

со стенкой. Линии, соответствующие моментам времени $t_6 \approx 12.3$, $t_7 \approx 16.6$, $t_8 \approx 19.7$, $t_9 \approx 22.9$ и $t_{10} \approx 27.3$, показывают, как волна сжатия, взаимодействуя с волной разрежения, распространяется к левому концу ударной трубы и отражается от него. Сверхзвуковое течение в расширяющейся части сопла в интервале времени между $t_4 \approx 6.1$ и $t_9 \approx 22.9$ слабо зависит от процессов, происходящих в остальной части ударной трубы.

На фиг. 4 сплошными линиями показаны распределения давления по сечению трубы при $x = 7.4$ в различные моменты времени (в этом сечении $Y \approx 1.1$). Для сравнения штриховыми линиями нанесены результаты «одномерного» расчета, который проводился по той же программе и по тем же разностным формулам, но при одной ячейке по оси y , т. е. при $N = 30$, $K = 1$. При $t = 0$ газ покоится, давление равно единице. Для значений времени в интервале между $t = 1.5$ и $t = 10$ течение существенно двумерное ($t_1 \approx 1.8$, $t_2 \approx 3.3$, $t_3 \approx 5.1$). К моменту времени $t_4 \approx 14.2$, нестационарные волны, распространяющиеся в поперечном направлении в области сужения сопла, затухают и распределение давления по сечению трубы приближается к одномерному.

Распределение давления по длине сопла, полученное из одномерного расчета при $t \approx 6.1$ приведено на фиг. 5 штриховой линией. Представление о двумерном характере течения в тот же момент времени дают кривые распределения p на стенке и на оси сопла (сплошная и штрих-пунктирная линия соответственно). В отличие от локальных характеристик течения его суммарные характеристики, определенные в двумерном и одномерном приближении, отличаются менее значительно. Иллюстрацией этого может служить фиг. 6, на которой дано изменение по времени массы m газа, находящегося в трубе (m отнесено к своему начальному значению при $t = 0$). На фигуре сплошная кривая — результат двумерного расчета ($N = 30$, $K = 4$), а штриховая — результат аналогичного одномерного расчета ($N = 30$, $K = 1$).

Вычисление одного временного слоя при $N = 30$ и $K = 4$ требует 20 сек машинного времени на ЭВМ «М-220». При этом, как показали проведенные расчеты, применение рассмотренного разностного метода возможно и для значительно больших значений перепада давлений на диафрагме.

Автор выражает благодарность А. Н. Крайко за полезные обсуждения и постоянное внимание к работе.

Поступило 9 XII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Ударные трубы. Сб статей, М., Изд-во иностр. лит., 1962.
2. Tamaki F. A. A divergent shock tube for obtaining supersonic flows. J. Phys. Soc. Japan, 1956, IV, vol. 11, No. 4.
3. Безменов В. Я. Нестационарные течения в ударной трубе переменного сечения. Тр. ЦАГИ, 1959, вып. 737.
4. Ridinger G. Passage of shock waves through duct of variable cross section. Phys. Fluids, 1960, vol. 3, No. 3, p. 449—455.
5. Wilcox P. L. Effect of a continuous area convergence on the motion of a shock wave. Aeronaut. Quart., 1969, vol. 20, pt. 3, p. 248—258.
6. Годунов С. К., Забродин А. В., Прокопов Г. П. Разностная схема для двумерных нестационарных задач газовой динамики и расчет обтекания с отходящей ударной волной. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1961, т. 1, № 6, стр. 1020—1050.
7. Иванов М. Я., Крайко А. Н. Численное решение прямой задачи о смешанном течении в соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 5, стр. 77—83.
8. Иванов М. Я. Применение метода установления к анализу нерасчетных режимов течения в осесимметричных соплах. Изв. АН СССР, МЖГ, 1969, № 6, стр. 137—139.
9. Förster von K. Numerische Untersuchung des Lax-Verfahrens. Ingr.—Arch., 1968. Bd 37, S. 45—55.

