

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ВИБРАЦИЙ НА КОНВЕКЦИЮ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ СЛОЕ

ИВАНОВА А. А., КОЗЛОВ В. Г.

Экспериментально изучается влияние вертикальных вибраций на конвекцию в цилиндрическом слое, образованном двумя горизонтальными коаксиальными цилиндрами кругового сечения, имеющими различную температуру.

Гармонические колебания полости с неоднородно нагретой жидкостью существенно меняют характер теплопереноса и оказывают значительное влияние на структуру движения и условия возникновения конвективной неустойчивости. Даже в отсутствие статического поля тяжести в полости с неоднородно нагретой несжимаемой жидкостью, помещенной в вибрационное поле, возможно возникновение осредненного движения [1]. Это явление получило название вибрационной конвекции. К настоящему времени вибрационная тепловая конвекция теоретически рассмотрена как при отсутствии, так и при наличии статического поля тяжести [2, 3]. Показано, что при гармонических вибрациях структура движения и интенсивность теплопереноса в замкнутой полости в невесомости определяются вибрационным аналогом числа Грасгофа $G_V = (\beta \Theta b \Omega h)^2 / 2\nu^2$, безразмерной частотой колебаний $\omega = \Omega h^2 / \nu$ и числом Прандтля $P = \nu / \chi$, где b — амплитуда, Ω — циклическая частота колебаний, h — характерный размер полости; остальные обозначения обычные. В предельном случае высоких частот движение становится автоматическим по частоте и определяется только параметрами G_V и P . При наличии статического поля тяжести к перечисленным параметрам добавляется обычное число Грасгофа $G = g\beta\Theta h^3/\nu^2$.

Цилиндрический слой был образован двумя коаксиальными горизонтальными цилиндрами. Внутренний цилиндр представлял собой медную трубу с электрическим нагревателем. Внешней цилиндрической поверхностью служила поверхность выверленного в алюминиевом блоке отверстия. Температура алюминиевого блока поддерживалась постоянной с помощью термостата. Цилиндры крепились строго соосно посредством плексигласовых фланцев. Диаметры цилиндров d_1 и d_2 равнялись соответственно 5,5 и 10,5 мм, длина слоя 61 мм. Слой заполнялся 96%-ым раствором этилового спирта в воде. Особое внимание уделялось удалению из рабочей полости воздушных пузырьков; их отсутствие контролировалось визуально через прозрачные фланцы.

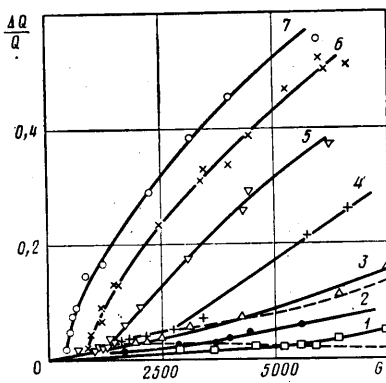
Температура внешней поверхности слоя во всех опытах поддерживалась равной 10 С. Перепад температур на границах слоя задавался в интервале $\Theta = 0-50$ С нагревом внутреннего цилиндра и измерялся с помощью медно-константановой термопары. Для изучения конвективного движения «горячие» спай нескольких термопар были установлены в слое жидкости на различном расстоянии от внутреннего цилиндра. Одной из термопар измерялась температура жидкости непосредственно вблизи его поверхности. «Холодные» спай были помещены в массив алюминиевого блока. Сигналы термопар выводились на измерительный комплекс, состоящий из приборов Ф283, Р341 и КСП4. Для изучения азимутального распределения температуры модель в целом можно было поворачивать вокруг своей оси.

Эксперименты проводились на механическом вибраторе, позволявшем задавать амплитуду колебаний от 0 до 115 мм в диапазоне частот от 0 до 10 Гц. При амплитудах меньше 50 мм частота могла достигать 30 Гц. Вибратор состоял из двух вертикальных направляющих штоков, вдоль которых перемещалась каретка с закрепленной на ней моделью. Каретка приводилась в возвратно-поступательное движение кривошипно-шатунным механизмом. Частота колебаний задавалась напряжением питания коллекторного двигателя и измерялась с помощью цифрового тахометра с точностью 0,01 Гц.

