

ПРИРОДА

№ 10, 2003 г.

Полежаев В.И., Соболева Е.Б.

Гидродинамика околокритических жидкостей

© “Природа”

**Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции**



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 03-07-90415)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
vivovoco.usu.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Гидродинамика околокритических жидкостей

В.И.Полежаев, Е.Б.Соболева

Механика сплошных сред, которая изучает течения и тепловые характеристики находящихся в движении систем, насчитывает многовековую историю. Но построение теоретических моделей и поиск решений в этой области не закончены до сих пор, поскольку строгое математическое описание осложняется такими факторами, как многомерность, наличие свободных поверхностей, нелинейные эффекты. С одной стороны, наглядность изучаемых процессов, во многих случаях легко воспроизводимых в лаборатории, позволяет говорить о ведущей роли эксперимента как источника новых знаний. С другой стороны, совершенствование компьютерной техники стимулирует развитие методов прямого численного моделирования, благодаря которым на компьютере можно имитировать движения среды и определять многие физические параметры, зачастую недоступные экспериментальному измерению.

Комплексное использование различных методов исследования обеспечивает значительный прогресс в механике сплошных сред и ее приложениях, однако и в настоящее время

© В.И.Полежаев, Е.Б.Соболева



Вадим Иванович Полежаев, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией математического и физического моделирования в гидродинамике Института проблем механики РАН. Область научных интересов — теплоперенос в сплошных средах, конвективные течения различных видов в земных условиях и при микрогравитации, динамические процессы в разнообразных средах.



Елена Борисовна Соболева, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник того же института. Научные интересы связаны с численным моделированием в гидродинамике и исследованиями теплообмена в сплошных средах, описываемых различными уравнениями состояния.

возникают задачи, совершенно новые по постановке и расширяющие традиционные представления о динамике текучих объектов. Речь идет о жидкостях с особыми физическими характеристиками, изучение которых ранее было прерогативой отдельных направлений в физике, химии, термодинамике, теплофизике.

Вблизи критической точки

Известно, что любое вещество, кроме водорода, имеет критическую точку, вблизи которой различия между равновесными состояниями жидкой и газообразной фаз стираются, а среда представляет собой некоторый флюид с новыми необычными свойствами [1].

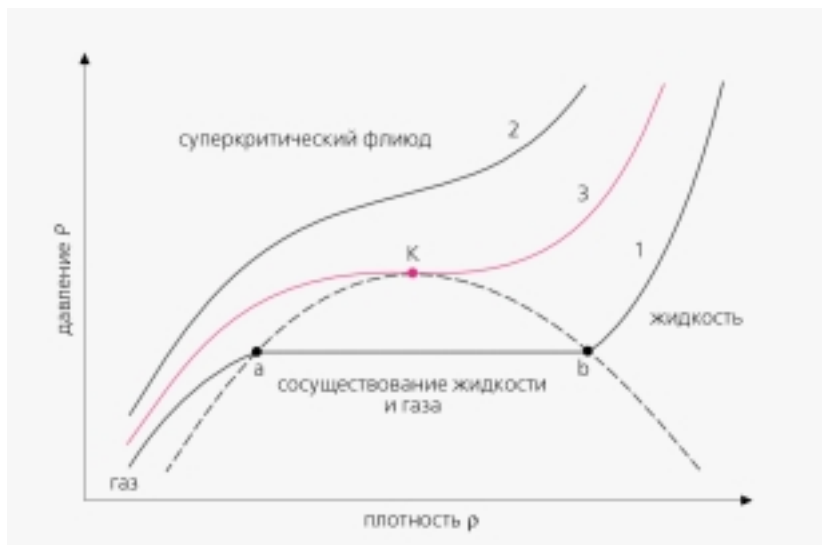


Рис. 1. Фазовая диаграмма. В окрестности точки К среда приобретает свойства окологрической жидкости.

Действительно, если изотермически сжимать разреженный газ, в котором молекулы взаимодействуют только при столкновениях, возможны три пути эволюции, представленные на фазовой диаграмме в координатах давление—плотность (P — ρ на рис.1). При невысокой температуре (кривая 1) наблюдается превращение газа в жидкость (участок a — b) — фазовый переход первого рода. Если же газ сильно нагрет (кривая 2), то никакое сжатие не заставит быстро движущиеся молекулы образовывать жидкость — среду с определенной структурой и ближним порядком. Для вещества в таком состоянии иногда используется термин «суперкритический флюид», поскольку ни жидкостью, ни газом в привычном понимании его считать нельзя [2]. Третий путь (кривая 3) реализуется лишь при определенной температуре, приводя к наиболее интересным изменениям физических свойств. В одной точке, которая и называется критической (точка К), касательная к кривой оказывается горизонтальной и фазовый переход носит предельный характер: одновременного существования жидкости и газа уже не на-

блюдается — эти фазы становятся тождественными, — но происходят внутренние изменения. Такое превращение родственно большой группе физических процессов в веществах, растворах, материалах (например, возникновению сверхтекучести, сверхпроводимости), которые связаны с преобразованием структуры или, как говорят, с изменением симметрии и классифицируются как фазовый переход второго рода.

