

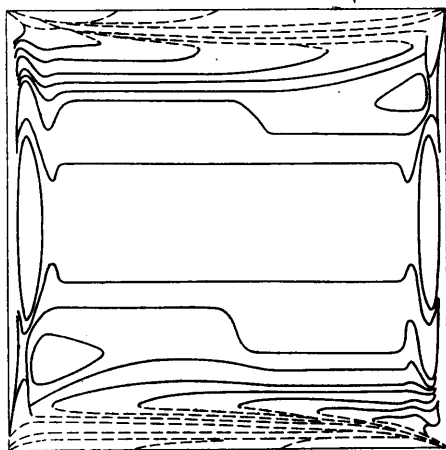
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ КОНВЕКТИВНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ЗАМКНУТОЙ ПРЯМОУГОЛЬНОЙ ПОЛОСТИ

В. Д. ЗИМИН, В. Г. ШАЙДУРОВ

(Пермь)

Теория пограничного слоя при решении задач естественной конвекции позволяет получить весьма общие закономерности теплообмена для больших значений числа Релея, т. е. в наиболее интересных для практических приложений случаях. В замкнутых полостях пограничный слой эффективно взаимодействует с внутренней областью — ядром течения, поэтому вопрос о характере конвективного движения в ядре имеет первостепенное значение для аналитического исследования конвекции в замкнутых объемах.

В данной работе экспериментально исследовались устойчивость пограничного слоя и характер движения в ядре для случая прямоугольной полости, на границах



Фиг. 1

которой независимым образом задавались горизонтальная и вертикальная разности температур. Опыты выполнены в диапазоне чисел Релея от 10^6 до 10^9 ; отношение высоты полости к ее ширине изменялось от 0.3 до 1.

Прямоугольная полость составлялась из четырех плоских теплообменников, представлявших собой медные пластины толщиной 20 мм с внутренними каналами для термостатирующей жидкости. Горизонтальный размер полости D был фиксированным и равнялся 10 см, а вертикальный размер H можно было изменять, перемещая горизонтальные пластины. В местах контактов пластин устанавливались тонкие резиновые прокладки. С торцов полость закрывалась плоскопараллельными стеклянными пластинами.

Теплообменники включались независимо во внешние контуры четырех ультра-термостатов типа $U-10$. Температура на внутренних поверхностях полости измерялась с помощью медьконстантановых тер-

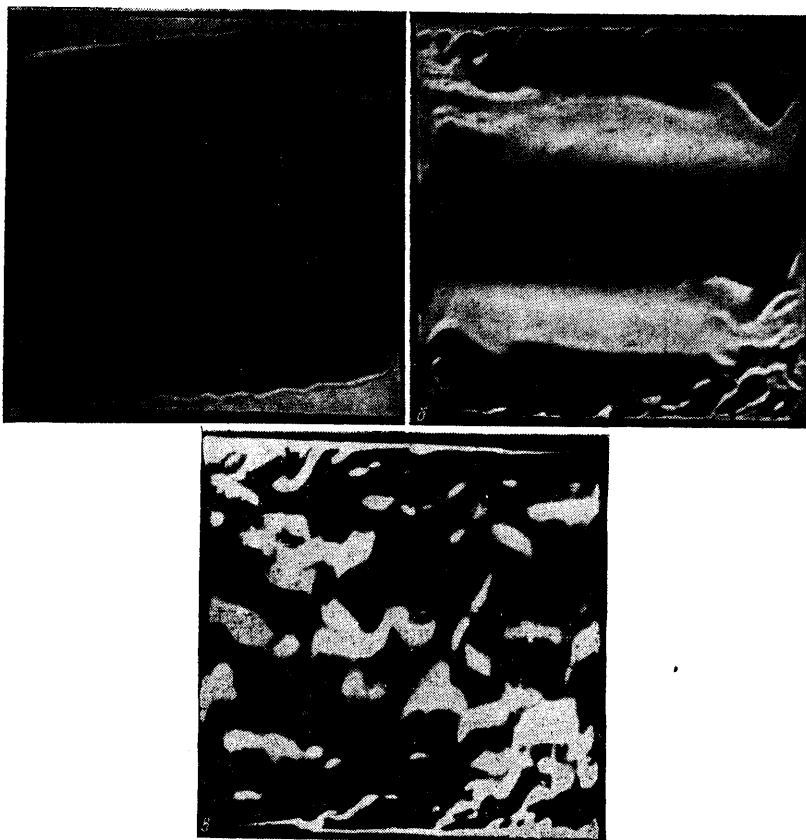
момпар. Для уменьшения теплообмена на торцах температуры на границах полости задавались симметрично относительно комнатной температуры: $\pm\theta/2$ на вертикальных границах и $\pm\phi/2$ — на горизонтальных.

