

ТУРБУЛЕНТНОЕ ПЕРЕМЕШИВАНИЕ НА УСКОРЯЮЩЕЙСЯ
ГРАНИЦЕ РАЗНОПЛОТНЫХ ЖИДКОСТЕЙ¹

Н. Н. АНУЧИНА, Ю. А. КУЧЕРЕНКО, В. Е. НЕУВАЖАЕВ,
В. Н. ОГИБИНА, Л. И. ШИБАРШОВ, В. Г. ЯКОВЛЕВ

(Москва)

Рассмотрена «гравитационная» турбулентность, возникающая на границе раздела несжимаемых жидкостей, находящихся в поле тяжести. Обсуждаются качественные отличия от сдвиговой турбулентности. Приводятся результаты опытов по определению постоянной перемешивания и профилей распределения плотности. Путем двумерных расчетов осуществлены численные эксперименты по перемешиванию. Опыты и расчеты сравниваются между собой и теоретическими результатами работ [1, 2].

Особый вид свободной турбулентности возникает на границах раздела между газами или жидкостями различной плотности при нестационарном движении многослойной одномерной системы из-за неустойчивости Рэлея — Тейлора. Это явление схематизируется моделью: тяжелая жидкость находится над легкой в поле тяжести, характеризующимся ускорением g . Как известно, при постоянном ускорении, отсутствии вязкости и поверхностного натяжения первоначальное синусоидальное возмущение границы в линейном приближении экспоненциально растет со временем, причем инкремент нарастания стремится к бесконечности при стремлении к нулю длины волны. Если в спектре возмущений представлены все длины волн, то найдутся как угодно быстро растущие компоненты. Таким образом, при отсутствии вязкости турбулентность возникает сразу, как только граница становится неустойчивой.

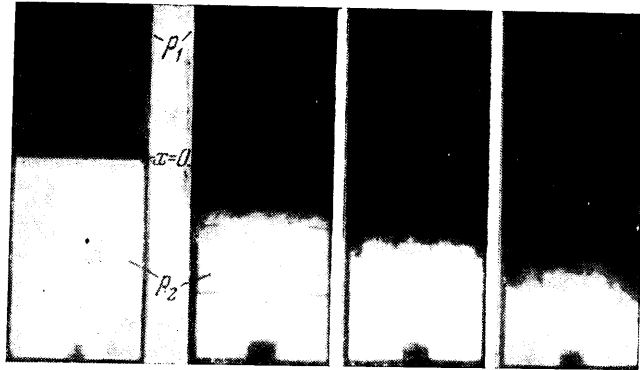
Возникающее движение имеет ряд черт, общих со сдвиговой турбулентностью: беспорядочность, перемежаемость, «забывание» со временем начальных возмущений, перемешивание компонент. Однако есть и особенности. Основная часть турбулентной энергии в рассматриваемом случае содержится не в вихрях, а в беспорядочных струях тяжелой жидкости, проникающих в легкую. Крупномасштабные компоненты существенно изотропны. Далее, «гравитационная» турбулентность нестационарна. Со временем область перемешивания растет, при этом турбулентная энергия черпается из потенциальной благодаря опусканию вниз более плотной жидкости. Некоторое подобие обычной стационарной турбулентности возникает при автомоделных движениях, когда со временем сохраняются безразмерные характеристики движения. Они возможны, когда пренебрежимо малы вязкость и поверхностное натяжение, что характерно для мишеней, облучаемых лазерным или электронным пучком. Для них же не играет роли сдвиговая турбулентность, так как от нее удается избавиться с помощью симметричного сжатия. При автомоделном движении на месте перемешавшихся «языков» возникают новые, более крупные. Их характерные размеры растут пропорционально ширине турбулентной зоны.

Явление гравитационного перемешивания изучено мало. Первое теоретическое рассмотрение проведено в [1].