При сжатии газа вблизи критической точки его нельзя считать ансамблем частиц, действующих друг на друга только при столкновениях. Молекулы начинают взаимодействовать и на расстоянии (поскольку сильно сближаются), что приводит к образованию «сгустков» вещества — флуктуаций плотности, которые увеличиваются в размерах по мере приближения к критической точке и тоже взаимодействуют друг с другом. В системе возникает структура, с микроскопической точки зрения похожая на «газ» капель; она определяется уже параметрами всей совокупности частиц, а не отдельными составляющими, т.е. носит кооперативный характер. В результате взаимодей-

ствия всех частей и усреднения флуктуаций на макроскопических масштабах появляются свойства, которые присущи системе как единому целому и названы критическими.

Итак, будем называть окологрической жидкостью среду, которая имеет температуру, плотность и давление, близкие к этим параметрам в критической точке. Наше рассмотрение ограничим однофазными системами при надкритических температурах. Какие же необычные макроскопические свойства здесь появляются? Вернемся к рис.1. На математическом языке критическая точка определяется как точка перегиба кривой, при приближении к которой первая и вторая производные стремятся к нулю ($\partial P/\partial \rho \rightarrow 0$ и $\partial^2 P/\partial \rho^2 \rightarrow 0$) и соответственно обратные производные — к бесконечности. Первое уравнение состояния, обеспечивающее подобное поведение производных, в форме $P = b\rho T/(1 - b\rho) - a\rho^2$ с константами $b = 1/3\rho_c$, $a = 9bT_c/8\rho_c$ (T — температура, ρ_c , T_c , b — параметры критической точки и константа конкретного вещества) предложил голландский физик Й.Д.Ван-дер-Ваальс, за что и был удостоен в 1910 г. Нобелевской премии по физике. При низких давлениях и высоких температурах уравнение Ван-дер-Ваальса сводится к виду $P = b\rho T$ и описывает обычные газы и жидкости.

Уравнение состояния определяет статические критические явления, не зависящие от движения субстанции. Например, все среды в земных условиях подвержены гидростатической сжимаемости: плотность в нижних слоях возрастает, поскольку верхние слои давят на нижние. В окологрической жидкости малейшие приращения давления вызывают большие изменения плотности, что следует из условия $\partial \rho/\partial P \rightarrow \infty$, и сжимаемость многократно увеличивается, превращаясь в гиперсжимаемость. Простой пример, основанный на экспе-

риментах Й.Штрауба (Технический университет, Мюнхен), показывает, что в ампуле высотой 20 мм с околкритической окисью азота N_2O (температура на 0.03 К превосходит критическую) изменение плотности под действием силы тяжести составляет 10%. В земной атмосфере такое снижение плотности происходит на высоте одного километра, иначе говоря, вблизи критической точки сжимаемость в 50 тыс. раз больше!

Появляется также и гиперчувствительность к температурному фактору, поскольку выполняется другое предельное условие: $-\partial\rho/\partial T \rightarrow \infty$, из которого следует, что к бесконечности стремится коэффициент теплового расширения χ . Если воздух нагреть на один градус, его объем возрастет всего на 0.3%. А если увеличить на один градус температуру среды с околкритическими параметрами, то ее объем может удвоиться! На рис.2,а показана величина χ , полученная методом компьютерного моделирования, которая, как видно, резко возрастает при приближении к критической точке; пик на графике соответствует параметрам, наиболее близким к критическим.

Выделяют также динамические критические явления, которые обнаруживаются при перемещении массы и переносе тепла. В частности, релаксация неоднородностей температуры, обусловленная механизмом теплопроводности, происходит крайне медленно. Например, если в околкритической жидкости изменить температуру хотя бы на сотые доли градуса, то на установление прежних условий потребуются много часов, а может, и несколько суток. Скорость выравнивания температуры характеризуется коэффициентом тепловой диффузии D : чем меньше коэффициент, тем медленнее происходит релаксация. На рис.2,б показана величина D , которая, как видно, в окрестности критической точки имеет провал почти до нуля.