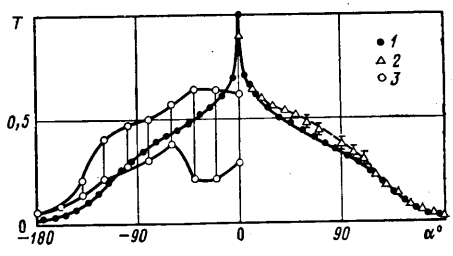
Визуальные наблюдения и термопарные измерения показали, что в отсутствие вибраций в изученном интервале значений числа Рэлея $R = GP = 3000-80000$ в цилиндрическом слое реализуется ламинарное двухвихревое движение, состоящее из потоков, восходящих вблизи нагретого внутреннего цилиндра и нисходящих вблизи холодной внешней стенки. Вблизи стенок образуются пограничные слои, а над внутренним цилиндром формируется конвективный факел. При $R > 6000$ зависимость конвективного теплопереноса от числа Рэлея может быть представлена в виде

$$Nu = Q/Q_0 = 0,18R^{0,25}$$

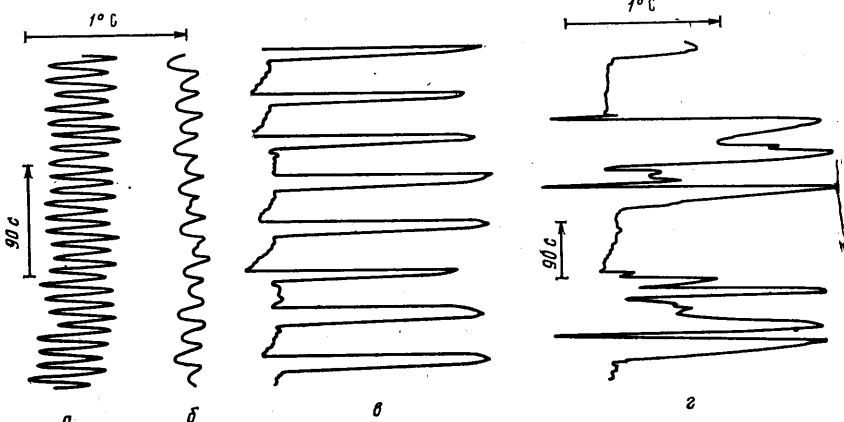
Здесь Q — тепловой поток в условиях гравитационной конвекции, Q_0 — молекулярный тепловой поток. Число Рэлея вычислялось по разности температур Θ и толщине слоя h . Вследствие температурной зависимости параметров жидкости в указанном интервале температур число Прандтля P изменялось от 18,2 до 13,2. Данные по теплопередаче удовлетворительно согласуются с результатами экспериментальных и теоретических исследований гравитационной конвекции в цилиндрическом слое, проведенных другими авторами [4].



Фиг. 1



Фиг. 3



Фиг. 2

Влияние вертикальных вибраций на конвекцию в цилиндрическом слое исследовалось при фиксированной частоте колебаний $f=10$ Гц (безразмерная частота $\omega=320$). Опыты показали, что вибрации интенсифицируют теплоперенос. Зависимость вибрационного вклада в теплоперенос ΔQ от G приведена на фиг. 1. Единицей измерения ΔQ служит тепловой поток Q в отсутствие вибраций. Кривые 1-7 получены при различных амплитудах вибрации; им соответствуют фиксированные значения безразмерного комплекса $10^3 G_V/G^2=0,44; 0,80; 1,7; 2,2; 4,1; 6,4; 11,8$. Этот параметр вибрации не зависит от разности температур Θ .

Относительно слабые вибрации ($G_V \sim G$), как видно из фиг. 1, практически не влияют на теплоперенос. Изучение поля температуры показало, что в этой области движение в слое сохраняет гравитационную структуру. Наблюдается лишь незначительная деформация гравитационных серповидных вихрей. Это проявляется, в частности, в уширении факела над внутренним цилиндром.