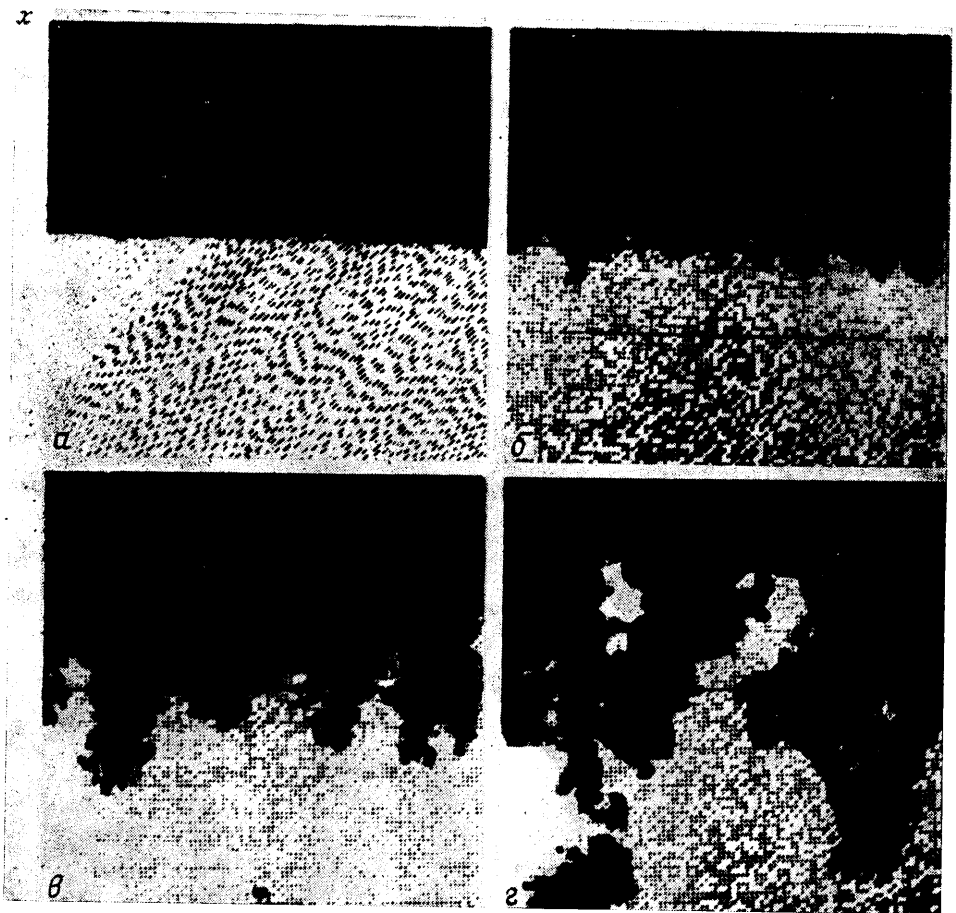
1. Эксперименты по «гравитационному» перемешиванию. Изучалась автомоделная турбулентность, развивающаяся в районе первоначально плоской границы раздела несжимаемых полубесконечных сред с плотностями ρ_1 и ρ_2 под действием постоянного во времени и пространстве ускорения g . Для этого использовались ускорения, достаточные для того, чтобы вязкостью ν и поверхностным натяжением σ можно было пренебречь: $g \gg g_1 = \nu^2 l_t^{-3}$, $g \gg g_2 = \sigma \rho^{-1} l_t^{-2}$, l_t — «турбулентная длина перемешивания».

Для таких жидкостей, как вода, водные растворы солей, ртуть $\nu \leq 0.02$ стокс, $\sigma \rho^{-1} \leq 100$ см³·сек⁻². Измерения велись при $l_t \geq 0.1$ см (ширине зоны перемешивания $L \geq 0.3$ см), т. е. $g_1 \leq 0.4$ см·сек⁻², $g_2 \leq 10^4$ см·сек⁻², и при ускорениях, превышающих 10^5 см·сек⁻², условия автомоделности обеспечивались.

¹ Доложено на IV съезде по теоретической и прикладной механике, Киев, 21-28 мая 1976 г.



Фиг. 1



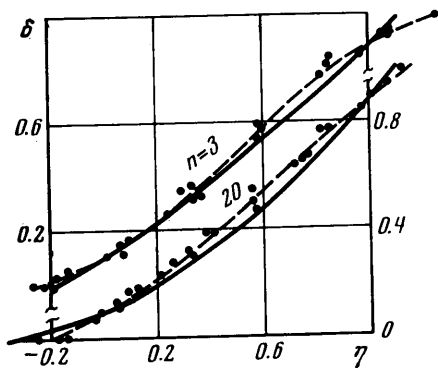
Фиг. 2

В экспериментальной установке замкнутый сосуд, содержащий легкую жидкость, налитую поверх тяжелой, с момента $t=0$ подвергался большому ускорению вниз, в результате чего развивалось перемешивание. Распределение средних концентраций измерялось с помощью импульсной рентгеновской аппаратуры по плотности почернения на рентгенограмме. Типичные рентгенограммы представлены на фиг. 1 (первая из них относится к $t=0$), жидкости — ртуть и вода.