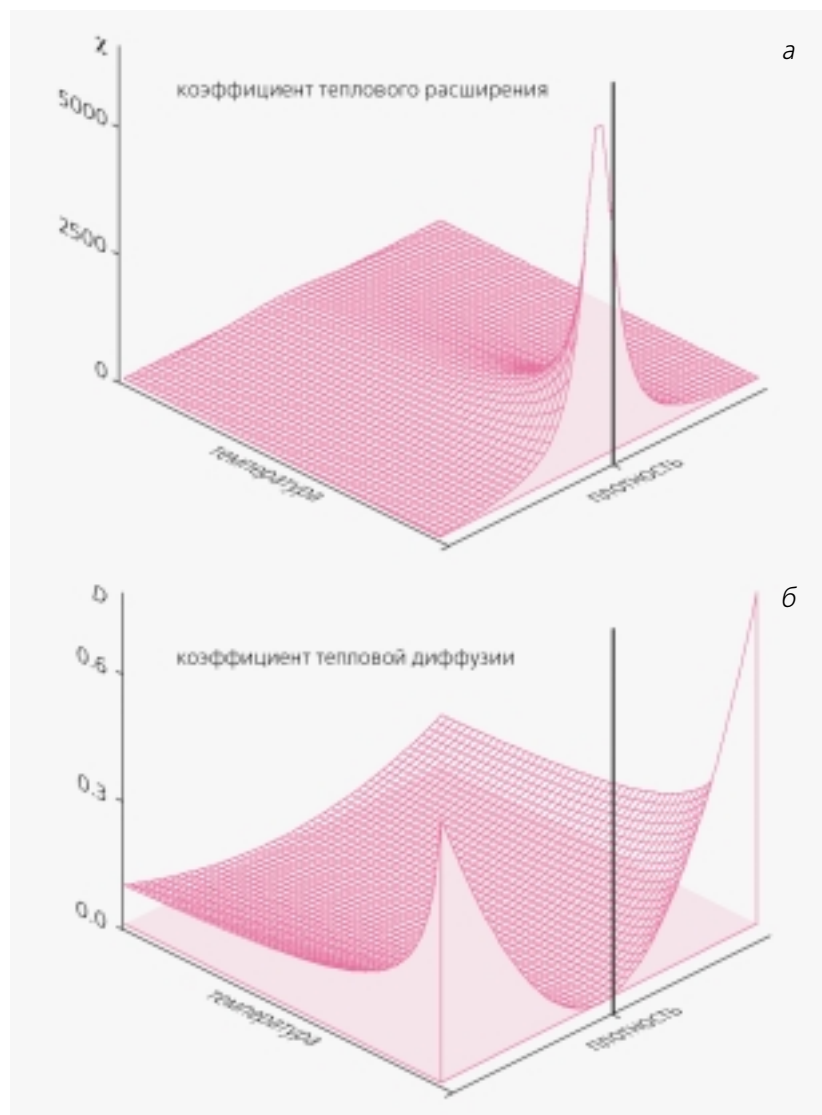


Рис.2. Расчетные зависимости термических коэффициентов от температуры и плотности. Вблизи критической точки коэффициент теплового расширения χ стремится к бесконечности (а), а коэффициент тепловой диффузии D — к нулю (б). Критические значения плотности и температуры отмечены вертикальной линией.

При исследовании околкритического состояния среды ее течению уделяется значительно меньше внимания, чем физическим свойствам, хотя реальная жидкая субстанция не может быть неподвижной. Гравитационные силы, неоднородности температуры, перепады давления — все вызывает перемещение отдельных частей относительно друг друга. Однако при описании динамики вблизи кри-

тической точки традиционные гидродинамические модели, ориентированные на обычные среды, оказываются несостоятельными. Желание продвинуться дальше в этой области дало толчок к объединению двух направлений — в настоящее время формируются представления о механике жидкостей, находящихся в околкритическом состоянии. Сначала коснемся ее экспериментальных основ.

Конвекция в космосе

Несмотря на то что опыты с веществами при околокритических параметрах проводились на протяжении десятилетий, и в настоящее время, при значительном усовершенствовании экспериментальной техники, такие системы остаются крепким орешком.

Трудности связаны прежде всего с тем, что околокритические жидкости обладают высокой гравитационной чувствительностью: демонстрируют сильный отклик на действие силы тяжести. Это проявляется, во-первых, в наличии конвективных течений, которые развиваются в неравномерно нагретой среде благодаря силе Архимеда и становятся особенно интенсивными вблизи критической точки. Во-вторых, — в ярко выраженном гидростатическом эффекте, что усложняет определение плотности в произвольной точке рабочего объема. Поэтому в земных условиях к критической точке приблизиться трудно.

Решение возникшей проблемы напрашивается само собой: нужно уменьшить действие силы тяжести и проводить опыты в условиях космического полета. И хотя в этом состоянии нет полной невесомости, действующие на жидкость силы становятся на несколько порядков мень-

ше, чем на Земле. Поэтому начиная с 80-х годов прошлого века был поставлен ряд экспериментов по изучению теплофизических свойств и процессов переноса вблизи критической точки на космических станциях «Спейс-Шаттл» и «Мир» [3]. Получены обширные результаты, и многие из последних данных еще не полностью проанализированы, поэтому остановимся на наиболее интересных*.

История одного хорошо известного теперь эффекта началась с парадокса. После кратковременного выделения тепла на нагревательном термисторе внутри ячейки с околокритической жидкостью было обнаружено, что ее температура начинает быстро повышаться (рис.3), причем рост температуры происходит за секунды — намного быстрее, чем в обычных средах. Но как такое может быть? Мы ведь знаем, что неоднородности температуры в околокритических условиях релаксируют очень медленно. Очевидно, заработал неизвестный ранее механизм прогрева. Новое явление, которое назвали поршневым эффектом (piston effect), связано, как оказалось, с механизмом расширения — сжатия и заключается в следующем. Сначала прогревается уз-

кий слой жидкости, прилегающий к источнику (пограничный слой); при нагревании он сильно расширяется, намного сильнее, чем в обычных средах, из-за высокой чувствительности к изменению температуры. Расширившийся пограничный слой, как поршень, толкает внутренние, еще холодные слои, которые сжимаются и при сжатии нагреваются. Эффект был сначала объяснен теоретически на простой модели [4], а затем исследователи Франции, Японии и России воспроизвели его при компьютерном моделировании [5—7], подтвердив эту интерпретацию. Обнаруженный механизм прогрева очень важен, поскольку работает каждый раз, когда возникают градиенты давления, вызванные изменениями температуры (например, из-за подвода тепла); во многих случаях он выравнивает заметные перепады температуры, оставляя лишь малые ее неоднородности.

Другая особенность околокритических жидкостей — их поразительная подвижность, которая обусловлена высокой гравитационной чувствительностью. В экспериментах при космическом полете выяснилось, что даже остаточные неоднородности теплового поля могут инициировать весьма заметные конвективные движения. Согласно теории подобия, два



Рис.3. Упрощенная схема эксперимента по исследованию переноса тепла (а). Рост температуры по радиусу вдоль линии А—В в околокритической жидкости происходит очень быстро (б), намного быстрее, чем в обычной среде (в).

