

03

Измерение скорости вещества в зоне гравитационного турбулентного перемешивания газов при низких числах Рейнольдса

© А.В. Павленко, А.А. Тяктев, И.Л. Бугаенко

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина,
Снежинск, Челябинская область
E-mail: dep5@vniitf.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2010 г.

Представлены результаты измерения распределения скорости вещества в зоне гравитационного турбулентного перемешивания двух разноплотных газов, вызванного действием неустойчивости Рэлея–Тейлора в поле тяжести Земли. Исследования проведены с использованием однокомпонентного лазерного доплеровского анемометра, что позволило измерить амплитудно-временные распределения модуля вертикальной и горизонтальной проекции компонент вектора скорости вещества неустойчивых систем с числами Атвуда 0.23 и 0.83.

Гидродинамические неустойчивости, возникающие на контактной границе разноплотных сред, существенным образом влияют на характер развития последующего гидродинамического течения. Одним из видов неустойчивостей, часто встречающимся и в природных явлениях, и в различных технических устройствах, является неустойчивость Рэлея–Тейлора. Этот тип неустойчивости на плоской контактной границе разноплотных сред всякий раз, когда градиенты плотности и давления на этой границе направлены навстречу друг другу [1,2]. В этом

случае любое малое возмущение на границе начинает неограниченно возрастать. Тяжелое вещество „проваливается“ в легкое в виде „струй“, а легкое начинает „всплывать“ в виде „пузырей“. Со временем происходит переход к турбулентной стадии течения.

К настоящему времени интегральные характеристики гравитационного турбулентного перемешивания (ГТП) (безразмерная скорость роста ширины зоны перемешивания, распределение средней плотности по зоне перемешивания, асимметрия перемешивания) в широком диапазоне чисел Атвуда хорошо известны [3] и используются для калибровки моделей 1-го уровня замыкания [4–6]. Более сложные модели турбулентности [7,8], а также сложные гидродинамические коды [9] используют данные о спектральных [10] и импульсных характеристиках перемешивания. Одной из импульсных характеристик является локальная скорость среды в зоне перемешивания.

В данной работе представлены результаты измерения распределений средних значений модуля вертикальной V_z и горизонтальной V_x проекций компонент вектора скорости вещества \mathbf{V} в локальной области зоны гравитационного турбулентного перемешивания.

Для проведения исследований при низких числах Рейнольдса выбрана постановка эксперимента по изучению неустойчивости Релея–Тейлора в поле тяжести Земли, когда тяжелое вещество находится над легким.

Исследования проводились в измерительной камере, состоящей из двух отсеков высотой по 300 mm, снабженных прозрачными окнами, между которыми размещалась горизонтальная разделительная мембрана. Разделительная мембрана представляет собой жидкую пленку толщиной $\sim 1 \mu\text{m}$, нанесенную на сетку с шагом $8 \times 8 \text{ mm}$ из медных микропроводников диаметром $50 \mu\text{m}$. В собранном состоянии в измерительной камере формировался канал квадратного сечения $138 \times 138 \text{ mm}^2$ высотой 600 mm. При этом отсеки заполнялись исследуемыми газами таким образом, чтобы тяжелый газ располагался над легким. За некоторое время до начала эксперимента в отсек, занимаемый легким газом, равномерно добавлялись трековые частицы микронного размера, представляющие собой продукты термического разложения глицерина. В момент времени $t = 0$ на разделительную мембрану подавался электрический импульс. Жидкая пленка разрушалась, и на контактной границе начинался процесс развития турбулентного перемешивания, обусловленный действием неустойчивости

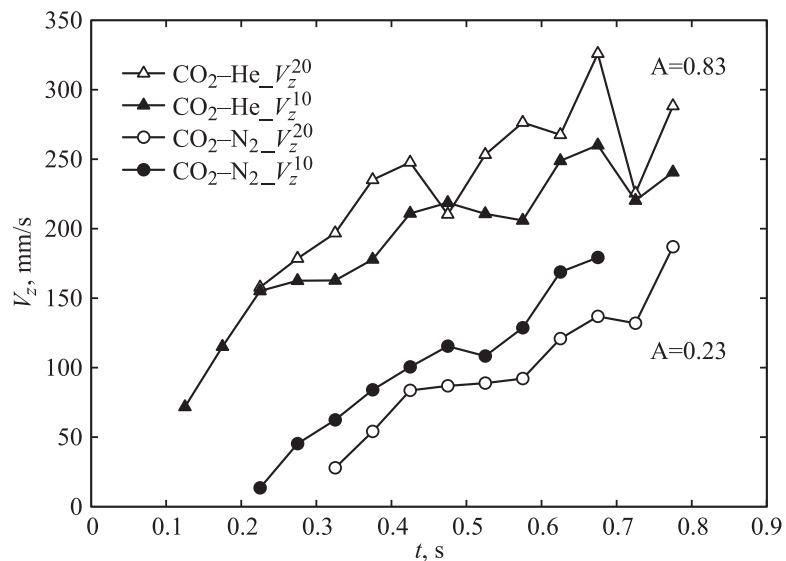


Рис. 1. Зависимость средних значений модуля вертикальной компоненты проекции вектора скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания от времени.

