

УДК 532.517.4

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ РИХТМАЙЕРА — МЕШКОВА ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ

А. А. Тяктев, А. В. Павленко, Н. Б. Аникин,
И. Л. Бугаенко, Ю. А. Пискунов

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. Е. И. Забабахина, 456770 Снежинск, Россия
E-mails: dep5@vniitf.ru, avpavlenko@vniitf.ru, dep5@vniitf.ru, dep5@vniitf.ru, dep5@vniitf.ru

Для лабораторных исследований неустойчивостей Рихтмайера — Мешкова и Рэлея — Тейлора в качестве контактной границы газовых сред предложено использовать медленное ламинарное пламя, которое представляет собой тонкий (менее 1 мм) газовый слой, разделяющий среды с различными плотностями. Возможности предложенного подхода к созданию контактной границы показаны на примере взаимодействия ударной волны с ламинарным пламенем в бедной (объемная доля водорода 6 %) водородно-воздушной смеси. Развитие неустойчивости Рихтмайера — Мешкова на границе раздела тяжелой (холодной) и легкой (горячей) смесей зарегистрировано с помощью теневого метода.

Ключевые слова: неустойчивость Рихтмайера — Мешкова, ламинарное пламя, ударная волна.

DOI: 10.15372/PMTF20200201

Введение. Неустойчивости Рэлея — Тейлора и Рихтмайера — Мешкова развиваются на границе раздела сред с разными плотностями, со временем формируя зону турбулентного перемешивания. Первая неустойчивость [1, 2] постоянно генерируется квазистационарным потенциальным полем сил, вторая развивается по инерции после импульсного воздействия на границу раздела [3, 4] ударной волны.

Развитие неустойчивостей зависит от начальных условий на границе раздела сред: отклонения нормали к поверхности раздела от направления действия силы в момент ее возникновения или в момент разрушения разделительной мембраны, предварительно установленной на границе раздела сред с разными плотностями [5–7].

В работе [4] в основном исследовалась автомодельная стадия развития зоны турбулентного перемешивания. Однако в технических устройствах перемешивание на границе раздела сред нежелательно и его необходимо минимизировать, поэтому особенно важно исследовать развитие неустойчивостей на ранних стадиях [8].

Основной проблемой на стадии подготовки экспериментов с известными начальными возмущениями границы раздела газовых сред, наиболее подходящих для исследования неустойчивостей в сжимаемых средах в лабораторных условиях, является разделение газов с разными плотностями. В экспериментах используются мембранные [4] и безмембранные [9] способы разделения.

Мембранный способ [4] предполагает наличие на контактной границе тонкой разделительной мембраны, плотность материала которой на три порядка больше плотности газов. Влияние мембраны на течение вблизи границы может быть очень значительным и даже определяющим.

При использовании безмембранной технологии граница раздела формируется динамически и свободна от третьего вещества [9]. Однако наличие диффузионного слоя большой толщины (более 10 мм) оказывает существенное влияние на развитие неустойчивостей.

В работе [10] исследовалось воздействие слабых ударных волн на стехиометрическое пропан-воздушное пламя. За ударной волной пламя деформировалось, существенно ускорилось и генерировало вторичные ударные волны.

В настоящей работе исследуется развитие неустойчивости Рихтмайера — Мешкова медленного ламинарного пламени в случае отсутствия нагрева газа в ходе эксперимента. Тогда пламя можно считать пассивным разделительным слоем.

Фронт ламинарного пламени, толщина которого может варьироваться от десятых долей до нескольких миллиметров, разделяет холодную (тяжелую) горючую смесь и горячие (легкие) продукты сгорания и может рассматриваться в качестве контактной границы газов с разными плотностями при исследовании гидродинамических неустойчивостей.

Постановка экспериментов. Экспериментальные исследования проводились в вертикальной ударной трубе с квадратным сечением размерами 138×138 мм. Камера высокого давления (КВД) длиной 1780 мм располагалась в верхней части ударной трубы. Перед началом эксперимента КВД отделялась от камеры низкого давления (КНД) мембраной из лавсана, после чего давление в трубе уменьшалось до значения порядка 0,1 кПа. Далее КВД наполнялась азотом до достижения давления 300 кПа, а КНД — предварительно перемешанной горючей смесью водорода ($6,0 \pm 0,2$ % объема газа) с воздухом до достижения давления 100 кПа. КНД длиной 1980 мм включала измерительную секцию с оптическими окнами и датчиком давления. Верхний край окон располагался на расстоянии 1107 мм от лавсановой мембраны.

