

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ, ВЫЗВАННОГО ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛА

В. Г. КОЗЛОВ

(Пермь)

В наклонном жидком слое, заключенном между параллельными плоскостями с постоянной температурой и содержащем однородно-распределенные внутренние источники тепла, возникает конвективное движение, состоящее из трех потоков: восходящего в центре слоя и двух нисходящих вблизи стенок. Распределения скорости и температуры имеют вид

$$(0.1) \quad v_0(x) = \frac{g\beta q h^4}{120\nu} \left[1 - 6 \left(\frac{x}{h} \right)^2 + 5 \left(\frac{x}{h} \right)^4 \right] \cos \alpha$$
$$T_0(x) = \frac{qh^2}{2} \left[1 - \left(\frac{x}{h} \right)^2 \right], \quad q = \frac{Q}{\rho c_p \chi}$$

Здесь x — поперечная координата, Q — объемная плотность внутренних источников тепла, h — полуширина слоя, α — угол наклона слоя к вертикали, остальные обозначения обычные.

Устойчивость плоскопараллельного движения (0.1), определяемая безразмерными параметрами — числом Грасгофа $G = g\beta q h^5 / 2\nu^2$ и числом Прандтля $P = \nu / \chi$, изучалась только теоретически [1-3]. Предметом исследования было определение порога устойчивости прямолинейного движения относительно возмущений различного типа.

В настоящей работе экспериментально исследована устойчивость конвективного движения в наклонном плоском слое, вызванного однородно-распределенными в жидкости внутренними источниками тепла. Для вертикального слоя получена зависимость критического числа Грасгофа от числа Прандтля ($P = 5-30$). Для $P = 10$ изучен спектр надкритических движений. Исследована устойчивость движения жидкости в зависимости от угла наклона слоя к вертикали и найдены области развития возмущений типа бегущих тепловых волн и стационарных конвективных валов ($P = 10$).

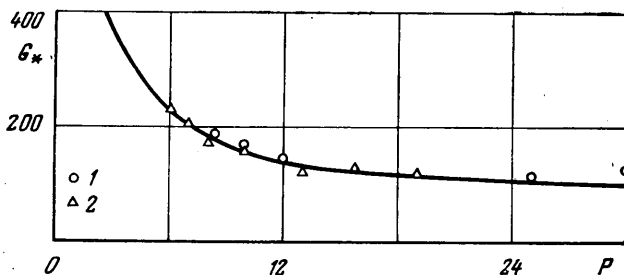
1. Аппаратура и методика. Слой жидкости (2%-ный водный или водоглицериновый раствор медного купороса) площадью 590×65 мм² и толщиной 10.0 ± 0.1 мм или 12.5 ± 0.1 мм был образован плоскостями двух медных теплообменников и зажатой между ними рамкой из плексигласа. Постоянная температура теплообменников поддерживалась прокачкой через каналы воды от струйных ультразвуковых насосов. На узких торцах слоя были установлены два медных электрода, при помощи которых осуществлялся разогрев жидкости током промышленной частоты. На рабочие поверхности теплообменников приклеивалась в целях электроизоляции лавсановая пленка толщиной 0.02 мм. Наблюдение за движением жидкости, в которой взвешивалась в небольших количествах алюминиевая пудра, осуществлялось через прозрачные плексигласовые боковые стенки слоя. Освещение проводилось через продольную щель длиной 400 мм и шириной 2 мм в средней части одного из теплообменников, заполненную прозрачной вставкой из плексигласа. Для уменьшения влияния температурных возмущений, вносимых этой вставкой, теплообменник со щелью в опытах с наклонным слоем располагался всегда вверх.

Температура восходящего конвективного потока относительно температуры теплообменников измерялась неуравновешенным термометром сопротивления. Датчиками служили платиновые нити длиной 60 мм и диаметром 0.02 мм. Одна из нитей натягивалась горизонтально в середине слоя параллельно теплообменникам на расстоянии 200 мм от нижнего электрода. В целях электроизоляции нить помещалась в стеклянный капилляр внешним диаметром 0.5 мм, заполненный трансформатор-

ным маслом. Датчик другого плеча моста термометра устанавливался в теплообменнике против первого датчика вблизи спая термопары, контролирующей температуру теплообменников. Разбаланс моста измерялся зеркальным гальванометром. Точность измерения разностей температур составляла 0.005°C .