течения аналогичны, если характеризуются одинаковыми численными значениями критериев подобия. Основным критерием подобия, определяющим интенсивность конвекции, является число Рэлея Ra_c (индекс «с» указывает, что это экспериментальная величина). Оно вычисляется по выражению $Ra_c = \Theta \chi g l^3 / (D\nu)$, которое включает характерный перепад температуры Θ , ускорение силы тяжести g , размер области l , коэффициент кинематической вязкости ν — величины, не зависящие от близости к критической точке. Однако входящие сюда коэффициенты теплового расширения χ и тепловой диффузии D демонстрируют критическое поведение, причем первый из них стремится к бесконечности, второй — к нулю (рис.2). В результате величина Ra_c стремится к бесконечности по мере приближения к критической точке, а это значит, что при околоритических параметрах происходит сильная интенсификация течения.

На рис.4 показаны зависимости Ra_c от параметра надкритичности $T-T_c$ для оксида углерода и шестифтористой серы, полученные в экспериментах на станции «Мир» в 1995 г. [8]. И хотя сила тяжести в орбитальном полете мала (она составляет 10^{-3} – 10^{-4} от земной гравитации), тем не менее, при довольно близком подходе к критической точке ($T-T_c < 1$ К) число Рэлея увеличивается на порядки и достигает значений 10^4 – 10^5 , характеризующих развитые конвективные течения. Получается, что даже переход от земных условий к микрогравитации не может гарантировать подавление конвекции в тех случаях, когда она нежелательна, и всякий раз при подготовке экспериментов следует оценивать ее возможное влияние.

В подтверждение роли гравитационной конвекции в космосе на рис.5 представлены фотографии области оптической неоднородности для различных мо-

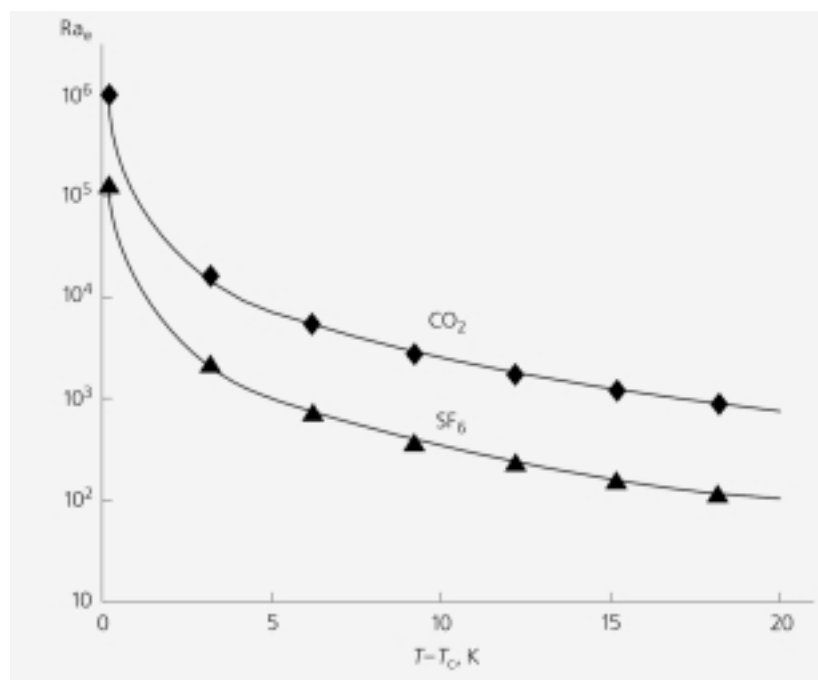


Рис.4. Зависимость числа Рэлея Ra_c от параметра надкритичности $T-T_c$ в экспериментах с CO_2 и SF_6 на борту орбитального комплекса «Мир» [8]. При приближении к критической точке значения Ra_c резко возрастают.

ментов времени одного из экспериментов [8], где рабочее вещество с начальной надкритичностью $T-T_c < 0.121$ К заполняло ячейку с прозрачными боковыми стенками. Внутри ячейки находились два термистора на расстояниях, верхний термистор служил источником нагрева. После подачи кратковременного импульса около нагревателя формировался тепловой пограничный слой, порождавший поршневой эффект и нагрев внутренней массы. Однако после реализации поршневого эффекта тепловое пятно вокруг термистора, обусловленное остаточной неоднородностью температуры, существовало довольно долго, и при отсутствии конвективного смещения оно медленно расширялось бы строго симметрично относительно центральной вертикали. Через 6 с симметрия еще наблюдалась (рис.5,а), но со временем она нарушалась (рис.5,б), и через 65 с тепловое пятно уже оказывалось вблизи стенки ячейки (рис.5,в), что яв-

но указывает на вмешательство конвекции.