В экспериментах сначала инициировалось пламя высоковольтным разрядом в искровом промежутке, расположенном на расстоянии 140 мм от нижнего торца трубы. В определенный момент времени после воспламенения лавсановая мембрана, разделяющая КВД и КНД, принудительно разрывалась. В результате формировалась стационарная ударная волна, распространяющаяся сверху вниз по тяжелому газу и импульсно ускоряющая движение фронта пламени, трансформирующегося под действием неустойчивости Рихтмайера — Мешкова.

К моменту прихода пламени в измерительную секцию давление в КНД увеличивалось до 130 кПа, а после прохождения ударной волны — до 204 кПа. Такой перепад давления соответствует числу Маха падающей волны $M \approx 1,22$.

Эволюция поверхности пламени в измерительной секции ударной трубы исследовалась с помощью метода высокоскоростной теневой фоторегистрации с использованием прибора ИАБ-451 и скоростной видеокамеры. Размеры оптического окна незначительно превышали размеры области изображения (124×198 мм) и определялись оптическими характеристиками прибора ИАБ и видеокамеры. Пространственное разрешение всего фоторегистрирующего тракта составляло не менее 0,4 мм.

В первом эксперименте регистрировались взаимодействие ударной волны с пламенем и развитие неустойчивости Рихтмайера — Мешкова на ранних стадиях. Полученные теневые изображения приведены на рис. 1.

В 6 %-й смеси пламя, заполнив сечение канала, распространяется вверх (см. рис. 1, а, б). Пламя, форма которого подобна полусфере, представляет собой тонкую трехмерную границу раздела тяжелого газа (несгоревшей водородно-воздушной смеси) и легкого газа (продуктов сгорания).

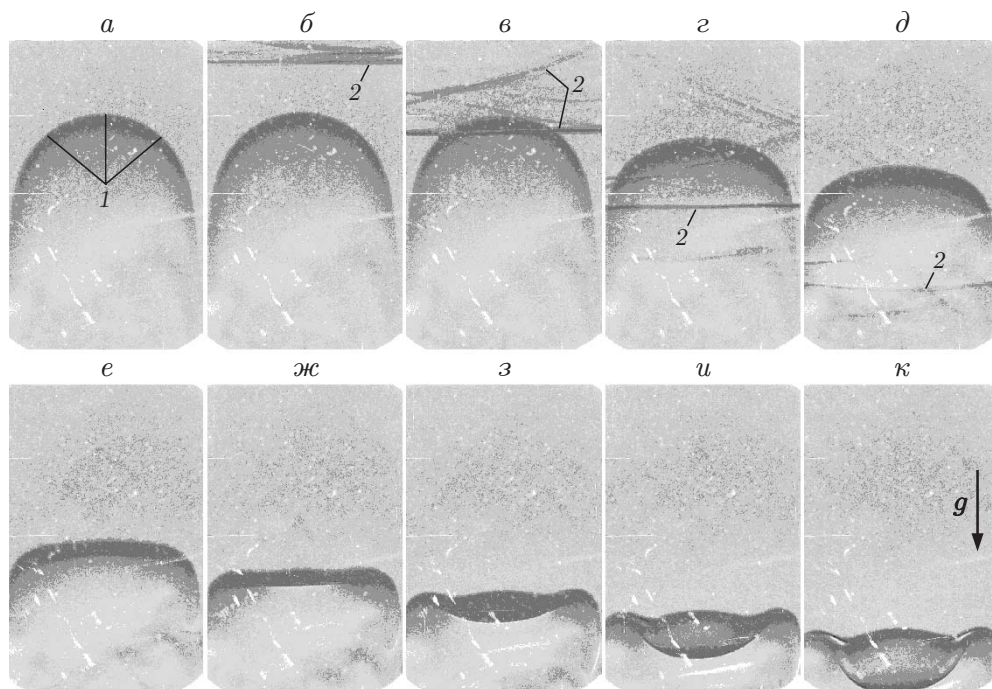


Рис. 1. Форма границы раздела двух сред в различные моменты времени (первый эксперимент):

a — $t = 1,5$ с, $б$ — $t = 1,526$ с, $в-к$ — шаг по времени 116,3 мкс; 1 — граница раздела (пламя), 2 — ударная волна

Управляющий импульс подавался на систему принудительного раскрытия мембраны КВД через 1,5 с после воспламенения (см. рис. 1, a). Еще через 2,7 мс (рис. 1, $в$) на расстоянии 50 мм ниже края окна ударная волна достигала пламени.