Для регистрации возмущений движения жидкости и измерения фазовой скорости их распространения в слое на расстоянии 220 и 180 мм от нижнего электрода были установлены две одинаковые дифференциальные медно-константановые термопары с толщиной термоэлектродов 0.07 мм. Спаи каждой из термопар размещались на границах встречных потоков, рассчитанных по формуле (0.1), в плоскостях, перпендикулярных поверхностям теплообменников. Электроизоляция термоэлектродов осуществлялась тем же способом, что и датчиков термометра-сопротивления. Сигнал с термопар через усилитель постоянного тока подавался на самопишущий электронный потенциометр ЭПП-09. Точность измерения разности температур была не ниже 0.01°C .

2. Результаты эксперимента. Опыты с вертикальным слоем показали, что внутренний разогрев жидкости вызывает интенсивное конвективное движение с четным профилем скорости (0.1). С увеличением мощности внутренних источников скорость потоков возрастает и плоскопараллельное течение теряет устойчивость. Неустойчивость проявляется в развитии



Фиг. 1

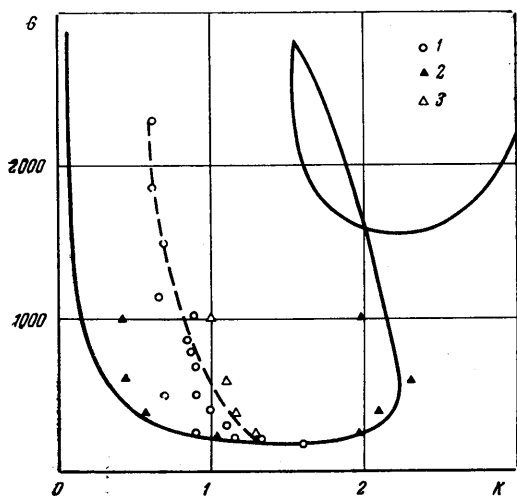
системы горизонтальных валов, вытянутых параллельно теплообменникам и расположенных в шахматном порядке на границах встречных потоков. Валы со значительной фазовой скоростью перемещаются сверху вниз, вызывая в каждой фиксированной точке слоя периодические колебания температуры, максимальные на границах встречных потоков. Следует отметить, что характерное время прогрева стеклянных капилляров с термопарами было всегда существенно меньше периода этих колебаний.

Критическое число Грасгофа G_* , определяемое по возникновению бегущих тепловых волн на границах потоков, существенно зависит от числа Прандтля P . На фиг. 1 точки 1 и 2 — результаты измерений в каналах толщиной 10 и 12.5 мм соответственно; сплошная линия — теоретическая кривая [2]. С увеличением P величина G_* падает, а фазовая скорость тепловой волны растет. Значения P от 5 до 8 достигались изменением средней температуры слоя. Эксперименты проводились на воде. В опытах при $P \geq 10$ использовались водоглицериновые смеси при 20°C .

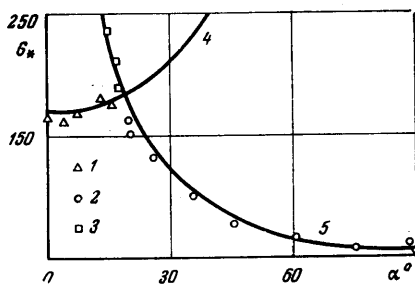
Как видно из графика, экспериментальные значения G_* хорошо согласуются с теоретическими на участке $P=5 \div 20$. При $P > 20$ экспериментальные точки лежат выше теоретической кривой. Это вызвано, по-видимому, конечной длиной слоя. Как известно [4], в каналах конечных размеров конвективное течение приводит к перегреву верхней части слоя и возникновению продольного градиента температуры, что значительно повышает устойчивость плоскопараллельных течений. Продольный перепад температур в слое растет с увеличением P и в условиях обсуждаемых экспериментов при $P > 20$ вызывает существенное повышение устойчивости плоскопараллельной конвекции.