В условиях космического полета имеются различные источники микрогравитационной силы, в которой обычно выделяют квазистатическую и быстроменяющуюся (высокочастотную) составляющие и анализируют влияние каждой. Поскольку переход от земной тяжести к реальной невесомости не позволяет полностью устранить конвективное движение в околоритических жидкостях, необходимы строгий контроль за существующим микрогравитационным фоном и постановка прецизионных физических экспериментов, включая разработку новой аппаратуры для поддержания тепловых режимов и вывода оптической диагностики. Но «неустраняемый» процесс можно использовать «во благо», например, в высокочувствительном приборе по определению отдельных компонент микрогравитации, где интенсивность конвекции была бы

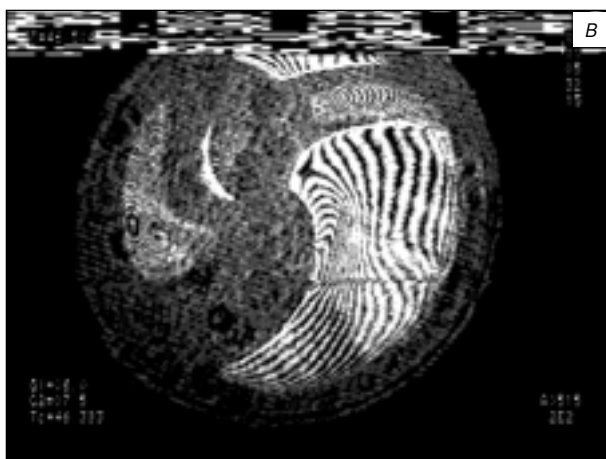


Рис.5. Области оптической неоднородности в SF_6 с начальным параметром надкритичности $T - T_c = 0.121$ К через 6 (а), 23 (б), 65 (в) секунд после выделения кратковременного теплового импульса верхним термистором [8]. Благодаря конвективному смещению теплового пятна картина теряет симметрию.

индикатором действия сил. И конечно, эксперименты в невесомости, как и во многих других случаях, служат катализатором широких исследований по околоскритической гидродинамике, стимулируя развитие теоретических методов.

Подобие и моделирование

Первые работы по математическому моделированию процессов нестационарного течения и переноса тепла с использованием уравнения состояния околоскритической жидкости, которые дали объяснение некоторым космическим экспериментам, были выполнены на основе простых одномерных моделей в начале 90-х годов [9]. Им предшествовали работы по моделированию околоскритическо-

го теплообмена на основе стационарных уравнений в приближении пограничного слоя [10, 11], когда особые свойства среды задавались подбором термодинамических коэффициентов. Вначале модели еще не были достаточно полными, чтобы охватить многочисленные особенности околоскритических течений. Так, стационарные модели исключают многие важные эффекты, возникающие при меняющихся со временем условиях, а нестационарные, но одномерные — не описывают пространственные конвективные течения, которые развиваются в замкнутых объемах. К настоящему времени сформировалась целая последовательность усложняющихся моделей, имеющая иерархическую структуру — от моделей конвекции несжимаемой жидкости с учетом разности плотностей только в архи-

медовой силе (модель Обербека—Буссинеска, наиболее распространенная для обычных жидких и газовых сред) до полных гидродинамических моделей, включающих нестационарные уравнения динамики и теплопереноса с учетом сжимаемости и переменных теплофизических свойств среды и уравнение состояния, подразумевающее наличие критической точки.

Так рождается новое направление в механике сплошных сред — гидродинамика околоскритических жидкостей. Для ряда задач дано их математическое описание: выбраны базовые уравнения и определены способы их решения, получены первые результаты. Но полностью сформировавшимся это направление считать еще нельзя — модели требуют уточнений, особенно в малой окрестности критической точки, где пока не до-

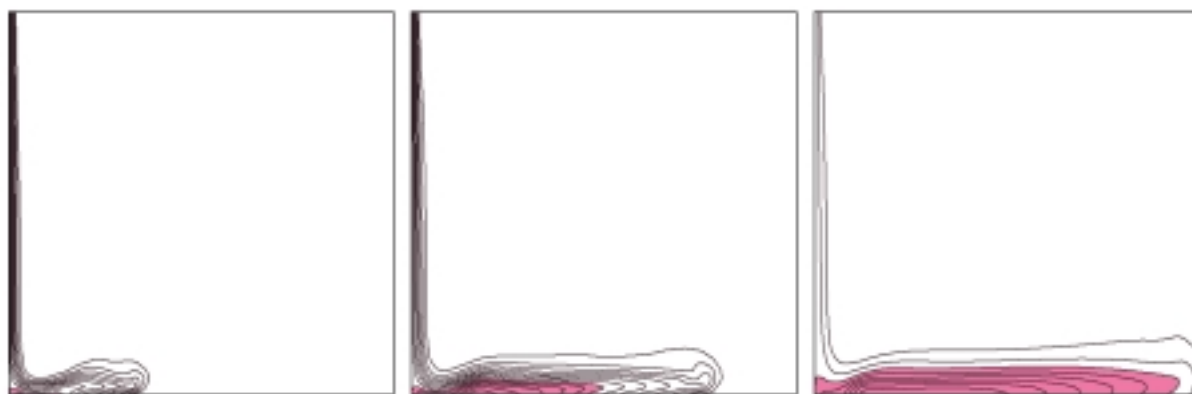


Рис.6. Изотермы в различные моменты времени при уменьшении температуры левой границы на 0.01 К, начальный параметр надкритичности $T-T_c=1$ К. Формируется опускающаяся конвективная струя, внутри которой образуется область переохлаждения (выделена цветом) с температурой ниже температуры охлажденной поверхности.