Во втором эксперименте регистрировались более поздние стадии развития неустойчивости (рис. 2). Управляющий импульс подавался приблизительно на 0,405 с позднее, чем в первом эксперименте. За это время пламя поднималось приблизительно на 180 мм выше верхнего края оптического окна, где встречалось с ударной волной. Еще приблизительно через 1,3 мс (см. рис. 2, a) вследствие течения за ударной волной пламя возвращалось в окно.

Результаты исследования и их обсуждение. От концентрации водорода в смеси зависят форма поверхности пламени, его толщина и безразмерное число Атвуда A , определяющее характер развития неустойчивости. Начальное давление смеси позволяет эффективно варьировать число Маха ударной волны.

Пламя в 6 %-й смеси представляет собой гладкую тонкую поверхность, что свидетельствует о его ламинарном характере. Элементарная оценка толщины ламинарного пламени [11]

$$l \approx \lambda C/U$$

связывает длину свободного пробега λ , скорость звука C и скорость горения при нормальных условиях U . Для 6 %-й водородно-воздушной смеси толщина пламени равна $l \approx 0,8$ мм, число Атвуда $A \approx 0,44$. Расчетные значения величин для ламинарного пламени взяты из работы [12].

Полученное значение толщины пламени является рекордно малым для безмембранного разделительного слоя. По фотографиям трудно точно определить толщину пламени,

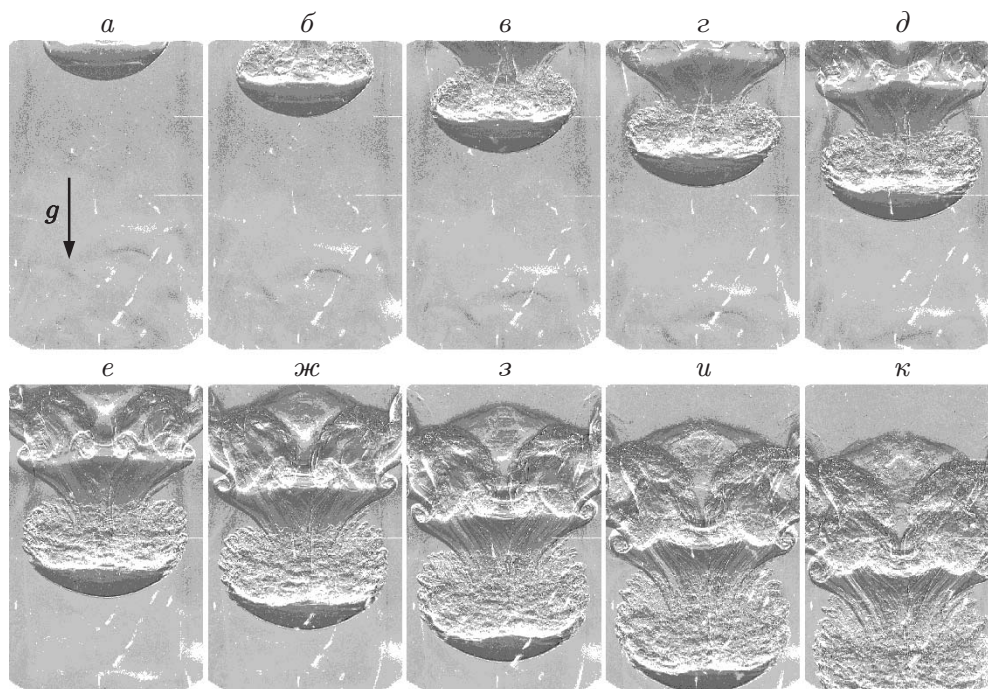


Рис. 2. Форма границы раздела двух газовых сред в различные моменты времени (второй эксперимент):

a — $t = 1,963$ с, b – k — шаг по времени 116,3 мкс

однако его граница является очень контрастной, что позволяет считать элементарную оценку достоверной.