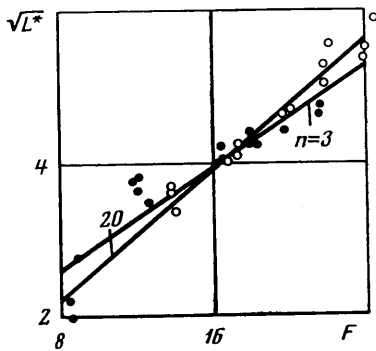
На данной установке можно было получать и переменное ускорение. Интересно отметить, что при серии дельтаобразных ускорений перемешивания не наблюдалось в отличие от [3].

2. Численные эксперименты. Численные исследования гравитационной турбулентности проводились путем решения системы неосредненных уравнений, описывающих двумерное газодинамическое движение, в следующей постановке.

В двумерном пространстве, ограниченном жесткими прямыми стенками, в поле тяжести помещены два газовых слоя различной плотности (более тяжелый газ сверху, перепад плотностей 2). При $t=0$ они находятся в гидростатическом равновесии, граница между ними — ломаная линия со случайными вершинами, колеблющаяся около прямой, перпендикулярной полю тяжести (имитация случайных возмущений). Газы рассматривались идеальными с $\gamma=5/3$, невязкие. Выбиралось достаточно большое



Фиг. 3



Фиг. 4

значение их начальной температуры, чтобы сжимаемость была несущественна (использованный вычислительный метод неприменим к строго несжимаемым газам) — выполнялось неравенство $a^2 \geq gh$, где a — скорость звука, h — размеры слоев. Рассматривалось как адиабатическое, так и изотермическое движение.

Расчеты проводились по программе, реализующей на ЭВМ метод частиц в ячейке [4, 5]. При расчете смеси предполагалось, что компоненты находятся в состоянии термодинамического равновесия.

На фиг. 2 показана начальная геометрия и ряд последовательных стадий развития турбулентности в одном из расчетов. Фигуры имеют некоторые погрешности ввиду ограниченной разрешающей способности графопостроения. Между изображениями на различных стадиях прослеживается как бы подобие, т. е. растут как продольные, так и поперечные характерные размеры турбулентности, что указывает на приближительную автомодельность. Отметим, что эта черта присуща только турбулентности, так как при росте регулярного (периодического) возмущения характерные поперечные размеры, представляющие собой период, сохраняются. Прослеживаются и другие признаки того, что данные расчеты воспроизводят турбулентность: перемешивание, «забывание» начальных условий (они варьировались в разных расчетах) в основных характеристиках движения, рост L пропорционален t^2 и т. д.

Отметим, что рост зоны турбулентного перемешивания происходит несимметрично относительно первоначальной поверхности раздела веществ, причем тяжелое вещество дальше проникает в легкое, в соответствии с результатами полуэмпирической теории и эксперимента.

На фиг. 2 видны также довольно крупные, мало перемешанные «языки» одного газа, проникающего в другой. На рентгенограммах фиг. 1 различить отдельные языки трудно, поскольку их изображения налагаются одно на другое.

При обработке расчетных данных определялась концентрация $c(x)$ как доля массы тяжелого вещества в массе горизонтального слоя шириной Δx . Профили $c(x)$ в различные моменты времени имеют разрыв первой производной на краях области перемешивания. По значениям концентрации $c(x)$ определялась ширина зоны перемешивания L в различные моменты времени: считалось, что горизонтальный слой Δx входит в зону перемешивания, если $0.01 \leq c \leq 0.99$.

3. Сравнение с теорией. Существует полуэмпирическая теория гравитационного перемешивания [1, 2, 6, 7], развитая в основном для автомодельного движения. Перемешивание описывается турбулентной диффузией статистически средней концентрации $c(x)$ одного из веществ, где x — расстояние от первоначальной границы.

С экспериментами сравнивались результаты работы [6], где перемешивание описывается системой уравнений с двумя эмпирическими постоянными α_0 и α_1 и

