

СВОБОДНАЯ КОНВЕКЦИЯ ЖИДКОСТИ С НАЧАЛЬНЫМ ВЕРТИКАЛЬНЫМ ГРАДИЕНТОМ ПЛОТНОСТИ ПРИ БОКОВОМ ПОДОГРЕВЕ

М. Д. Орешина, Л. И. Савельева, Н. Н. Хазиев, Г. Н. Шемякина

(Уфа)

Приводятся некоторые результаты экспериментального исследования свободной конвекции в растворах с неравномерной плотностью по высоте. Показано, что конвективное движение в растворах при наличии вертикального градиента плотности и бокового подогрева носит ячеистый характер. Выявлена зависимость высоты отдельных ячеек от температурного напора и градиента плотности.

Известно, что в некоторых случаях свободная конвекция жидкости происходит с образованием ячеек. Было обнаружено [1], что при подогреве снизу движение жидкости между горизонтальными поверхностями происходит в шестиугольных ячейках. При конвекции жидкости в узкой вертикальной щели также образуются ячейки [2]. Аналитическое исследование конвективной устойчивости жидкости в вертикальных узких щелях также показывает образование ячеек по высоте [3,4]. В работе [5] исследована конвекция при неравномерном нагреве сверху. В этом случае движение также носит ячеистый характер. Ячейка заполняет всю полость по высоте, а по длине распространяется на расстояние, равное характерному размеру неоднородности температуры.

Для проведения экспериментов был изготовлен прозрачный сосуд из органического стекла в форме параллелепипеда с размерами $600 \times 400 \times 200$ мм³. Боковой подогрев осуществлялся с помощью электроподогревателя, который был выполнен в виде плоской медной пластины, шириной, равной ширине сосуда, так что подогреватель можно было перемещать внутри параллелепипеда, меняя тем самым длину рабочей части емкости. Мощность подогрева изменялась путем изменения напряжения питания с помощью автотрансформатора ЛАТР-1.

На поверхности пластины вдоль вертикальной осевой линии располагались десять термопар. Для измерения температуры жидкости термопары устанавливались на тонкой деревянной стойке на тех же высотах, что и на пластине. Стойка с термопарами устанавливалась в вертикальном положении за пределами пограничного слоя вдали от подогревателя. При работе использовались медь-константановые термопары. Т.э.д.с. термопар измерялась компенсационным методом с помощью потенциометра ПП-63 класса 0.05.

Эксперименты производились с растворами глицерина в воде. В сосуде подготавливался раствор с вертикальным градиентом плотности. После подготовки раствора отбиралась проба с 5—6 точек по высоте для определения плотности. Плотность проб жидкости определялась взвешиванием в пикнометрах объемом 2 см³ с точностью до четвертого знака после запятой. По замерам плотности строился график распределения ее по высоте. Начальное распределение плотности по высоте при различных экспериментах происходило по различным законам: по экспоненциальному, прямолинейному и более сложному. При экспериментах начальная средняя плотность раствора изменялась в пределах от 1.0010 до 1.0200 г/см³ при 20° С, а градиент плотности — от 0.0001 до 0.0025 г/см⁴.

До начала подогрева температура жидкости была одинакова во всем объеме. После подготовки и успокоения раствора в сосуде включался подогрев вертикальной пластины. При подогреве измерялась температура поверхности пластины и в объеме жидкости. Замеры температур производились через каждые полчаса или час, в зависимости от интенсивности подогрева. При каждой серии экспериментов производили не менее 5—6 замеров. Эксперименты повторялись при нескольких мощностях подогрева пластины.