стигнуто достаточного соответствия с экспериментом и необходимы более полные данные о физических свойствах различных веществ, да и сами границы их применимости очерчены недостаточно ясно. Поэтому важную роль играет сочетание экспериментальных исследований и моделирования как в земных, так и космических условиях, что и было реализовано в работах по конвекции на орбитальной станции «Мир» [12].

Чтобы продемонстрировать возможности моделирования, покажем, какие интересные и специфические эффекты оно позволяет обнаружить. Моделируется динамика и теплоперенос в околоскритической жидкости, которая заполняет закрытый сосуд в земных условиях и в начальный момент неподвижна [13]. Затем одна из стенок сосуда (левая) немного охлаждается — всего на сотую долю градуса, и этого оказывается достаточно, чтобы возникло конвективное движение. Жидкость около стенки, став чуть-чуть холоднее и заметно тяжелее, начинает опускаться — образуется движущаяся вниз конвективная струя. На рис.6 показано, как эта струя распространяется со временем. Пока ничего неожиданного нет, конвективные струи возникают

и в привычных нам жидкостях, достаточно понаблюдать за течениями около стенок в стакане с горячим чаем. Необычно то, что струя переохлаждается, т.е. в некоторой области температура оказывается ниже температуры охлажденной границы. В стандартной ситуации ничего подобного не происходит, разве может температура остывающего чая стать меньше комнатной? А в околоскритических может, причем переохлажденная область со временем увеличивается в размерах.

При исследовании особенностей критического поведения возникает и другой вопрос, на который именно компьютерное моделирование способно дать однозначный ответ. Можно ли при каких-либо условиях обнаружить подобие в динамике околоскритических и обычных жидкостей? Оказалось, можно. Специфические для первых явления (поршневой эффект и переохлаждение в струе) наблюдаются в нестационарных условиях, т.е. при изменении состояния системы во времени и пространстве. Если же движение стационарно, можно подобрать параметры, при которых будет наблюдаться некоторое подобие в конвекции двух сред.

Рассмотрим конвективное движение в области с фиксиро-

ванной разницей температур на боковых границах. Если внешние условия не меняются, через некоторый промежуток времени устанавливается стационарный режим (рис.7). При моделировании динамики околоскритической жидкости, показанной на рис.7,а, в базовой системе уравнений использовалось модельное число Рэлея $Ra=10^3$, поэтому для обычной жидкости были выбраны те же величины всех критериев подобия, включая данное значение Ra . Результат представлен на рис.7,б и, как видно, не имеет ничего общего с предыдущей картиной. В первом случае около боковых границ формируются вторичные вихревые потоки, так называемые кошкины глаза, а во втором наблюдается круговое движение без каких-то особенностей. Неужели теория подобия оказалась несостоятельной? Нет, просто ее применение не столь очевидно и требует дополнительного обоснования.

В математической модели наличие критической точки задается уравнением состояния определенного вида, которое подразумевает критическое изменение физических свойств среды (например, стремление к бесконечности коэффициента теплового расширения), число же Рэлея, входящее как пара-

МЕХАНИКА

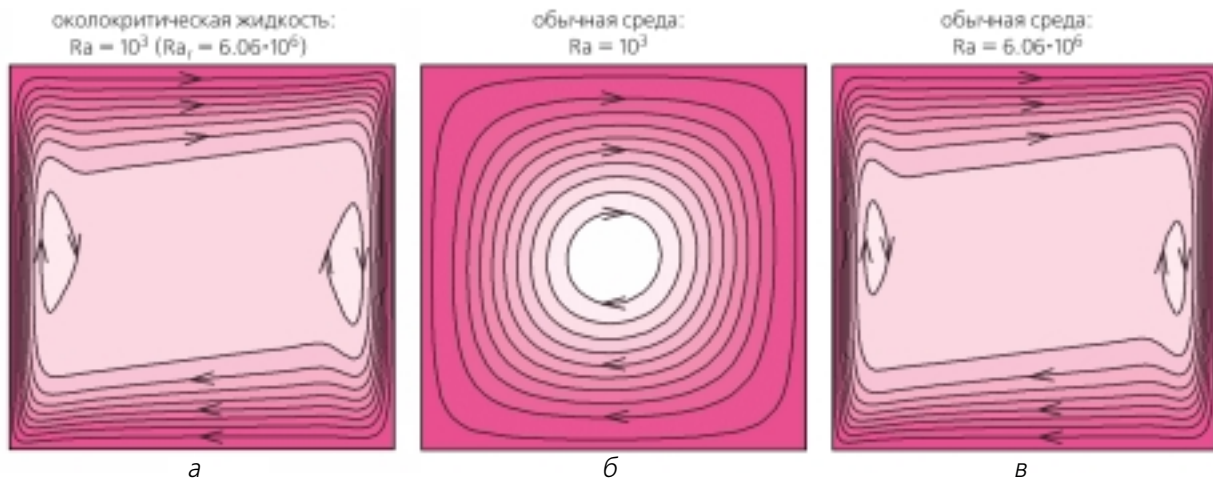


Рис.7. Траектории движения в стационарном режиме при фиксированной разнице температур на боковых границах в 0.1 К (левая граница теплее), начальный параметр надкритичности $T - T_c = 1$ К. Чтобы получить подобие течений в околокритической и обычной жидкостях, нужно согласовывать не модельные, а реальные критерии подобия.

