

НАДКРИТИЧЕСКИЕ КОНВЕКТИВНЫЕ ДВИЖЕНИЯ В КУБИЧЕСКОЙ ПОЛОСТИ

В. Д. ЗИМИН, А. И. КЕТОВ

(Пермь)

Сообщаются результаты экспериментального исследования конвективной неустойчивости воздуха в кубической полости высотой 4 см, на горизонтальных границах которой создавалось однородное распределение температуры, а на вертикальных — температура изменялась линейно от максимального значения на нижней горизонтальной границе до минимального на верхней. Внутри полости размещались дифференциальные термпары, по показаниям которых регистрировалось возникновение конвекции, определялась форма конвективного движения и его интенсивность. Исследовано влияние малых угловых отклонений модели от положения, при котором в полости возможно механическое равновесие.

Конвективные течения, возникающие в результате кризиса механического равновесия жидкости в подогреваемой снизу замкнутой полости, обладают рядом интересных особенностей, связанных с возможностью существования различных типов движений при одних и тех же внешних условиях. Дискретность спектра критических движений в замкнутой полости существенно облегчает выяснение факторов, определяющих ту или иную структуру движения в надкритической области.

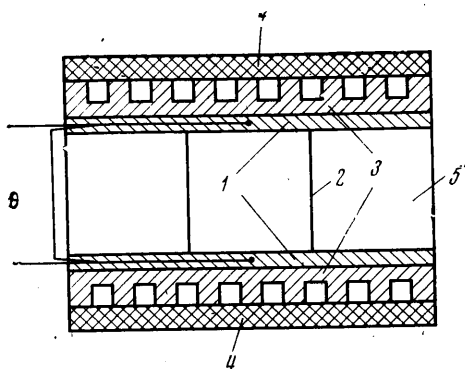
Конвективная неустойчивость в кубической полости исследовалась теоретически в [1] и экспериментально в [2, 3]. В [1] методом Галеркина найдены числа Рэлея и критические движения, соответствующие трем нижним уровням неустойчивости. Рассмотрены два предельных случая: идеально теплопроводных и теплоизолированных границ. В обоих случаях температурные возмущения не проникают в окружающий полость массив, что существенно упрощает решение задачи.

Эксперименты [2, 3] выполнены с дистиллированной водой, заполняющей кубическую полость в прямоугольном плексигласовом блоке, на границах которого задавалась постоянная разность температур. Отношение теплопроводностей жидкости и массива составляло 3.26. В надкритической области наблюдались конвективные движения, обладающие симметрией, которая рассматривается в теории. Из-за отсутствия расчетов для случая, когда тепловые возмущения проникают в массив, количественное сопоставление результатов не проводилось.

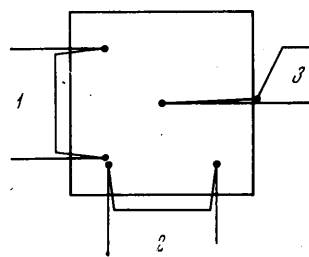
Конструкция модели в данной работе обеспечивала более точное выполнение условий механического равновесия жидкости; граничные условия для возмущений температуры и скорости соответствовали рассматриваемому в [1] случаю твердых идеально теплопроводных границ.

Необходимым условием механического равновесия неравномерно нагретой жидкости является постоянство и вертикальность градиента температуры по всему объему жидкости [1]. Для случая кубической полости это означает, что температура боковых стенок полости должна изменяться с высотой по линейному закону, достигая максимального значения на нижней горизонтальной границе и минимального на верхней. Распределение температуры на горизонтальных гранях полости должно быть однородным.

Конструкция модели схематически изображена на фиг. 1. Кубическая полость ребром 40 мм была образована двумя медными пластинами 1 толщиной 5 мм и припаянными к ним боковыми стенками 2 из листовой меди толщиной 1 мм. Разность температур между горизонтальными поверхностями полости поддерживалась с помощью двух теплообменников, состоящих из медных пластин 3 толщиной 15 мм и теплоизолирующих крышек 4. Пластины теплообменников имели каналы, по которым прокачивалась вода от ультрагрмотостатов У-10. Для обеспечения хорошего теплового контакта



Фиг. 1



Фиг. 2

между теплообменниками и пластинами 1 помещался тонкий слой графитовой пасты.

Однородное распределение температуры на горизонтальных гранях полости обеспечивалось благодаря массивности и высокой теплопроводности теплообменников и пластин 1 и сравнительно малому потоку тепла вдоль боковых стенок модели. Толщина стенок была выбрана с учетом двух противоречивых требований. При слишком малой толщине стенок теплоотдача в окружающую среду существенно искажает линейное распределение температуры на вертикальных гранях полости, а при слишком большой — нарушается изотермичность горизонтальных границ. Для уменьшения теплоотдачи боковых стенок использовался пенопластовый блок 5.