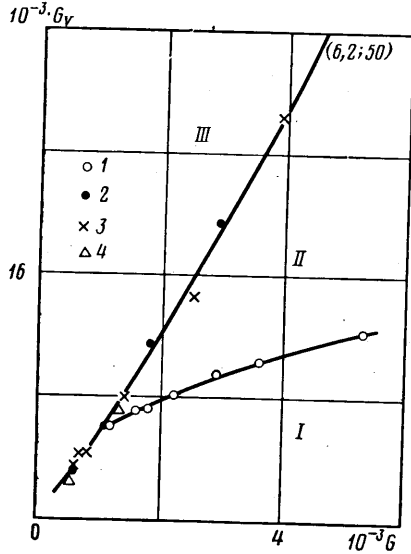
Увеличение отношения G_V/G приводит к кризису гравитационного течения, который проявляется в развитии волновой неустойчивости в восходящихблизи внутреннего цилиндра потоках. Развитие этой неустойчивости сопровождается регулярными колебаниями температуры в слое. Запись показаний термопары, расположенной вблизи поверхности внутреннего цилиндра под углом $\alpha=-40^\circ$, при $G=6900$, $G_V=36000$ приведена на фиг. 2, а. Угол $\alpha=0$ соответствует расположению термопары в верхней точке. Измерения, проведенные термопарами, расположенными в средней части слоя и у внешней стенки, показали, что с удалением от внутреннего цилиндра интенсивность колебаний температуры резко падает. Это говорит о локализации волн вблизи внутреннего цилиндра.

Развитие волновой неустойчивости происходит пороговым образом. Порог определяется по появлению колебаний температуры у поверхности внутреннего цилиндра. На кривых 1-5 (фиг. 1) порог волновой неустойчивости находится соответственно при $G=5300, 3600, 2200, 1800$ и 1200 . Как видно из графиков, развитие волн в восходящих потоках приводит лишь к незначительной интенсификации теплопереноса. При этом осредненное движение в слое сохраняет форму двух симметричных серповидных вихрей, характерных для гравитационного течения.

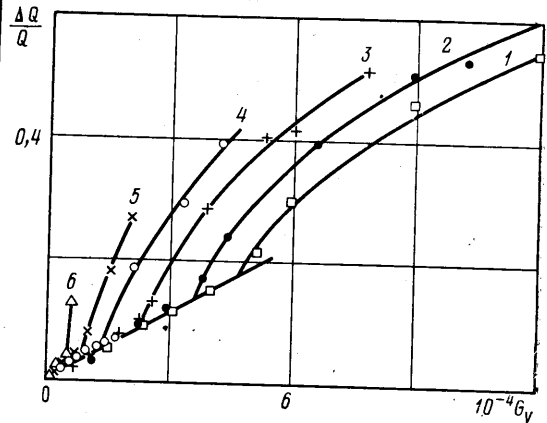
При дальнейшем увеличении отношения G_V/G наблюдается переход от двух-

вихревого гравитационного движения к многовихревому, имеющему вибрационную природу. Смена структуры движения происходит критическим образом и приводит к резкому возрастанию теплопереноса. Порог легко определяется по выраженному излому на зависимости $\Delta Q/Q$ от G (фиг. 1). На кривых 3-7 порог находится соответственно при $G=4000, 2600, 1400, 820$ и 450 . Штриховой линией на графике выделена область существования волновой неустойчивости двухвихревого конвективного течения. В области $G < 1100$ вибрационные вихри сменяют ламинарное двухвихревое конвективное движение. При $G > 1100$ появление вибрационных вихрей происходит на фоне развитой волновой неустойчивости гравитационного течения.

На фиг. 3 приведена азимутальная зависимость температуры T в точке $d/d_2 = 0,94$ при $G=5400$. Единичей измерения температуры служит температура в данной точке при $\alpha=0$ в отсутствие вибраций. Кривая 1 отражает распределение температуры в случае чисто гравитационного течения ($G_V=0$). Кривая 2 получена в



Фиг. 4



Фиг. 5

области развитой волновой неустойчивости ($G_V=27\,000$). Кривая 3 характеризует многовихревое виброконвективное движение ($G_V=61\,000$). Двойные точки указывают интервал колебаний температуры. Многовихревое движение в отличие от волнового режима сопровождается интенсивными колебаниями температуры по всей ширине слоя. Одновременно с колебаниями температуры в слое наблюдаются колебания температуры внутреннего цилиндра, что при постоянной мощности тепловыделения указывает на изменение теплового потока, связанное с перестройкой структуры движения.