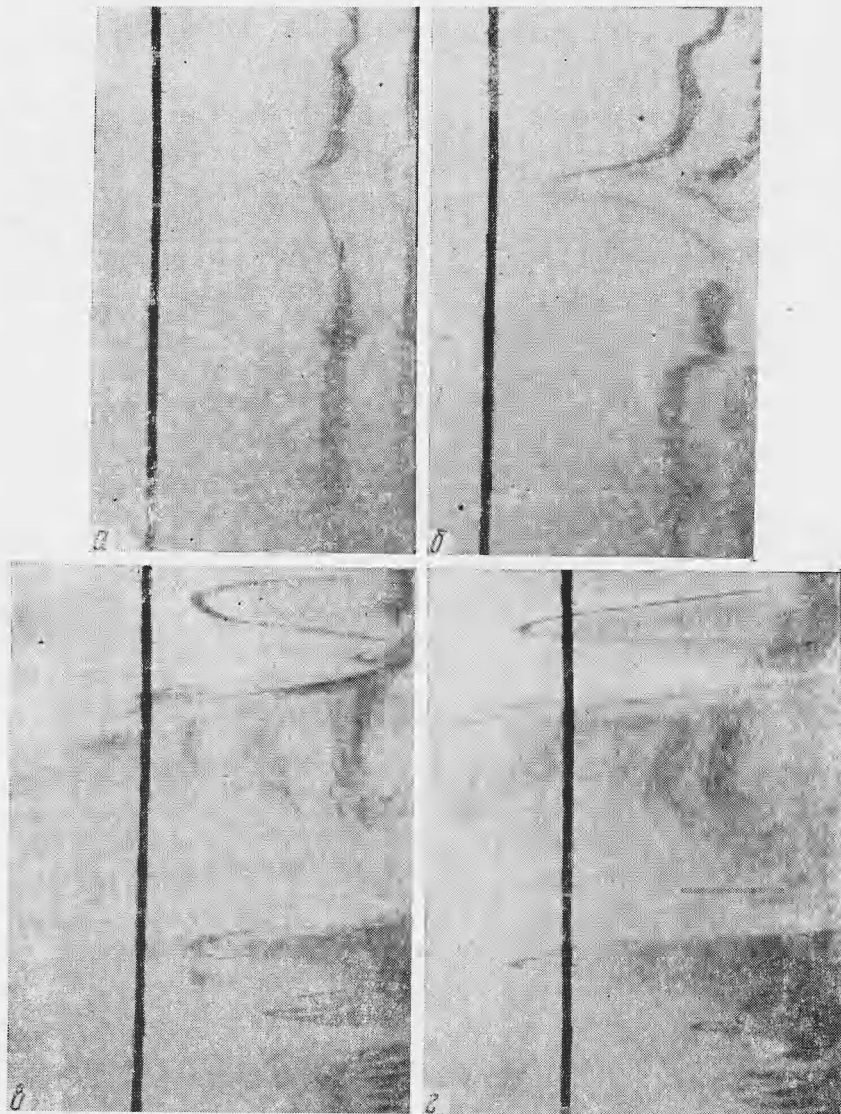
При этом температурный напор (разность температур стенки нагревателя и жидкости за пределами пограничного слоя) изменялся в пределах от 2 до 7° С. За время эксперимента (3—4 час) местная температура жидкости изменялась в пределах от 20 до 43° С, температура стенки — от 20 до 50° С, максимальный перепад температур по высоте составлял в жидкости 10° С, на стенке 7° С.

Конвективное движение в сосуде наблюдалось визуальными методами. Визуализация движения осуществлялась путем введения в жидкость подкрашенного вертикального «шнура», который образовывался при опускании в жидкость смоченных мелких частичек марганцевокислого калия.

В неподвижной жидкости окрашенный след частиц оставался в вертикальном положении и неподвижным. При возникновении движения след уносился потоком, вырисовывая профиль скорости потока, который регистрировался фотографированием. Конвективное движение жидкости возникало при подогреве вертикальной пластины.

В начале процесса у горячей стенки появлялись язычки, вклинивающиеся в толщу жидкости (фиг. 1). По мере прогревания эти язычки вытягивались и достигали холодной стенки. На фиг. 1 кадры а, б, в, г, соответствуют последовательным этапам проникновения движения в толщу жидкости. Снимки произведены с интервалами соответ-

венно 1, 7 и 8 мин. В итоге устанавливалось стабильное ячеестое движение. Время проникновения ячеестого течения от нагретой пластины до противоположной стенки зависело от величины этого расстояния и скорости движения жидкости. Максимальная скорость в ячейке наблюдалась в пограничном слое у горячей стенки, которая постепенно падала вдоль верхней границы ячейки и дальше по направлению движения.