метр в базовую систему уравнений, строится по характеристикам вещества вдали от критической точки и критичности состояния не чувствует. Поэтому, хотя система уравнений включает модельную величину Ra , реальное число Рэлея (обозначим его Ra_r) оказывается больше на коэффициент, который определяется из уравнения состояния. Мы использовали уравнение состояния Ван-дер-Ваальса и получили следующее соотношение между Ra_r и Ra , [7]:

$$Ra_r = \frac{2}{3} \varepsilon^{-1} \left(\frac{1}{\gamma} + \frac{\gamma-1}{\gamma} \cdot \frac{1+\varepsilon}{\varepsilon} \right) \times \frac{1}{1+\Delta\varepsilon^{-\varphi}} Ra. \quad (*)$$

В этом выражении $\varepsilon = (T - T_c) / T_c$ — безразмерный параметр надкритичности, γ , Δ , φ — константы вещества ($\varphi < 1$). Легко проверить, что при приближении к критической точке ($\varepsilon \rightarrow 0$) значение Ra_r стремится к бесконечности, что и должно быть в соответствии с приведенным в предыдущем разделе анализом экспериментального числа Рэлея.

Теперь становится понятным, как нужно применять теорию подобия в данном случае. Если уравнения околокритической жидкости включают значе-

ние Ra , а по сути дают решение для Ra_r благодаря задающему критичность коэффициенту, то, моделируя динамику обычной жидкости, нужно подставлять в исходные уравнения величину, равную Ra_r . Тогда, решая базовые уравнения с разными модельными параметрами, мы получим конвективные течения, характеризующиеся в обоих случаях одним и тем же «истинным» числом Ra_r . Найденные таким образом решения и следует сравнивать на предмет подобия. Для рассматриваемой задачи выражение (*) дает $Ra_r = 6.06 \cdot 10^6$, результаты моделирования обычной жидкости с $Ra = 6.06 \cdot 10^6$ показаны на рис.7,в. Теперь поля течения трудно отличить (рис.7,а и 7,в) и, следовательно, можно говорить об определенном подобии стационарной конвекции в двух исследуемых средах с равными друг другу реальными числами Рэлея. Моделирование показало, что совпадают также поля температуры, но поля плотности резко отличаются из-за гиперсжимаемости вблизи критической точки, т.е. подобие все-таки неполное.

Зависимости типа (*) между модельными и реальными величинами определены и для дру-

гих критериев подобия. Мы называем их калибровочными соотношениями, поскольку при их помощи можно сравнивать характеристики течения и теплопереноса в околокритических жидкостях с аналогичными характеристиками в обычных хорошо изученных средах, т.е. калибровать первые по вторым. В настоящее время границы применимости закона калибровки уточняются.

В подобных соотношениях сжатие среды под действием собственного веса явно не учитывается, хотя сильный при околокритических параметрах гидростатический эффект может заметно влиять на некоторые типы течений. В связи с этим интересно, как развивается конвекция в горизонтальном слое при подогреве нижней границы (конвекция Рэлея—Бенара) и каковы критерии устойчивости, определяющие условия возникновения течения в первоначально неподвижной среде. Около границы-нагревателя формируется теплая разреженная зона, которая под действием выталкивающей силы стремится подняться вверх. Однако, если полученное количество тепла недостаточно, возмущения у границы не развиваются,

и только начиная с некоторой пороговой величины возникает конвективное движение. Если среда несжимаема, то подавление тепловых возмущений объясняется диффузией тепла в более холодные зоны и определяется критерием Рэлея. Благодаря сжимаемости работает дополнительный механизм устойчивости и связанный с ним критерий Шварцшильда: тепловые возмущения не развиваются, если расширения нагретых участков не достаточно, чтобы возникающее уменьшение плотности превысило бы разрежение, обусловленное гидростатическим эффектом.

Критерий Шварцшильда обычно не используется при исследовании обычных газов в лабораторных условиях, так как при соответствующих пространственных масштабах эффекты сжимаемости очень малы. Этот критерий был предложен К.Шварцшильдом, немецким астрономом, при изучении крупных объектов, а именно при наблюдении конвективной структуры на поверхности Солнца в 1906 г. Однако роль гидростатического эффекта становится значительной даже в небольших объемах околокритической жидкости в силу ее гиперсжимаемости, поэтому началом конвекции вблизи критической точки управляют два критерия — Рэлея и Шварцшильда. Совместное влияние этих критериев на порог устойчивости было установлено в 1968 г. при численном модели-

ровании обычного сжимаемого газа [14], позднее получены условия возникновения конвекции при околокритических параметрах аналитически (см. [15] и цитируемую там литературу) и экспериментально в прецизионных опытах на жидком гелии [16]. На современном этапе, с использованием накопленных данных, ведутся работы по калибровке околокритической конвекции Рэлея—Бенара и расширению калибровочных соотношений на течения, «чувствующие» стратификацию.

Калибровочные соотношения имеют и другой смысл — они служат необходимым звеном в соединении теории с практикой. Если нужно моделировать динамический процесс, наблюдающийся экспериментально, то не модельные (Ra и др.), а реальные (Ra_c и др.) критерии подобия должны совпадать с соответствующими величинами в опыте (Ra_c и др.). Теория подобия, дополненная идеей калибровки, позволяет эффективно комбинировать экспериментальные методы исследования с методами численного моделирования.

Новые технологии и перспективы

Читатель вправе задать вопрос: а насколько оправданы затраты на столь экзотические исследования, имеются ли у последних перспективы практического применения? До недавне-

го времени проблемы динамики и процессов переноса вблизи критической точки представляли практический интерес лишь в отдельных случаях, касающихся приложений в теплотехнике — при течениях в теплообменных аппаратах, при хранении сжиженных газов и др.