Рэля-Тейлора. Измерение скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания разноплотных газов проводилось однокомпонентным лазерным доплеровским анемометром (ЛДА) [11]. Анемометр настраивался таким образом, чтобы измерения модуля компоненты вектора скорости проводились на оси измерительной камеры, на расстояниях 10 и 20 мм над контактной границей. Погрешность измерения скорости трековой частицы не превышала 8%.

Было проведено 2 группы опытов с парами газов: углекислый газ (CO_2 , плотность $\rho_2 = 1.98 \text{ kg/m}^3$)–гелий (He , плотность $\rho_1 = 0.178 \text{ kg/m}^3$) и углекислый газ–азот (N_2 , плотность $\rho_1 = 1.25 \text{ kg/m}^3$). Соответственно для первой пары газов число Атвуда

$$A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

составило 0.83, а для второй — 0.23.

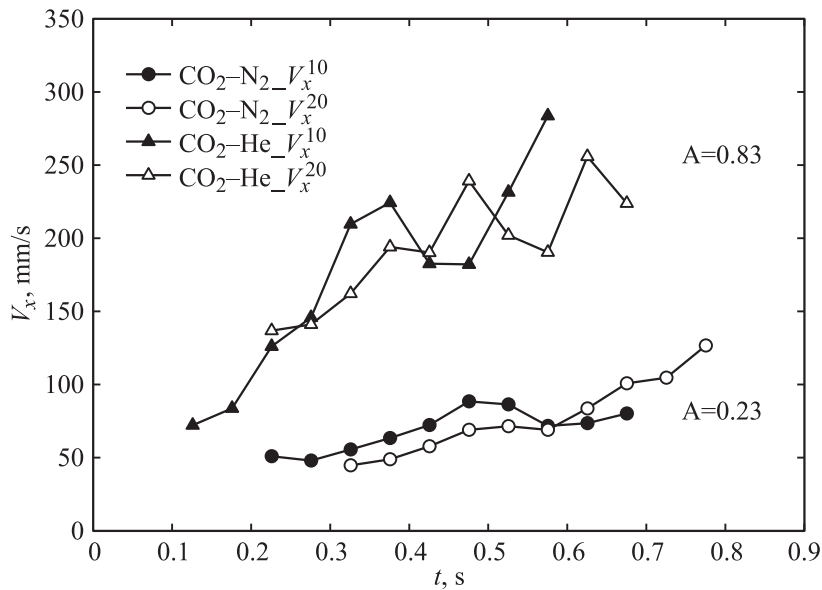


Рис. 2. Зависимость средних значений модуля горизонтальной компоненты проекции вектора скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания от времени.

В экспериментах по исследованию развития зоны турбулентного перемешивания для системы CO₂-He число Рейнольдса составляло $Re \sim 10^3$. Для экспериментов с системой CO₂-N₂ — $Re \sim 10^2$.

Каждая группа состояла из четырех серий по 15 экспериментов. В каждой серии проводились измерения одной из компонент проекции модуля вектора скорости на расстоянии 10 или 20 mm над контактной границей ($V_x^{10}, V_z^{10} : V_x^{20}, V_z^{20}$).

В результате были получены зависимости средних значений модуля вектора скорости в локальной области зоны гравитационного турбулентного перемешивания от времени в поле тяжести Земли для вертикальной V_z и горизонтальной V_x компонент (рис. 1, 2).

В настоящее время для координаты границы зоны ГТП в области тяжелого вещества $L_{12}(t)$, на автомодельной стадии турбулентности

