

Е.Е. Мешков

**ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

Е. Е. Мешков

**ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ
НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ В ЛАБОРАТОРНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТАХ**

Под редакцией доктора физ.-мат. наук А. В. Певницкого

Саров
2006

ББК 22.253.3

М 55

УДК 532.23

Мешков Е. Е. Исследования гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах / Под редакцией доктора физ.-мат. наук А. В. Певницкого. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2006. – 139 с., ил.
ISBN 5-9515-0069-9

Гидродинамические неустойчивости границы сред разной плотности – неустойчивость Рэлея – Тейлора (гравитационная неустойчивость) и неустойчивость, индуцируемая ударной волной (неустойчивость Рихтмайера – Мешкова), – имеют обширный круг приложений в физике высоких плотностей энергии, астрофизике и других областях науки и техники. В книге дан обзор результатов исследований этих неустойчивостей в лабораторных экспериментах методами, развиваемыми в течение последних 40 лет в Российском федеральном ядерном центре – ВНИИЭФ и в последние годы – в учебно-исследовательской гидродинамической лаборатории в Саровском государственном физико-техническом институте (СарФТИ). Эти методы основаны на применении лабораторных импульсных источников энергии: сжатый газ, детонирующие газовые смеси; электрический взрыв в сочетании с тонкоплёночными газовыми моделями в ударных трубах разных типов и студневых моделями.

Наряду со сведениями, опубликованными ранее в различных (порой труднодоступных) источниках, приведены оригинальные результаты.

Книга рассчитана, в первую очередь, на аспирантов и студентов-физиков, вычислительных математиков, занимающихся вопросами нелинейной физики, инерционного термоядерного синтеза. Она также будет полезна всем, кто интересуется проблемами гидродинамической неустойчивости и турбулентности.

ISBN 5-9515-0069-9

© Мешков Е. Е. (автор), 2005

© ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2006

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Глава 1. Неустойчивость Рэля – Тейлора	
1.1. Основные понятия	8
1.2. Экспериментальные методы исследования	12
1.2.1. Метод студней	12
1.2.2. Метод жидких слоев	18
1.3. Начальные возмущения. Линейная и нелинейная стадии развития	19
1.3.1. Периодическое двумерное возмущение. Стадии развития возмущения	20
1.3.2. Локальные возмущения	23
1.3.3. Разнодинамичность как источник начальных возмущений. Возмущения давления на неустойчивой границе слоя	26
1.3.4. Изломы неустойчивой границы как источник начальных возмущений	29
1.4. Турбулентное перемешивание	32
1.5. Развитие неустойчивости Рэля – Тейлора в цилиндрической и сферической геометрии	37
1.6. Развитие неустойчивости Рэля – Тейлора в средах с прочностью	42
1.7. Влияние турбулентного перемешивания на динамику слоистых систем	47
1.8. Развитие неустойчивости Рэля – Тейлора на границе слоя диспергированной среды	50
Глава 2. Неустойчивость контактной границы, ускоряемой ударной волной	
2.1. Основные понятия	53
2.2. Методы исследования неустойчивости, индуцированной ударной волной. Ударные трубы	55
2.3. Развитие возмущений ударных волн и волн разрежения. Нелинейные эффекты	63
2.4. Развитие возмущений границы раздела двух газов, ускоряемой стационарной ударной волной	71
2.5. Турбулентное перемешивание на границе двух газов, ускоряемой ударными волнами. Структура зоны турбулентного перемешивания	82

2.6. Особенности развития неустойчивости границы двух газов, ускоряемой нестационарной ударной волной. Ацетиленовая ударная труба	98
Глава 3. Гидродинамические неустойчивости и турбулентное перемешивание в некоторых практических задачах	
3.1. Снижение взрывных нагрузок	108
3.2. Тушение пламени аэрозвесью диспергированной воды	113
3.3. Получение смеси диспергированной жидкости с газом при помощи поршневой машины	117
Приложение: Оценка параметров течения в ударной трубе методом P-и-диаграмм	121
Литература	126

Dalziel S. (1993). Perturbations and coherent flow in Rayleigh-Taylor instability // Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England / Ed. by P. F. Linden, D. L. Youngs, S. B. Dalziel. Cambridge University Press, 1993. P. 32–41.