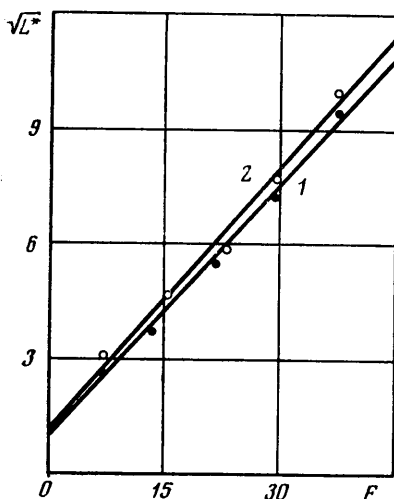
учтена инерция. Теоретические безразмерные профили концентрации или плотности зависят только от параметра $\alpha_0^2 \alpha_1^{-1}$. В широком диапазоне $0.06 \leq \alpha_0^2 \alpha_1^{-1} < \infty$ профили почти одинаковые, близкие к экспериментальным, принято рекомендованное из теоретических соображений [6] значение $\alpha_0^2 \alpha_1^{-1} = 0.061$. Сравнивались профили $\delta(\eta)$, где $\delta = (\rho_1 - \rho_2)(\rho_1 + \rho_2)^{-1}$, $\eta = (x-a)(b-a)^{-1}$, $\delta(a) = 0.1$, $\delta(b) = 0.9$. На фиг. 3 показаны теоретические кривые $\delta(\eta)$ при $\alpha_0^2 \alpha_1^{-1} = 0.061$ и экспериментальные точки.

Параметр $\alpha_0 = l_1 L^{-1}$ выбирался путем сравнения экспериментальной и теоретической ширины перемешивания [6]: $L = \alpha_0^2 f(n) g t^2$, где $n = \rho_1 \rho_2^{-1}$, $f(n) \approx (1 + 0.05 \ln n) \ln n$ в диапазоне $1 \leq n \leq 100$. Поскольку края зоны перемешивания определяются неточно, при обработке экспериментов использовалось соотношение

$$(3.1) \quad L^* = \alpha_0^2 f^*(n) g t^2$$

где $L^* = b - a$ — расстояние между точками, $\delta = 0.9$ и 0.1 , $f^*(n) \approx (0.825 - 0.007 \ln n) \ln n$.

Результаты нескольких серий опытов с различными значениями n показаны на фиг. 4. Некоторое изменение g за время измерений (до 30%) учитывалось подстановкой удвоенного смещения сосуда $2L_s$ вместо gt^2 в формулу (3.1). Наклон прямой, проведенной через точки плоскости $\sqrt{L^*}$, $\sqrt{f^*(n) 2L_s} = F$, дает значения $\alpha_0^2 = 0.023 \pm 0.004$ для $n=3$ и $\alpha_0^2 = 0.041 \pm 0.002$ для $n=20$. Разница довольно заметна и объяснения пока не получила. Указанные прямые не проходят через начало координат, что связано, по-видимому, с начальными возмущениями.



Фиг. 5

На фиг. 5 на плоскости F , $\sqrt{L^*}$ показаны обработанные результаты численных экспериментов. Значение α_0^2 оказалось равным 0.05 ($n=2$) как для адиабатического (прямая 1), так и изотермического (прямая 2) движения.

Итак, есть согласие в теоретических и экспериментальных безразмерных профилях. Однако величина α_0^2 , характеризующая ширину области перемешивания, оказалась различной в опытах с $n=3$ и 20, а также в численных экспериментах с двукратным движением ($n=2$). Максимальное различие не превышает 2.

В заключение авторы благодарят Р. И. Ардашеву, С. И. Балабину, В. Е. Котляра, Г. Г. Томашева за помощь в проведении экспериментов.

Поступила 19 VII 1977

ЛИТЕРАТУРА

1. Белецкий С. З., Фрадкин Е. С. Теория турбулентного перемешивания. Тр. Физ. ин-та АН СССР, 1965, т. 29.
2. Неуважаев В. Е., Яковлев В. Г. К теории турбулентного перемешивания границы раздела жидкостей в поле тяжести. ПМТФ, 1976, № 4.
3. Андронов В. В., Базрах С. М., Мешков Е. Е., Мохов В. Н., Никифоров В. В., Певницкий А. В., Гошмяков А. И. Турбулентное перемешивание на контактной поверхности, ускоряемой ударными волнами. ЖЭТФ, 1976, т. 71, вып. 2.
4. Харлоу Ф. Х. Численный метод частиц в ячейках для задач гидродинамики. В сб. «Вычислительные методы в гидродинамике». М., «Мир», 1967.
5. Анучина Н. Н. О методах расчета течений сжимаемой жидкости с большими деформациями. Числ. методы мех. сплошной среды, 1970, т. 1, № 4.
6. Неуважаев В. Е., Яковлев В. Г. Турбулентное перемешивание границы раздела в численном газодинамическом расчете. Ж. вычислит. матем. и матем. физ., 1976, т. 16, № 2.
7. Гамалий Е. Г., Неуважаев В. Е., Шибаршов Л. И. Об устойчивости одномерного адиабатического движения газа. Числ. методы мех. сплошной среды, 1976, т. 7, № 1.