Визуализация температурного поля в жидкости осуществлялась теневым методом с помощью прибора ИАВ-451. Для исследования стационарных температурных полей использовался метод щели и ножа, а для нестационарных — метод цветных полосовых фильтров с регистрацией картины на цветную киноплёнку. Для наблюдения движения в жидкость запускались частицы алюминиевой пудры, а изображение щели в фокальной плоскости теневого прибора полностью перекрывалось ножом. В этом случае прямой пучок света от коллиматора задерживается ножом, а дифрагированный свет дает изображение частиц в виде ярких точек на темном фоне.

Опыты проводились сериями, каждая из которых характеризовалась постоянными значениями высоты полости H и горизонтальной разности температур θ . Вертикальная разность температур в каждой серии уменьшалась от опыта к опыту на некоторую величину, начиная с положительного, не превышающего θ значения ϕ . Положительные значения ϕ соответствуют подогреву верхней и охлаждению нижней границы полости. Несмотря на это при $\phi < \theta$ вблизи горизонтальных границ полости образуются области с неустойчивой стратификацией жидкости. Элементы жидкости, прилегающие к стенкам полости и нагретые в восходящем участке пограничного слоя до температуры $\theta/2$, при движении вдоль верхней границы начинают охлаждаться до температуры $\phi/2$, а охладившиеся в нисходящем потоке нагреваются у нижней границы от $-\theta/2$ до $-\phi/2$. Температура отсчитывается от ее значения в центре полости.

Таким образом, при $\phi < \theta$ на верхней границе полости жидкость охлаждается сверху, а на нижней — нагревается снизу. И то и другое приводит к образованию областей с неустойчивой стратификацией жидкости. Однако при достаточно интенсивном движении пограничный слой может сохранять при этом устойчивость. Такая

ситуация показана на фиг. 1, где приведены изолинии вертикального градиента температуры в полости квадратного сечения при $H=10$ см, $\Theta=16^\circ$, $\Phi=8.7$ град. Карта изолиний построена по результатам обработки теневого фотографирования, полученных на приборе ИАВ-451 методом щели и ножа. Сплошные линии соответствуют градиенту температуры, направленному вверх, а пунктирные – градиенту температуры, направленному вниз.



Фиг. 2

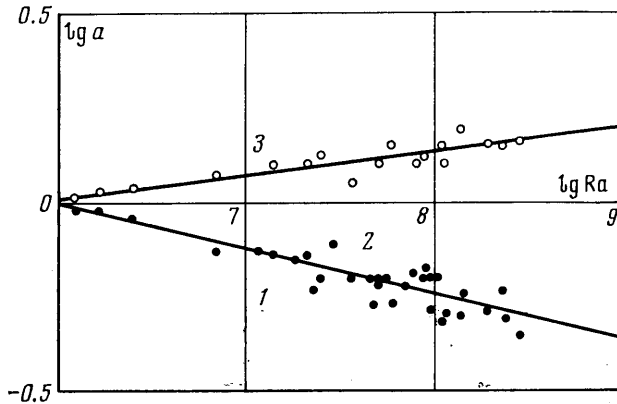
При уменьшении Φ , начиная с некоторого значения Φ_1 , зависящего от Θ и H , в горизонтальных участках пограничного слоя появляются волнообразные возмущения, распространяющиеся в направлении движения жидкости. Попадая в вертикальные участки пограничного слоя, эти возмущения начинают затухать.