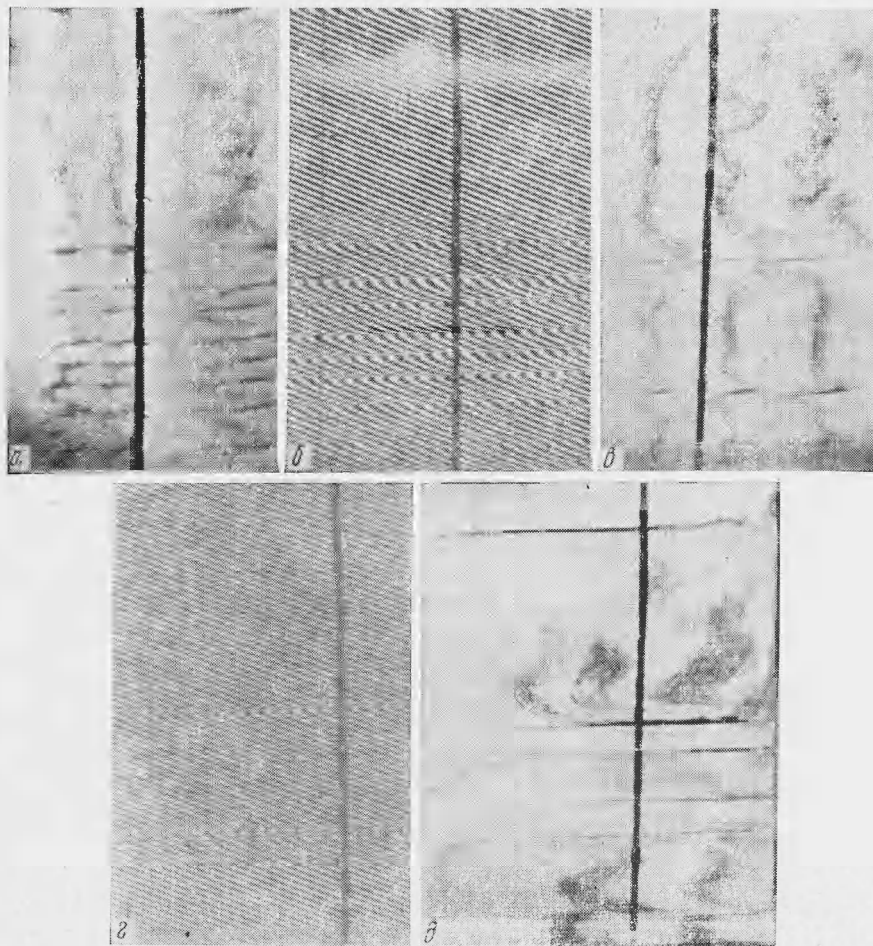
Фиг. 1

На фиг. 2 приведены кадры ячеестого конвективного движения при высоте налива раствора в сосуде 360 мм. Снимки а и в выполнены при различной величине начального градиента плотности раствора. Мелкие ячейки соответствуют большей величине градиента плотности и меньшему температурному напору. На этой же фигуре приведены теневые фотографии (2б, г) неоднородности раствора соответственно приведенным на снимках (2а, в) состояниям конвективного движения. Теневые фотографии получены путем фотографирования телеобъективом прямолинейной решетки через слой исследуемого раствора при проходящем свете. Преломление линий решетки соответствовало резкому изменению градиента плотности раствора. Эти снимки показали, что такое изменение происходит на границах соседних ячеек.

Фиг. 2а, б соответствуют следующим условиям эксперимента: температурный напор $\theta = 2.9^\circ \text{C}$, градиент плотности примерно одинаковый по всей высоте образования ячеек $\nabla \rho = 0.0004 \text{ г/см}^4$, среднеобъемная температура жидкости 26°C . Фиг. 2, г, в

$$\begin{array}{ll} h = 1.5 \text{ мм} & \nabla \rho = 0.0037 \text{ г/см}^4 \\ h = 62 \text{ мм} & \nabla \rho = 0.0004 \text{ г/см}^4 \\ h = 112 \text{ мм} & \nabla \rho = 0.0001 \text{ г/см}^4 \end{array}$$

среднеобъемная температура жидкости 39°C .
получены при условиях: $\theta = 2.1^\circ \text{C}$; градиенты плотности при