О ТЕРМОКОНЦЕНТРАЦИОННОЙ КОНВЕКЦИИ

В. Е. ГУБИН, Н. Н. ХАЗИЕВ

(Уфа)

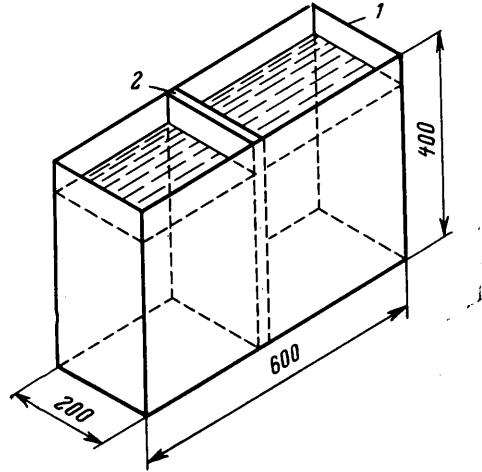
Приведены результаты оптических наблюдений термоконцентрационной конвекции в замкнутых объемах различной геометрической формы. Показано, что под влиянием полей концентрации и температуры в растворах происходит многоконтурное слоистое конвективное движение.

Конвективная устойчивость неоднородной по плотности жидкости исследовалась в работах [1, 2]. Установлено, что наличие начального градиента плотности, направленного вертикально вниз, повышает устойчивость состояния покоя жидкости при появлении вертикального градиента температуры в том же направлении.

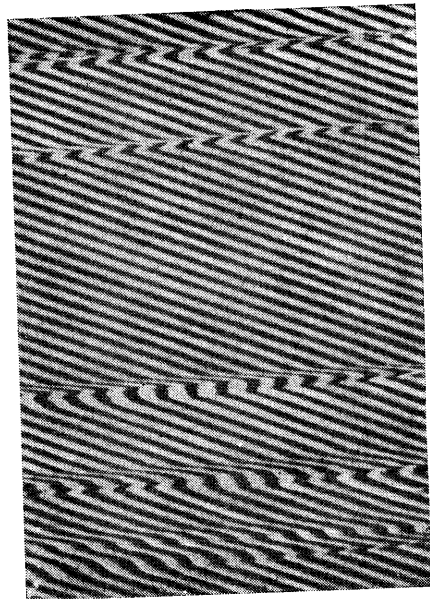
Исследование тепловой конвекции различных неоднородных водных растворов проводилось в прозрачных сосудах. Один из сосудов был выполнен из плексигласа в виде параллелепипеда (фиг. 1). В сосуде 1 помещалась медная пластина 2 с электронагревательными элементами, расположенными так, что тепловой поток по всей поверхности пластины был равномерным. Мощность электронагревателя изменялась с помощью автотрансформатора ЛАТР-1.

Использовали раствор поваренной соли в воде и водо-глицериновую смесь. При экспериментах сосуд заполнялся раствором неравномерной концентрации, так чтобы плотность раствора повышалась сверху вниз. Путем специальной подготовки раствора получали линейное, экспоненциальное или более сложное начальное распределение плотности в сосуде.

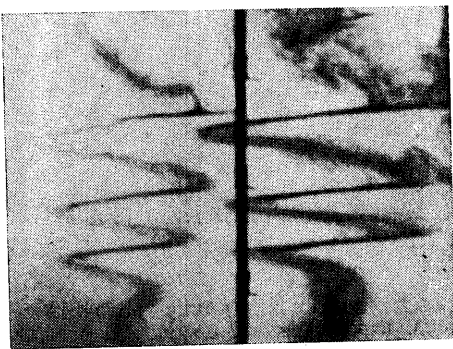
При подогреве медной пластины в растворе возникало конвективное движение, которое визуализировали при помощи введения в жидкость тонкого подкрашенного вертикального жидкого шнура. Такой шнур образовывался при опускании в жидкость мелкой смоченной частички марганцовокислого калия. В неподвижной жидкости подкрашенный шнур сохранял свое вертикальное положение, при возникновении движения уносился потоком и рисовал профиль скорости потока. Один из фоток кадров, фиксирующих такое движение, приведен на фиг. 2. Как видно, в жидкости возникало многоконтурное слоистое движение. Под действием подъемной силы у нагретой стенки жидкость начинала двигаться вдоль пластины вверх. На определенной высоте поток жидкости отрывался от пластины и начинал двигаться горизонтально. Вместе с тем в слое образовывался горизонтальный противоток холодной жидкости к нагретой пластине, который дойдя до пластины, поднимался вдоль нее и далее снова отрывался. Таким образом, в слое возникало замкнутое движение жидкости. Эксперименты проводили при расстояни-