Локальная неустойчивость горизонтальных участков пограничного слоя наступает раньше, чем неустойчивость замкнутого пограничного слоя в целом. В некоторых опытах при Φ , несколько большем Φ_1 , с помощью проволоочки, установленной в начале горизонтального участка, в поток вносились одиночные возмущения. Эти возмущения циркулировали в замкнутом пограничном слое, нарастая в горизонтальных участках и затухая в вертикальных, однако после каждого цикла, т. е. после обхода всего контура полости, их амплитуда уменьшалась и в конечном счете они затухали. Малые возмущения, возникающие естественным образом, в таких условиях могут и не проявляться, если за время прохождения неустойчивого участка их амплитуда не успевает достигнуть порога чувствительности используемого в эксперименте метода наблюдения.

При $\Phi < \Phi_1$ волнообразное движение в пограничном слое становится регулярным. Теневая картина такого течения приведена на фиг. 2, а. В центральной части полости продолжает сохраняться значительный вертикальный градиент температуры, соответствующий устойчивой стратификации жидкости в ядре, поэтому возмущения из пограничного слоя в ядро не проникают.

С уменьшением Φ градиент температуры в ядре уменьшается и при некотором отрицательном значении $\Phi = \Phi_2$, соответствующем подогреву нижней и охлаждению верхней границы, становится настолько малым, что возмущения из пограничного слоя проникают в ядро и движение в нем турбулизуется. Теневые фотографии, показывающие проникновение возмущений в ядро и турбулизацию движения в нем, приведены на фиг. 2, б и в.

Обобщенные экспериментальные данные об устойчивости пограничного слоя и переходе от ламинарного движения в ядре к турбулентному приведены на фиг. 3. По оси абсцисс отложен логарифм числа Релея, которое определено через высоту полости H и разность температур Θ . Определенное таким образом число Релея характеризует интенсивность циркуляции жидкости в пограничном слое [1]. По оси ординат



Фиг. 3

отложен логарифм отношения $(\Theta - \Phi)/\Theta = a$. Область 1 на карте устойчивости соответствует стационарному конвективному движению; 2 — волнообразным возмущениям в пограничном слое; 3 — турбулизации ядра.

Аналогичная картина неустойчивости наблюдалась ранее в горизонтальном цилиндре с синусоидальным распределением температуры на границах [2, 3]. Независимое изменение величины и положения максимума температуры на поверхности цилиндрической полости эквивалентно независимому заданию горизонтальной и вертикальной разности температур.

Поступила 14 XI 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Зимин В. Д. Естественная конвекция в замкнутой прямоугольной полости в режиме развитого пограничного слоя. Гидродинамика, вып. 4, Пермь, 1972. Уч. зап. Пермского ун-та, № 293.
2. Шайдунов Г. Ф. Устойчивость конвективного пограничного слоя в жидкости, заполняющей горизонтальный цилиндр. Инж.-физ. ж., 1959, т. 2, № 12.
3. Зимин В. Д. Естественная конвекция внутри горизонтального кругового цилиндра. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 2.

УДК 538.4

НАГРЕВ И ТЕЧЕНИЕ ПРОВОДЯЩЕГО ГАЗА

А. ЖАЙНАКОВ, В. М. ЛЕЛЕВКИН, В. С. ЭНГЕЛЬШТ

(Фрунзе)

Предлагается модель ламинарного течения проводящего газа в канале конического плазматрона и в окружающей неподвижной среде. Уравнения в приближении пограничного слоя записаны с учетом собственных магнитных сил. Проводится численный анализ течения плазмы аргона в аргоновой и воздушной средах.