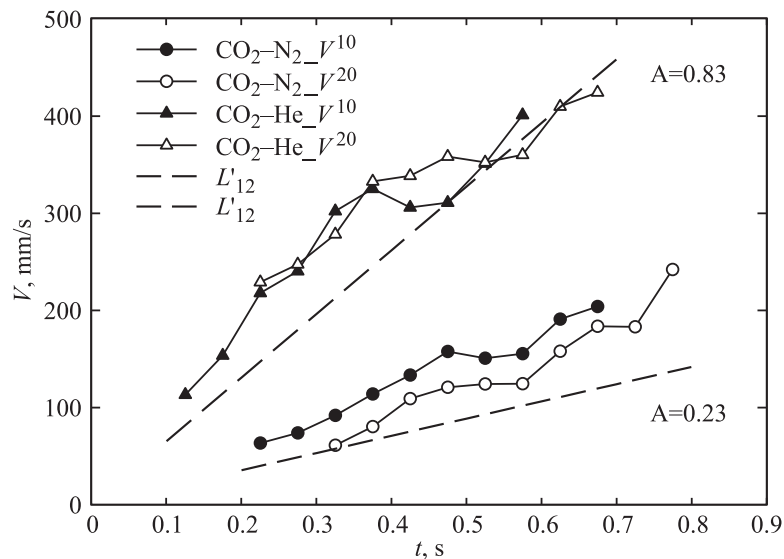


Рис. 3. Зависимость средних значений модуля вектора скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания от времени. L'_{12} — рассчитанная по зависимости (1) скорость движения границы зоны ГП в области тяжелого вещества для различных чисел Атвуда.

принято использовать выражение [5,6]:

$$L_{12}(t) = l_{12} + \alpha A g t^2, \quad (1)$$

где l_{12} — ширина зоны перемешивания в момент выхода на автомодельную стадию, A — число Атвуда. Коэффициент α принято называть безразмерной скоростью перемешивания, его значение, определенное в экспериментах для смешивающих сред, равно $\alpha \approx 0.04$.

Предположив, что распределение направления движения в горизонтальной плоскости равновероятно, определим среднее значение модуля скорости вещества \mathbf{V} в зоне турбулентного перемешивания как

$$V = \langle |\mathbf{V}| \rangle = \sqrt{2V_x^2 + V_z^2}. \quad (2)$$

На рис. 3 представлена зависимость от времени среднего значения модуля скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания, полученная по зависимости (2). Здесь же пунктиром показана зависимость

скорости движения границы зоны ГТП в области тяжелого вещества, рассчитанная из (1).

В целом можно отметить, что значения среднего модуля скорости вещества в зоне турбулентного перемешивания превышают скорость движения границы зоны ГТП в области тяжелого вещества.

Таким образом, в результате проведенных экспериментов по исследованию характеристик зоны турбулентного перемешивания разнотных газов, вызванной действием неустойчивости Рэлея–Тейлора в поле тяжести Земли с числами Атвуда 0.23 (при значениях числа Рейнольдса $Re \sim 10^2$) и 0.83 (при значениях числа Рейнольдса $Re \sim 10^3$), получены зависимости средних значений модуля вектора скорости в зоне турбулентного перемешивания от времени для вертикальной V_z и горизонтальной V_x компонент, что дало возможность рассчитать зависимость средних значений модуля вектора скорости V в зоне турбулентного перемешивания от времени.

Список литературы

- [1] *Rayleigh Lord* // Proc. Lond. Math. Soc. 1883. V. 14. P. 170–177. (Reprinted in Scientific Papers. Cambridge University Press, 1900. V. 2. P. 200–207).
- [2] *Taylor G.I.* // Proc. Roy. Soc. A. 1950. V. 201. N 1065. P. 192–196.
- [3] *Кучеренко Ю.А., Томашев Г.Г., Шибаршов Л.И.* // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика. В. 1. С. 13–16.
- [4] *Беленький С.З., Фрадкин Е.С.* // Труды ФИАН им. Лебедева. 1965. Т. 29. С. 207.
- [5] *Авраменко М.И.* О К-ε модели турбулентности. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005. 76 с.
- [6] *Неуважаев В.Е.* Математическое моделирование турбулентного перемешивания. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2007. 157 с.
- [7] *Gregoire O., Souffland D.* // Proc. 7th Intern. Workshop Physics Compressible Turbulent Mixing. St-Petersburg (Russia). 5–9 July, 1999. Sarov. RFNC–VNIEF Printing House. 2001. P. 252–258.
- [8] *Anuchin M.G.* // Proc. 9th Intern. Workshop physics Compressible Turbulent Mixing. Cambridge (England). 19–23 July, 2004. www.iwpctm.org.
- [9] *Schilling O.* // Proc. 8th Intern. Workshop Physics Compressible Turbulent Mixing. Pasadena (USA). 9–14 December, 2001. www.iwpctm.org.
- [10] *Кучеренко Ю.А., Павленко А.В., Шестаченко О.Е., Балабин С.И., Пылаев А.П., Тяктев А.А.* // ПМТФ. 2010. Т. 51. С. 3–13.
- [11] *Дубнищев Ю.Н., Ринкявичус Б.С.* Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. С. 304.