Фиг. 1

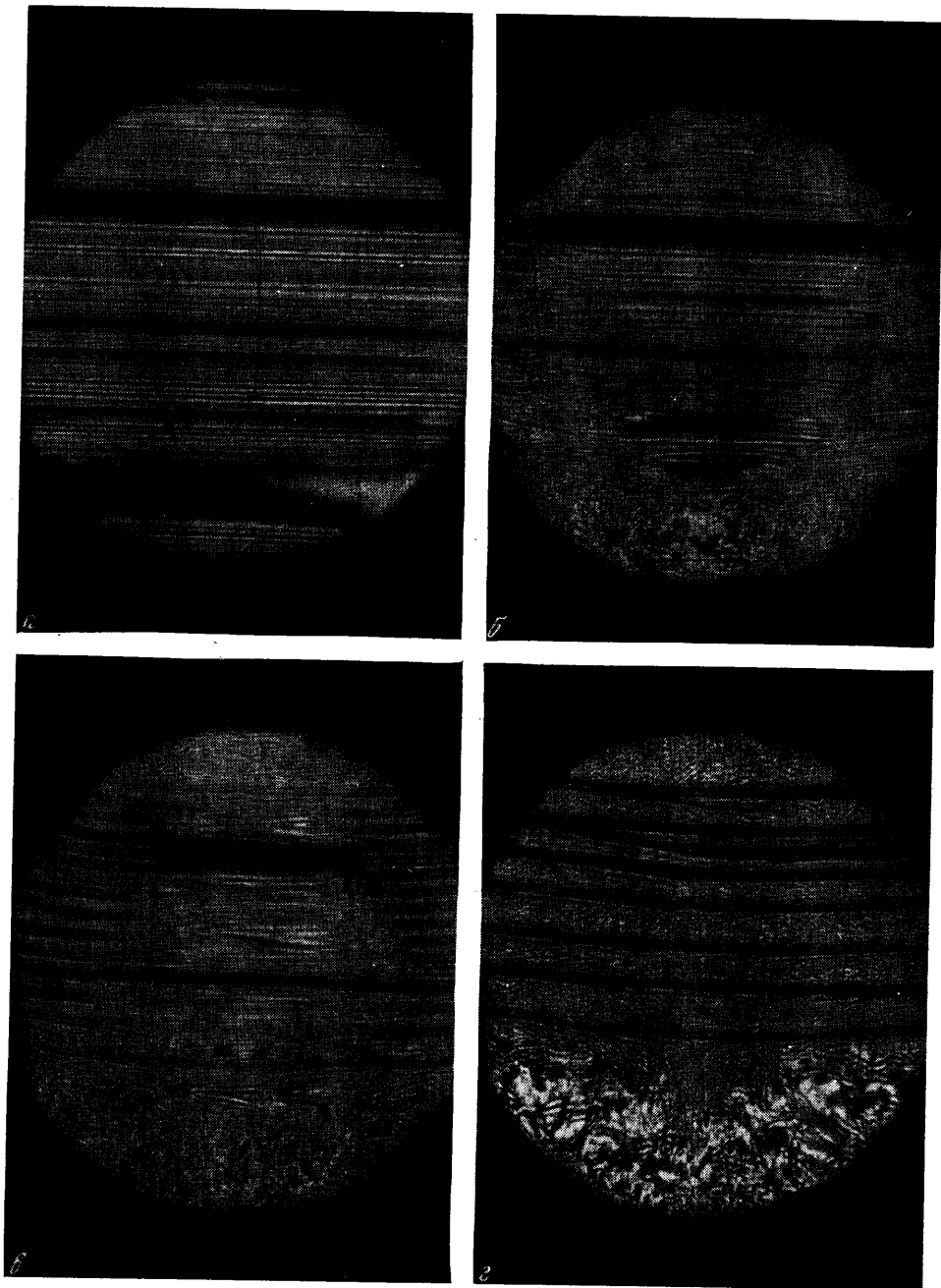


Фиг. 3



Фиг. 2

ях между нагретой пластиной и холодной стенкой сосуда от 100 до 500 мм. Во всех этих случаях в сосуде появлялось многослойное движение жидкости. Удалось установить, что высота каждого слоя определяется величиной градиента плотности раствора и горизонтального градиента температуры в жидкости у вертикальной стенки.



