. 1993. № 0832. 9 p.

Москва

Поступила в редакцию
16.V.1996