Судя по показаниям дифференциальных термопар, пробегающие через фиксированную точку слоя возмущения (валы) не одинаковы по длине и интенсивности. При малой надкритичности наблюдается модуляция измеряемых термопарой температурных колебаний: длина валов, пробегающих мимо термопары, периодически изменяется, одновременно периодически

меняется интенсивность тепловой волны. Глубина и период модуляции при заданной надкритичности остаются практически постоянными. С ростом G период модуляции падает и



Фиг. 2



Фиг. 3

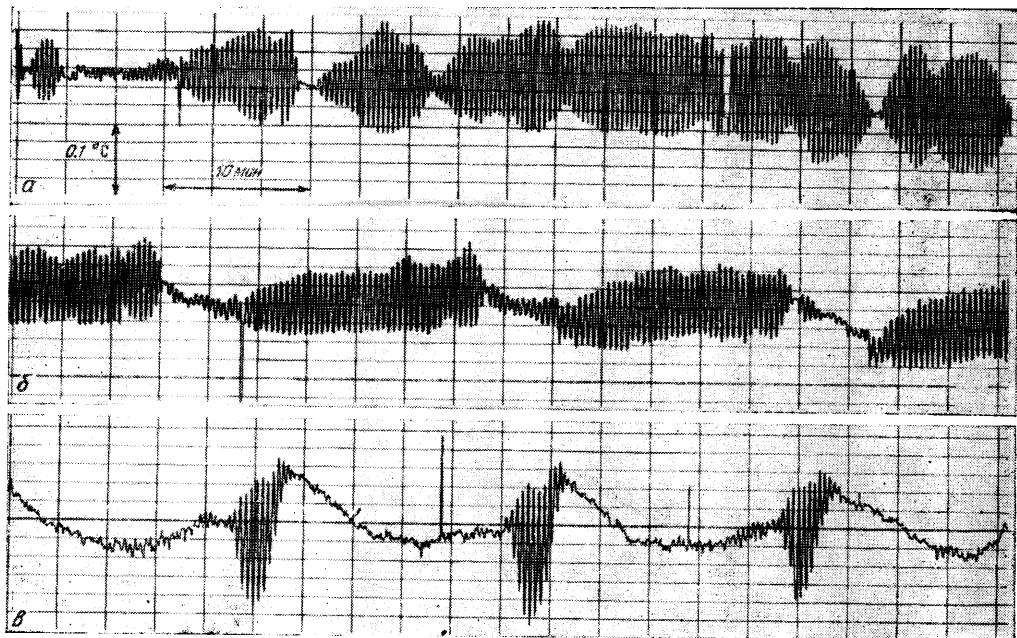
при надкритичности $\sim 5\%$ изменение интенсивности тепловой волны приобретает хаотический характер.

На фиг. 2 для случая $P=10$ (12%-ный водный раствор глицерина при средней температуре слоя 20°C) изображена зависимость среднего волнового числа K от G . Здесь 1 — среднее волновое число, 2 — границы спектра наблюдаемых волн, 3 — наиболее часто реализующиеся длины волн. Сплошная линия — теоретическая нейтральная кривая [2]. Длина волны определялась по ее средней фазовой скорости, вычисленной из измерений среднего времени прохождения валов между двумя расположенными на различном расстоянии от нижнего электрода дифференциальными термопарами, и периоду колебаний, осредненному по времени путем обработки термозаписей.

Представленная на фиг. 2 теоретическая нейтральная кривая имеет два минимума, которым соответствуют различные типы неустойчивости. Длинноволновая ветвь, являющаяся более опасной, соответствует бегущим тепловым волнам, коротковолновая — возмущениям гидродинамического типа, для которых характерна меньшая фазовая скорость. В ходе экспериментов наблюдались возмущения только типа бегущих тепловых волн. Как видно из фиг. 2, экспериментальные точки, соответствующие границам спектра наблюдаемых тепловых волн, группируются около длинноволновой ветви нейтральной теоретической кривой.

При помощи одновременной записи показаний двух расположенных на границах встречных потоков термопар можно было определять длину и интенсивность каждого вала в отдельности. Было обнаружено, что частоты появления возмущений различной длины волны не одинаковы. Как видно из фигуры, длина наиболее часто появляющихся валов, а также средняя длина волны возмущений растут с увеличением G .