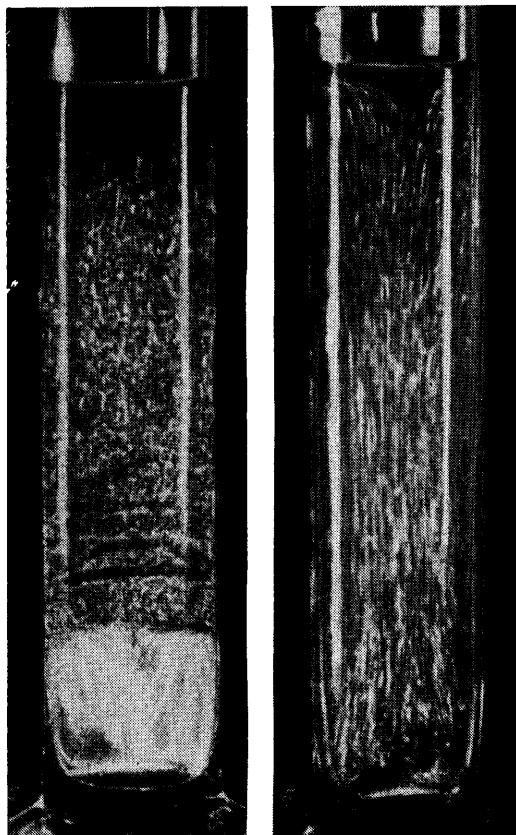
Фиг. 4

При слоистом многоконтурном движении наблюдали изменение градиента плотности раствора по высоте. Прозрачный сосуд, изображенный на фиг. 1, освещался проходящим светом через прямолинейную решетку. Решетка представляла собой лист бумаги с чередующимися темно-светлыми полосами. При экспериментах эта решетка фотографировалась через слой раствора в сосуде длиннофокусным телеобъективом. При появлении слоистого течения на границах слоев происходило резкое изменение градиента плотности, что фиксировалось преломлением линий решетки. На фиг. 3 приведено фото, на котором хорошо видны границы слоев течения.

Были проведены аналогичные эксперименты также с горизонтальным цилиндрическим сосудом с диаметром 230 мм и длиной 200 мм. Торцы цилиндра закрывались защитными оптическими стеклами, а его наружная боковая поверхность подогревалась. При экспериментах цилиндр заполнялся раствором, концентрация которого плавно изменялась по высоте. При включении подогревателя в растворе также возникло конвективное движение. Градиент плотности жидкости в сосуде определялся методом щели и решетки с помощью прибора Теллера ИАВ-451. Последовательные состояния неоднородности раствора в сосуде приведены на фиг. 4. Изофоты на фиг. 4, а показывают градиент плотности раствора. При подогреве стенки градиент плотности изменялся. Образовывались мелкие ячейки в виде «язычков» и вклинивающихся в жидкость (фиг. 4, б). В дальнейшем эти ячейки расширялись и проникали все глубже (фиг. 4, в), и, наконец, образовывались слои, проникающие на всю ширину сосуда с резкими границами, где и происходило основное изменение плотности раствора (фиг. 4, г).

Эксперименты проводили также и в вертикальном цилиндре. Стекланный цилиндр диаметром 50 мм и длиной 400 мм заполнялся раствором различной концентрации по высоте и помещался в водяную ванну с другой температурой. Конвективное движение наблюдалось визуальным методом. Для этой цели в раствор вводили светорассеивающие частички алюминиевой пудры. Цилиндр освещался узким плоским лучом света вдоль вертикальной образующей, а фотографирование производилось в перпендикулярном направлении к плоскости освещения. На фиг. 5, а приведена фотография конвективного движения раствора с вертикальным градиентом плотности при охлаждении в водяной ванне. Для сравнения приведена фотография (фиг. 5, б) конвективного движения в однородной жидкости при тех же условиях теплообмена.

Таким образом, разные методы наблюдения при разных условиях проведения экспериментов показали образование слоистого течения жидкости при наличии начального вертикального градиента плотности и перпендикулярного к нему градиента температуры в слое жидкости. Это явление обусловлено совместным влиянием полей концентрации и температуры.



Фиг. 5

Поступило 24 VII 1969

ЛИТЕРАТУРА

1. Братухин Ю. К., Шлиомис М. И. О конвективной неустойчивости смеси в шаровой полости. Гидродинамика, Уч. зап. Пермск. гос. ун-та, 1968, № 184.
2. Shirtcliffe T. G. L. An experimental investigation of thermosolutal convection at marginal stability. J. Fluid Mech., 1969, vol. 35, pt 4.