

УДК 532

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЙ ПРИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЯХ

© 2011 г.

Н.В. Невмержицкий

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики, г. Саров

postmaster@ifv.vniief.ru

Поступила в редакцию 16.05.2011

Приведен обзор экспериментальных работ по исследованию эволюции возмущений и турбулентного перемешивания в жидких и газовых средах при развитии гидродинамических неустойчивостей. В частности, показано, что: развитие возмущений и турбулентного перемешивания в газах чувствительно к числу Маха ударной волны; характер проникновения фронта газа в жидкость при увеличении числа Рейнольдса течения от $5 \cdot 10^5$ до 10^7 не изменяется; смена знака числа Атвуда с положительного на отрицательный приводит к остановке проникновения фронта газа в жидкость, однако ширина зоны перемешивания расширяется по инерции.

Ключевые слова: гидродинамические неустойчивости, турбулентное перемешивание, ударная волна, число Атвуда, число Маха ударной волны, локальное возмущение.

Введение

Гидродинамические неустойчивости (ГН) Рэлея – Тейлора (Р-Т) [1], Рихтмайера – Мешкова (Р-М) [2, 3] и связанное с ними турбулентное перемешивание (ТП) может приводить к нарушению симметрии схождения оболочек мишеней инерциального термоядерного синтеза, перемешиванию материала оболочки с термоядерным горючим, что сильно снижает нейтронный выход.

Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований этих проблем, полученные в РФЯЦ–ВНИИЭФ в последние годы.

Влияние турбулентного перемешивания на устойчивость ударной волны

Проведены исследования развития ТП на контактной границе газов, обладающих различной сжимаемостью (воздух, He, CO₂, SF₆), в диапазоне чисел Маха ударной волны (УВ) от 1.5 до 9.5. Эксперименты проводились на ударной трубе [4]. Показано, что с повышением сжатия газов контактная граница и, соответственно, передний фронт зоны перемешивания приближаются к фронту УВ и при $M \geq 8$ в SF₆ передний фронт зоны перемешивания упирается в УВ, и волна искажается. На рис. 1 представлена кинограмма экспериментов; здесь обо-

значено: УВ – ударная волна; В – воздух; И – искривленный фронт УВ; X₁ – передний фронт зоны ТП; X₂ – задний фронт зоны ТП; КГ – первоначальное положение контактной границы; M₂ – число Маха УВ в SF₆.

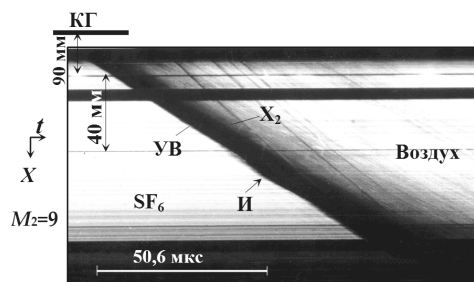


Рис. 1

Влияние сжимаемости «тяжелого» газа на развитие двумерных локальных возмущений

На контактных границах (КГ) веществ могут присутствовать так называемые локальные (занимающую малую площадь) возмущения: стыки оболочек термоядерной мишени, царапины, возмущения от разнодинамичности лазерных импульсов и т.д. Развитие этих возмущений может приводить к асимметрии схождения оболочек мишени и их прорыву. Проведены исследования развития 2D-возмущений в

форме паза и излома контактной границы *воздух*–*SF₆* при различных числах Маха УВ.

Эксперименты показывают, что с увеличением сжатия «тяжелого» газа характер развития возмущений изменяется не только количественно, но и качественно: возмущение в форме излома КГ при малых числах Маха развивается в виде вихря, при больших – в виде струи (рис. 2). Это связано с торможением развития вихря ударной волной при больших числах Маха из-за близости УВ и КГ.