Результаты теоретического исследования [5] позволяют объяснить реализацию в эксперименте весьма широкого спектра возмущений отсутст-



Фиг. 4

вием в надкритической области устойчивых длин волн. Не исключено, что проявлению наблюдаемых особенностей спектра способствует конечная длина слоя и, как следствие этого, ограниченность времени развития бегущих возмущений.

Эксперименты с наклонным слоем показали, что при малых отклонениях слоя от вертикали ($\alpha < 17^\circ$, $P_r = 10$) устойчивость прямолинейного движения жидкости также срывается бегущими тепловыми волнами, при этом наблюдается незначительное повышение устойчивости с увеличением α (фиг. 3). Здесь 1 и 2 — границы устойчивости относительно возмущений типа бегущих тепловых волн и конвективных валов соответственно, 3 — граница перехода от тепловых волн к конвективным валам, 4 и 5 — соответствующие возмущениям типа тепловых волн и конвективных валов теоретические пороговые кривые [3].

При дальнейшем увеличении α вместо бегущих тепловых волн при $G \geq G_c$ возникают неподвижные конвективные валы, ориентированные вдоль канала, что объясняется наличием в наклонном слое неустойчивой температурной стратификации. Исследования показали, что для $P_r = 10$ неустойчивость рэлеовско-тейлоровского типа становится определяющей при $\alpha > 18^\circ$. С увеличением угла наклона неустойчивость плоскопараллельного течения относительно возмущений типа конвективных валов быстро монотонно падает (фиг. 3).

Заметим, что порог устойчивости течения относительно возмущений типа конвективных валов определялся по измерениям с помощью платинового термометра-сопротивления температуры жидкости в центре слоя T при различных значениях G . В докритической области наблюдался линейный рост T с G . При этом температура в центре слоя с точностью до 3% совпадала с вычисленной по формуле (0.1). Развитие конвективных валов приводило к перемешиванию жидкости и понижению скорости роста T с G . Значение G_c определялось по излому прямой на графике $T = f(G)$.

Ориентация слоя существенно влияет и на характер спектра бегущих возмущений. На фиг. 4 представлены записи показаний термомпары, регистрирующей пробегающую тепловую волну: $a-\alpha=0$, $G=184$; $b-\alpha=11^\circ$, $G=179$; $c-\alpha=15^\circ$, $G=192$.

С ростом α увеличивается глубина и период модуляции тепловой волны, наблюдаемой при незначительной надкритичности. Уже при $\alpha \approx 10^\circ$ волна дробится на отдельные цуги, состоящие из нескольких валов и разделенные участками, на которых тепловые волны вообще отсутствуют. Отметим, что порог устойчивости движения относительно тепловых волн определялся по появлению таких пакетов. С ростом надкритичности период модуляции падает, цуги сливаются и колебания температуры приобретают хаотический характер. В свете изложенного представляют интерес результаты работы [5], которые дают основания полагать, что наблюдаемое в эксперименте дробление волн на цуги не является результатом конечной длины слоя, но отражает надкритическое взаимодействие бегущих тепловых волн.

Настоящая работа выполнена под руководством Г. Ф. Шайдурова, которому автор благодарен.

Поступила 14 XI 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Якимов А. А. Об устойчивости стационарного конвективного движения, вызванного внутренними источниками тепла. ПММ, 1970, т. 34, вып. 4.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Якимов А. А. О двух типах неустойчивости стационарного конвективного движения, вызванного внутренними источниками тепла. ПММ, 1973, т. 37, вып. 3.
3. Gershuni G. Z., Zhukhovitsky E. M., Jakimov A. A. On stability of plane-parallel convective motion due to internal heat sources. Intern. J. Heat Mass Transfer, 1974, vol. 17, No. 7.
4. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М., «Наука», 1972.
5. Непомнящий А. А. Движения типа модулированных волн, возникающие в результате неустойчивости пространственно-периодических вторичных движений. В сб. «Гидродинамика», вып. 5. Уч. зап. Пермск. гос. ун-та, 1974, № 316.