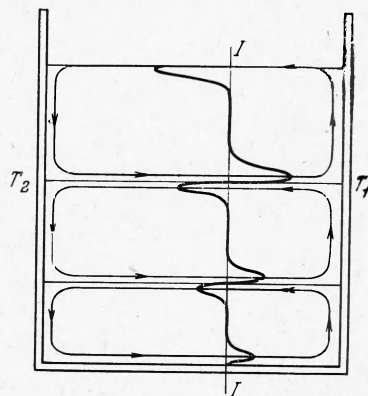


Фиг. 2

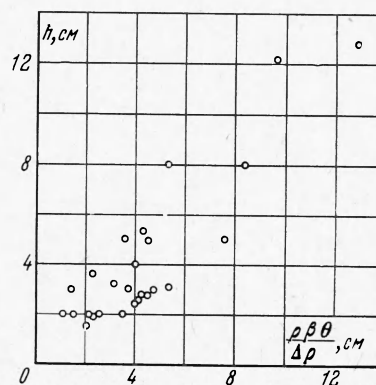
На фиг. 2, д хорошо видно движение внутри ячеек и у стенок внутри сосуда. Фотографии показывают, что движение в ячейках происходит в тонком пограничном слое вблизи стенок сосуда и у границ ячейки. Когда высота ячейки больше двойной толщины пограничного слоя, выделяется область ядра, в которой жидкость практически находится в состоянии покоя. На фиг. 3 приведено схематическое изображение ячеек и характерный профиль скорости по сечению $1-1$. Жидкость в ячейке у теплой стенки поднималась, а у холодной опускалась.

Наблюдения показали, что высота отдельной ячейки зависит от температурного напора и начального градиента плотности раствора. Экспериментальные данные о высотах ячеек в зависимости от комплекса $\rho\beta\theta / \nabla\rho$ приведены на фиг. 4. Здесь ρ , β , $\nabla\rho$ — соответственно плотность, термический коэффициент объемного расширения, начальный градиент плотности раствора; θ — температурный напор.

Необходимо отметить, что плотность со временем не выравнивается между ячейками, а устанавливается скачкообразное распределение ее. В объеме отдельных ячеек из-за конвективного движения плотность быстро выравнивается.



Фиг. 3



Фиг. 4

Образование ячеек при свободной конвекции жидкостей следует ожидать во многих практических задачах. В естественных условиях градиент плотности может иметь место и в жидкостях, обычно считаемых однородными, в результате наличия механических примесей, растворенных солей или в результате расслоения многокомпонентных жидкостей (нефтепродукты). В таких жидкостях при соответствующих тепловых условиях и достаточных высотах столба жидкости могут образовываться ячейки, которые существенно будут влиять на технологические процессы.

Поступила 17 III 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Venard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquid. I. Description des phenomenes. Rev. Gen. Sci. Pures Appl., 1900, vol. 11, No. 23, pp. 1261—1271.
2. Михеев М. А. Основы теплопередачи. М.— Л., Госэнергоиздат, 1956.
3. Рудаков Р. Н. Спектр возмущений и устойчивость конвективного движения между вертикальными плоскостями. ПММ, 1967, т. 31, вып. 2.
4. Vest C. M., Agrasi V. S. Stability of natural convection in a vertical slot. J. Fluid Mech., 1969, vol. 36, pt. 1.
5. Лыков А. В., Берковский Б. М., Фертман В. Е. Экспериментальное исследование конвекции при нагреве сверху. Инж.-физ. ж., 1969, т. 16, № 6.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОБМЕНА В ЗОНАХ ОТРЫВА ТУРБУЛЕНТНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ПЕРЕД УСТУПОМ

Б. Е. Лужанский, В. П. Солнцев

(Москва)

Изложены результаты экспериментального исследования теплообмена в зонах отрыва двухмерного турбулентного пограничного слоя перед прямоугольным уступом при дозвуковой скорости воздушного потока.

Исследование проводилось при изменении отношения толщины пограничного слоя в сечении отрыва к высоте уступа от 0.09 до 4, критерия Рейнольдса, рассчитанного по параметрам потока и высоте уступа, от $1.7 \cdot 10^4$ до $4.2 \cdot 10^5$ и критерия Эйлера от 1.1 до 200. Температурный фактор равнялся 0.7. Дано краткое описание экспериментального участка и методики экспериментов.

Показано, что распределение коэффициентов теплоотдачи в отрывной зоне неавтономно и зависит от схемы течения, чисел Рейнольдса, Эйлера и относительной толщины вытеснения пограничного слоя на линии отрыва.