Результаты экспериментов показывают, что можно пренебречь горением и считать пламя контактной границей между газами с разными плотностями, поскольку за 2,6 мс пламя самостоятельно сдвигается лишь на 1,5 мм (см. рис. 1, $a, б$), а в течении за ударной волной за 1 мс — приблизительно на 200 мм (см. рис. 2).

На рис. 1, $a-d$ показано взаимодействие пламени и ударной волны. Поскольку ударная волна распространяется из тяжелого газа в легкий, начальная куполообразная форма контактной границы (пламени) после взаимодействия “инвертируется”, формируя струю тяжелого газа в легком.

Далее устойчивая гладкая верхняя часть струи увеличивается, растягиваясь в торидальном вихре. Края струи быстро теряют гладкость, разрушаясь под действием неустойчивости Кельвина — Гельмгольца. На рис. 2, $г-к$ над первым вихрем отчетливо виден второй. На рис. 2, $е$ в углах трубы появляются пузыри легкого (горячего) газа, увеличивающиеся в размерах. На рис. 2, $ж, з$ видна небольшая струя, направленная вверх.

Заключение. Предложен новый экспериментальный подход к исследованию неустойчивостей Рихтмайера — Мешкова и Рэлея — Тейлора в газовых средах. Пара газов разной плотности, разделенная тонким переходным слоем, формируется в результате горения бедной (объемная доля водорода 6 %) водородно-воздушной смеси, а поверхность пламени представляет собой контактную границу сред с разными плотностями.

Преимуществами предложенного способа формирования контактной границы являются отсутствие плотной разделительной пленки, малая толщина переходного слоя (менее 1 мм), возможность варьирования значений числа Атвуда и формы границы, а также возможность проведения исследований при больших значениях числа Маха ударной волны. Полученные теневые изображения течения пригодны для верификации кодов, моделирующих гидродинамические неустойчивости.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Rayleigh**. Investigation of the character of the equilibrium of an incompressible heavy fluid of variable density // Proc. London Math. Soc. 1883. V. 14. P. 170–177.
2. **Rayleigh**. Scientific papers. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1900. V. 2.
3. **Richtmyer R.** Taylor instability in a shock acceleration of compressible fluids // Comm. Pure Appl. Math. 1960. V. 13. P. 297–319.
4. **Мешков Е. Е.** Неустойчивость контактной границы газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. Механика жидкости и газа. 1969. № 5. С. 151–158.
5. **Brouillette M.** The Richtmyer — Meshkov instability // Annual Rev. Fluid Mech. 2002. V. 34. P. 445–468.
6. **Янилкин Ю. В.** Математическое моделирование турбулентного перемешивания в сжимаемых средах: Курс лекций / Ю. В. Янилкин, В. П. Стаценко, В. И. Козлов. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2009.
7. **Разин А. Н.** Моделирование неустойчивости и турбулентного перемешивания в слоистых системах. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010.
8. **Hurricane O. A., Herrmann M. C.** High-energy-density physics at the National Ignition Facility // Annual Rev. Nuclear Particle. Sci. 2017. V. 67. P. 213–230.
9. **Jones M. A., Jacobs J. W.** A membraneless experiment for the study of Richtmyer — Meshkov instability of a shock-accelerated gas interface // Phys. Fluids. 1997. V. 9. P. 3078–3085.
10. **Markstein G. H.** Shock-tube study of flame front-pressure wave interaction // Proc. of the 6th symp. combust. N. Y.: Reinhold, 1957. P. 387–398.
11. **Зельдович Я. Б.** Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович, Г. М. Махвиладзе. М.: Наука, 1980.
12. **Raman K. S.** Laminar burning velocities of lean hydrogen — air mixtures: Rep. / Explosion Dynamics Lab. N FM97-15. Pasadena, 1998.

*Поступила в редакцию 10/VII 2019 г.,
после доработки — 21/IX 2019 г.
Принята к публикации 28/X 2019 г.*