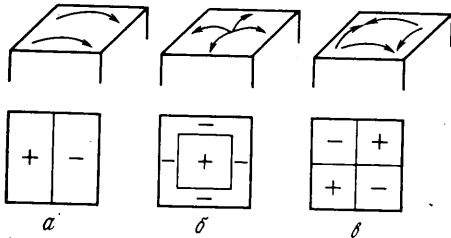
Модель устанавливалась на горизонтальную подставку, которую с помощью регулировочных винтов можно было наклонять в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Для индикации конвективного движения в среднем горизонтальном сечении полости были установлены три дифференциальных термпары. Расположение спаев показано на фиг. 2. По разностям температур, измеряемых этими термпарами, можно было судить о симметрии и интенсивности крупномасштабных конвективных движений.

Надкритические движения в кубической полости обладают симметрией критических возмущений [1-3]. На фиг. 3 стрелками показано направление движения жидкости в верхней части полости для трех критических возмущений, имеющих наиболее низкие уровни устойчивости. Знаком плюс обозначены области в среднем горизонтальном сечении, где температура выше, чем при равновесии, а знаком минус — ниже. Критические числа Рэлея R , соответствующие этим возмущениям по данным работы [1], равны 8224, 9184, 14032. В качестве единицы температуры принята разность температур между горизонтальными гранями полости, а за единицу дли-

ны — ребро куба. Первый уровень вырожден четырехкратно: критические возмущения отличаются друг от друга положением границы раздела восходящего и нисходящего потоков и направлением циркуляции жидкости. Второй и третий уровни вырождены двукратно.

Сравнивая расположение термопар и областей понижения и повышения температуры, можно убедиться, что всем критическим возмущениям соответствуют различные комбинации показаний термопар. Если же рассматривать линейные комбинации критических возмущений, то однозначность частично нарушается, однако в надкритической области таких движений в стационарных условиях не наблюдалось.



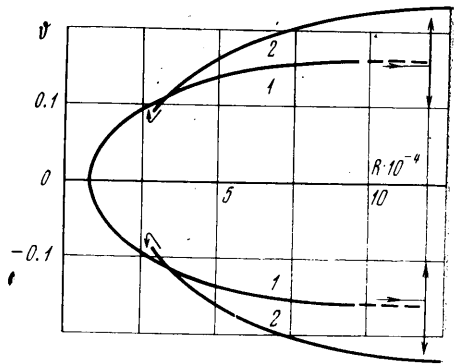
Фиг. 3

Опыты проводились в квазистационарных режимах. Скорость изменения вертикальной разности температур выбиралась такой, чтобы результаты контрольных опытов, выполненных в стационарных условиях, совпадали с квазистационарными. Показания термопар записывались на фотобумагу с помощью низкочастотного терморегистратора НТР-70.

При установке модели по точному уровню конвективное движение, возникающее в критической точке, всегда имеет определенное направление циркуляции жидкости, что говорит о снятии вырождения нижнего уровня неустойчивости в результате погрешностей, допущенных при изготовлении модели и отступлении от идеализированных условий подогрева. Однако, отклоняя модель на углы порядка нескольких десятков секунд, удавалось найти такое положение модели, при котором в критической точке все четыре движения, соответствующие нижнему уровню неустойчивости, появлялись примерно с одинаковой вероятностью. Такое положение модели считалось горизонтальным.

Результаты измерений представлялись в виде зависимости безразмерных разностей температуры ϑ в среднем горизонтальном сечении полости от числа Рэлея. На фиг. 4 приведена такая зависимость для случая подогрева точно снизу. Кривая 1 соответствует движению типа *a*. Для всех четырех движений этого типа отлична от нуля только одна из разностей температур ϑ_i , а именно: ϑ_2 для движения с положением границы раздела, показанного на фиг. 3, *a*, и ϑ_1 для движения с границей раздела, перпендикулярной другой паре граней куба. Величина ϑ одинакова для всех движений типа *a*, но отличается знаком для движений с противоположным направлением циркуляции. Фотозаписи размерных разностей температур представляют собой плавные кривые, поэтому на графиках, построенных по результатам обработки термограмм, экспериментальные точки не отмечены.

Критическое число Рэлея для движения типа *a*, определенное по данным опытов, оказалось равным $R_c = 7800 \pm 100$. Если учесть, что метод Галеркина всегда дает завышенное значение критических чисел, то согласие



Фиг. 4

экспериментального и расчетного числа Рэлея можно считать удовлетворительным.

В надкритической области безразмерная разность температур ϑ_1 (кривая 1 на фиг. 4), характеризующая интенсивность конвективного движения типа *a*, пропорциональна $(R - R_c)^{1/2}$, что находится в соответствии с законом Ландау [5]. Указанная пропорциональность наблюдается вплоть до $R = 5 \cdot 10^4$. При $R > 10^5$ возникают регулярные колебания разности температур ϑ_1 с периодом ~ 15 сек, которые продолжают неограниченно, если зафиксировать число Рэлея. Амплитуда колебаний достигала $0.5 \vartheta_1$. Заметного изменения частоты с ростом R не наблюдалось.

При дальнейшем увеличении числа Рэлея движение типа *a* переходит в одно из движений типа *b*. На фиг. 4 такие переходы показаны стрелками, а области колебаний — пунктиром. Кривая 2 соответствует движению типа *b*. В этом случае $\vartheta_1 = \vartheta_2$, а $\vartheta_3 = 0$, поэтому на графике приведена только зависимость $\vartheta_1(R)$. Движение типа *b* устойчиво вплоть до $R = 3.14 \cdot 10^5$.