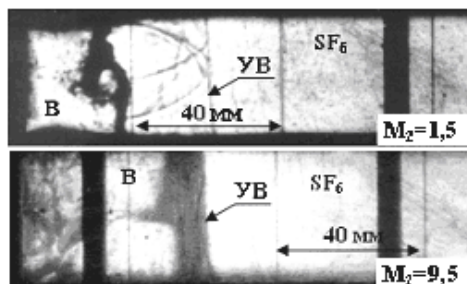


Рис. 2

Влияние числа Маха ударной волны на рост зоны перемешивания

Результаты экспериментов по исследованию развития ТП в газах (воздух, Хе, CO₂, SF₆) в диапазоне чисел Маха УВ 1.5–9 показали, что с увеличением интенсивности УВ степень затухания турбулентности уменьшается, ширина зоны перемешивания и скорость ее роста увеличиваются. Это приводит к росту показателя степени p в k – ϵ модели [5] от ≈ 0.3 до ≈ 0.6 .

Развитие турбулентного перемешивания на границе газ–жидкость

Проведены исследования развития ТП на границе газ–жидкость на крупномасштабной установке КУ-210, которая позволяет получать течение с рекордными для таких исследований значениями ширины зоны перемешивания (до 200 мм) и чисел Рейнольдса (до 10^7). Показано, что автомодельная константа, характеризующая темп проникновения фронта газа в жидкость, составляет $\alpha_2 = 0.075 \pm 0.005$ и при $Re \geq 10^5$ не зависит от повышения Re [6].

Развитие полусферического локального возмущения на границе газ–жидкость

Полусферическое локальное возмущение, заданное на неустойчивой границе газ–жидкость, при Р–Т неустойчивости развивается в виде квазиокруглого пузыря, опережающего фронт зоны ТП. Со временем оно выходит на автомодельный режим развития. При этом время выхода на этот режим увеличивается с увеличением его начального размера.

Влияние знакопеременности числа Атвуда на развитие перемешивания

При развитии Р–Т неустойчивости возможна ситуация, когда «легкое» вещество сжимается до такой степени, что его плотность становится больше плотности «тяжелого», т.е. число Атвуда меняет знак. Экспериментальные исследования данной ситуации на границе SF₆–вода показали, что при высоком сжатии газа (до 500 атм) в условиях, когда число Атвуда $A \leq 0$, проникновение фронта газа в жидкость останавливается, но образовавшаяся при $A > 0$ зона перемешивания продолжает медленно расширяться в SF₆ по инерции [7].

Выводы

Результаты работы расширяют рамки познаний в области исследования гидродинамических неустойчивостей и могут быть использованы для тестирования расчетных методик.

Список литературы

1. Taylor G.I. // I. Proc. Roy. Soc. 1950. A201. P. 192.
2. Richtmyer R.D. Commun // Pure Appl. Math. 1960. V. 13. P. 297.
3. Мешков Е.Е. // МЖГ. 1969. №5. С. 151–158.
4. Невмержицкий Н.В. и др. // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 612–617.
5. Авраменко М.И. // О k – ϵ модели турбулентности. Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 2005.
6. Невмержицкий Н.В. и др. // XI Харитоновские тематические научные чтения. 2009. С. 583–588.
7. Невмержицкий Н.В. и др. // IX Харитоновские тематические научные чтения. 2007. С. 617–622.

**SOME PECULIARITIES OF TURBULENT MIXING GROWTH AND PERTURBATIONS
DURING HYDRODYNAMIC INSTABILITIES**

N.V. Nevmerzhitskiy

Experimental works on the research of evolution of large-scale perturbations and turbulent mixing in liquid and gaseous media during the growth of hydrodynamic instabilities are reviewed. In particular, it is shown that growth of perturbations and turbulent mixing in gases is sensitive to Mach number of the shock wave; the character of the gas front penetration into the liquid is not changed as the Reynolds number of flow increases from $5 \cdot 10^5$ to 10^7 ; change of the sign of Atwood number from positive to negative causes stop of the gas front penetration into the liquid, whereas the mixing zone width is expanded under inertia.

Keywords: hydrodynamic instabilities, turbulent mixing, shock wave, the Atwood number, the Mach number of shock wave, local perturbation.