При развитии вибрационных вихрей волны вблизи внутреннего цилиндра исчезают, что можно объяснить разрушением гравитационного двухвихревого течения. На границе перехода от волновой неустойчивости к вибрационным вихрям при $G=1500, G_V=9000$ были зафиксированы интенсивные колебания температуры по всей ширине слоя, частота которых согласована с частотой колебаний температуры в пристеночном слое. На фиг. 2, б, в приведены записи изменения температуры у поверхности внутреннего цилиндра и в точке $d/d_2=0,86$ при $\alpha=110^\circ$. Регулярные колебания в слое происходили с частотой в 2 раза меньшей частоты колебаний температуры во внутреннем погранслое, что свидетельствует о взаимодействии волн и вибрационных вихрей вблизи порога возникновения последних. Отметим, что в области развитых вибрационных вихрей также наблюдались практически регулярные колебания температуры. Это позволяет предположить существование в слое когерентных структур.

Интересен механизм перехода непосредственно от ламинарного двухвихревого движения к многовихревой структуре ($G < 1100$). В припороговой области возникают автоколебания — после развития серии вихрей наблюдается реламинаризация течения на короткий отрезок времени. Изменение температуры со временем в точке $d/d_2=0,94$ ($\alpha=110^\circ$) при $G=490, G_V=2300$ приведено на фиг. 2, г. Описанное явление может объясняться конечной теплоемкостью внутреннего цилиндра. Развитие вихрей резко увеличивает теплоперенос, что приводит к падению температуры внутреннего цилиндра и на короткий отрезок времени переводит систему в область устойчивости.

Обобщенная карта режимов виброконвективного движения в координатах ($G,$

G_V) изображена на фиг. 4. На карте можно выделить три области: I — ламинарного гравитационного течения; II — волновой неустойчивости гравитационного течения; III — вибрационных вихрей. Порог развития волновой неустойчивости (точки 1) определяется по появлению колебаний температуры в восходящем пограничном слое. Граница возникновения многоточечного движения определяется различными способами. Точки 2 соответствуют порогу, определенному по кризису теплопереноса при уменьшении G ($G_V = \text{const}$), 3 — по появлению колебаний температуры внутреннего цилиндра, 4 — по появлению нерегулярных колебаний температуры в точке $d/d_2 = 0,86$ при $\alpha = 110^\circ$.

Зависимость безразмерного вибрационного вклада в тепловой поток от вибрационного числа Грасгофа приведена на фиг. 5. Кривым 1–6 соответствуют различные фиксированные значения гравитационного числа Грасгофа $G = 7300, 5900, 4200, 2900, 1900$ и 940 . Из графиков видно, что на начальном участке теплоперенос растет линейно с увеличением вибрационного числа Грасгофа. Кривые, полученные при различных значениях G , на этом участке совпадают — интенсификация теплопереноса пропорциональна G_V и в изученной области параметров не зависит от G . Развитие волновой неустойчивости не нарушает линейной зависимости. Резкое возрастание теплового потока и отклонение зависимости от прямой происходит лишь при развитии вибрационных вихрей. При этом гравитационная конвекция играет роль стабилизирующего фактора: развитие вибрационных вихрей происходит тем позже, чем выше значение G .

Описанные выше эксперименты проводились при фиксированной безразмерной частоте $\omega = 320$. Опыты, проведенные в интервале частот $\omega = 0-1000$, обнаружили качественно аналогичную картину. При максимальной из достигнутых частот выход на автоколебательность по частоте еще не наблюдался.

Проведенные эксперименты свидетельствуют о наличии вибрационного механизма конвекции и его существенном влиянии на структуру течения и теплоперенос.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. О свободной тепловой конвекции в вибрационном поле в условиях невесомости. — Докл. АН СССР, 1979, т. 249, № 3, с. 580–584.
2. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Вибрационная тепловая конвекция в невесомости. — В кн.: Гидродинамика и процессы переноса в невесомости. Свердловск: УНЦ АН СССР, 1983, с. 86–105.
3. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Юрков Ю. С. Конвективные колебания в замкнутой полости в модулированном поле тяжести. — В кн.: Конвективные течения. Вып. 1. Пермь: Пермск. пед. ин-т, 1979, с. 73–80.
4. Tsui J. T., Tremblay B. On transient natural convection heat transfer in the annulus between concentric, horizontal cylinders with isothermal surfaces. — Int. J. Heat Mass Transfer, 1984, v. 27, № 1, p. 103–111.

Пермь

Поступила в редакцию
26.XI.1984