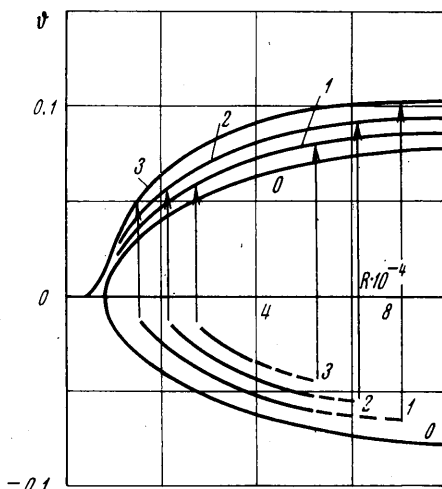
При уменьшении числа Рэлея наблюдается обратный переход от движения типа *b* к движению типа *a*, но уже при значительно меньших R , чем переход от *a* к *b*. Таким образом, в диапазоне чисел Рэлея от $3 \cdot 10^4$ до $12 \cdot 10^4$ могут устойчиво существовать оба типа движений. Такой же результат был получен ранее на водяной модели [2, 3].

Интерполяция кривой 2 на значение $\vartheta_1 = 0$ дает $R_b = 13\,200 \pm 500$, что на 6% ниже значения, вычисленного в [1]. Движение типа δ в опытах не наблюдалось, хотя критическое число Рэлея для этого движения меньше, чем для движения типа *b*. Возможность существования и устойчивость движения типа δ в данной работе не исследовались, так как конструкция модели не позволяла вносить контролируемые возмущения, обладающие симметрией движения типа δ , а спонтанного возникновения такого движения не происходило.

Как уже отмечалось выше, даже небольшие отклонения от идеализированных условий подогрева влияют на поведение надкритических движений. В данной работе исследовалось влияние малых угловых отклонений полости от положения равновесия. Этот вопрос исследовался ранее аналитически и путем численного решения уравнений конвекции в [6].

В наклонной полости конвективное движение наблюдается уже при сколь угодно малых числах Рэлея. Однако чувствительность используемого метода позволяла наблюдать движение только при $R < 0.5 R_c$. Это движение обладает симметрией первого критического возмущения. Циркуляция жидкости определяется направлением поворота: жидкость поднимается в приподнятой части полости и движется вниз в опущенной. Вблизи критического числа Рэлея наблюдается резкое возрастание интенсивности движения. Направление циркуляции жидкости остается при этом неизменным.

При квазистационарном изменении числа Рэлея наблюдается только



Фиг. 5

описанное выше основное движение. Однако в некотором диапазоне чисел Рэлея возможно существование метастабильного движения с противоположным направлением циркуляции жидкости [6]. В экспериментах такое движение удавалось возбуждать следующим образом. До включения подогрева полость наклонялась в противоположном необходимому направлении, после чего устанавливалась некоторая разность температур, а затем медленно, чтобы вязкая волна от стенок не изменила направления циркуляции, полость поворачивалась в нужном направлении на заданный угол. В определенном диапазоне чисел Рэлея, зависящем от угла наклона полости, движение с направлением циркуляции, противоположным основному, могло существовать неограниченно долго. Интенсивность такого движения меньше, чем основного.

Результаты опытов с наклонной полостью приведены на фиг. 5. Углы наклона модели в градусах проставлены над соответствующими кривыми. Положительные значения φ относятся к основному движению, а отрицательные — к метастабильному.

При квазистационарном уменьшении числа Рэлея сначала уменьшается интенсивность метастабильного движения, а затем происходит переход к основному движению. Граница раздела восходящего и нисходящего потоков поворачивается при этом вокруг вертикальной оси. Если же после возбуждения метастабильного движения медленно увеличивать число Рэлея, то вначале возникают регулярные конвективные колебания. Амплитуда колебаний с ростом числа Рэлея возрастает и при некотором R , зависящем от угла наклона, происходит переход к основному движению. Области стационарных колебаний на фиг. 5 отмечены пунктиром. Стрелками показаны переходы от метастабильного движения к основному. С ростом угла наклона область существования метастабильных движений уменьшалась и при углах наклона, превышающих 4° , возбудить метастабильное движение не удавалось.

Поступила 22 X 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Овчинников А. П. Конвективная устойчивость жидкости в кубической полости. Уч. зап. Пермск. ун-та, 1968, № 184.
2. Овчинников А. П. Конвективные возмущения жидкости в кубической полости. Уч. зап. Пермск. ун-та, 1968, № 184.
3. Овчинников А. П. Конвективная устойчивость жидкости в кубической полости. ПМТФ, 1967, № 3.
4. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., «Наука», 1972.
5. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1953.
6. Чернагинский В. И., Шлюмис М. И. Конвекция вблизи критических чисел Рэлея при почти вертикальном градиенте температуры. Изв. АН СССР, МЖГ, 1973, № 1.