Тем не менее перспективы более широкого промышленного внедрения уже видны. И в первую очередь это новые химические технологии, использующие около- и сверхкритические жидкости в качестве реактивных сред. Вблизи критической точки меняются некоторые свойства, влияющие на протекание химических реакций, например, у воды уменьшается диэлектрическая проницаемость почти в 15 раз. Поэтому, используя околокритические среды в качестве растворителя, можно синтезировать новые материалы, в частности микрочастицы и нанокристаллы с заданными средним размером, формой и пористостью.

Другой пример — метод сверхкритического водного окисления, направленный на переработку разнообразных токсичных веществ и очистку окружающей среды, в котором используется вода в сверхкритическом состоянии*. Процесс, схема которого приведена на рис.8, состоит в обработке смесей вредных соединений водой при температурах и давлениях, превышающих критические

* См. в Интернете (сайт ecology.iem.ac.ru).



Рис.8. Схема процесса сверхкритического водного окисления.

значения, и в получении в результате химических реакций экологически безвредных веществ. Такой метод по сравнению со стандартными технологиями сжигания имеет ряд преимуществ и может претендовать на наиболее высокую экологическую и экономическую эффективность.

Химические превращения при сверхкритических параметрах имеют перспективы использования и в ракетно-космической технике. Речь идет о горении сверхкритического топлива в камере сгорания и, как следствие, интенсификации процессов переноса, что может повысить удельную тягу двигателя. В настоящее время характеристики струйного течения и перемешивания при высоких давлениях и температурах начинают активно исследоваться.

Жидкости с параметрами из сверхкритической области используются также при экстракции твердых веществ, главным образом в пищевой промыш-

ленности, например при вытяжке кофеина из кофе, и в фитотерапии. Среда приводится в сверхкритическое состояние и при разделении смесей, в частности при химической переработке и ректификации нефти. Последние данные о подобных химических технологиях публикуются в международном научном издании «Journal of Supercritical Fluids»* и др.

Можно ожидать, что со временем список технологических процессов, использующих критические явления, значительно расширится, будут эксплуатироваться не только особые физические свойства среды, но и возникающие из-за них новые гидродинамические эффекты (как, например, описанные выше поршневой эффект и эффект переохлаждения в конвективной струе). При этом систематическое моделирование тепло- и массопереноса позволит со-

* Электронную версию см в Интернете (сайт www.sciencedirect.com/science/journal/08968446).

кратить сроки и стоимость отработки технологий и добиться их оптимизации. Сейчас на повестке дня — изучение более интенсивных (переходных и турбулентных) режимов, характерных для конвекции при земной силе тяжести, уточнение математических моделей с включением уравнений состояния различных веществ, определение условий для более близкого подхода к критической точке, подготовка дальнейших экспериментов для проведения на Международной космической станции. Околоскритическая гидродинамика, выйдя за пределы узких научных интересов, начинает движение по обычному пути — от экспериментального и теоретического исследования до промышленного внедрения. ■

Исследования, рассматриваемые авторами, поддерживались в течение ряда лет РФФИ. Проекты 97-01-00124, 00-01-00401 и 03-01-00682.

Литература

1. Анисимов М.А. Критические явления в жидкостях и жидких кристаллах. М., 1987.
2. Горбатый Ю.Е., Калинин А.Г., Бондаренко Г.В. Строение жидкости и надкритическое состояние // Природа. 1997. №8. С.78—89.
3. Moldover M.R. // Progress in Astronautics and Aeronautics / Eds. G.A.Hazelrigg, J.M. Reynolds. 1986. V.108. P.57—79.
4. Onuki A., Hao H., Ferrell R.A. // Phys. Rev. A. 1990. V.41. №4. P.2256—2259.
5. Zappoli B., Durand-Daubin A. // Phys. Fluids. 1994. V.6. №5. P.1929—1936.
6. Azuma H., Yoshihara S., Onishi M. et al. // Int. J. Heat and Mass Transfer. 1998. V.42. №4. P.771—774.
7. Полежаев В.И., Соболева Е.Б. // Изв. РАН. МЖГ. 2001. №3. С.143—154.
8. Зюзгин А.В., Иванов А.И., Полежаев В.И. и др. // Космич. исслед. 2001. Т.39. №2. С.188—200.
9. Voukari H., Shaumeier J.N., Briggs M.E., Gammon R.W. // Phys. Rev. A. 1990. V.41. №4. P.2260—2263.
10. Попов В.Н., Яньков Г.Г. // Теплофизика высоких температур. 1982. Т.20. №6. С.1110—1118.
11. Петухов Б.С. Теплообмен в движущейся однофазной среде. М., 1993.
12. Polezhaev V.I., Emelianov V.M., Gorbunov A.A. // J. Jpn. Soc. Microgr. Appl. 1998. V.15 (Suppl. 2). P.123—129.
13. Полежаев В.И., Соболева Е.Б. // Изв. РАН. МЖГ. 2002. №1. С.81—93.
14. Полежаев В.И. // Известия РАН. МЖГ. 1968. №5. С.124—129.
15. Carlès P., Ugurtas B. // Physica D. 1999. V.126. P.69—82.
16. Kogan A.B., Meyer H. // Phys. Rev. E. 2001. V.63. 056310.