Dimonte G., Schneider M. (2000). Density ratio dependence of Rayleigh-Taylor mixing for sustained and impulsive acceleration histories // Physics of Fluids. Vol. 12, No. 4. P. 304–321.

Drucker D. C. (1980). "Taylor instability" of a surface of an elastic-plastic plate // Mechanics Today. Vol. 5. P. 37–47.

Duff R., Harlow F., Hirt C. (1962). Effect of diffusion on interface instability between gases // Phys. Fluids. Vol. 5. P. 417–425.

Farley D. R., Peyser T. A., Miller P. L., Logory M. L., Stry P. E., Burke E. W. (1997). Experimental investigation of the compressible Richtmyer-Meshkov instability from a broad-spectrum, multimode initial perturbation // Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France. P. 161–166.

Galametz I., Delouis G., Thorembeys M., Rayer C., Rodriguez G., Haas J.-F. (1995). Visualization of shocked mixing zones using differential interferometry and X-rays // Proc. of the 5th IWPCTM, Stony Brook, New York, USA / Ed. by R. Youngs, J. Glimm, B. Boston. P. 221.

Glendenning S. G., Marinak M. M., Haan S. W., Kalantar D. H., Budil K. S., Wallace R. J., Weber S. W., Colwin J. D., Remington B. A., Cherfil C., Galmiche D., Richard A., Hsing W. W., Kane J., Arnett D. (1997). Hydrodynamic instability experiments on the Nova Laser // Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France. P. 173–178.

Holder D. W., North R. J. (1963). Schlieren methods. National Physical Laboratory // Science. Vol. 31.

Houas L., Brun R., Hanana M. (1986). Experimental investigation of shock-interface interactions // AIAA. Vol. 24, No. 8. P. 1254.

Houas L., Farhat A., Ramdani A., Fortes J., Brun R. (1987). Concentration and temperature profiles in a shocked gaseous interface // Proc. of the 16th Int. Symp. on Shock Waves and Shock Tubes, Aachen, Germany. P. 831–837.

Houas L., Touat A., Jourdan G. (1995). Richtmyer-Meshkov mixing zone study by a multidirectional laser absorption technique // Phys. Rev. Vol. 52. P. 5344–5351.

Houas L., Meshkov E., Jourdan G. (1999). Overview of diagnostic methods used in shock-tube investigations of mixing induced by Richtmyer-Meshkov instability // Shock Waves. Vol. 9. P. 249–257.

Jacobs J. W. (1992). Shock-induced mixing of a light gas cylinder // J. Fluid Mech. Vol. 234. P. 629.

Jacobs J. W., Jenkins D. G., Klein D. L., Benjamin R. F. (1993). Experimental study of instability growth patterns of a shock-accelerated thin fluid layer // Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England. Cambridge University Press, 1993.

Jacobs J. W., Klein D. L., Jenkins D. G., Benjamin R. F. (1993). Instability growth patterns of a shock-accelerated thin fluid layer // Phys. Rev. Lett. Vol. 70. P. 583.

Jacobs J. W., Niederhaus (1999). On the transition to turbulence in Richtmyer-Meshkov instability // Proc. of the 7th IWPCTM, St.-Petersburg, Russia. P. 41–47.

Jacobs J. W., Collins B. D. (1999). Experimental study of the Richtmyer-Meshkov instability of a diffuse interface // Proc. of the 22nd Int. Symp. on Shock Waves, Imperial College, London, UK, 18–23 July. P. 859.

Jahn R. (1956). The refraction of shock waves at a gaseous interface // J. Fluid Mech. Vol. 1. P. 457.

Jones M. A., Jacobs J. W. (1997). A membraneless experiment for the study of Richtmyer-Meshkov instability of a shock accelerated gas // Phys. Fluids. Vol. 9. P. 3078.

Jourdan G., Houas L., Haas J.-F., Ben-Dor G. (1997). Thickness and volume measurements of a Richtmyer-Meshkov instability-induced mixing zone in a square shock tube // J. Fluid Mech. Vol. 349. P. 67–94.

Inogamov N. A. (1999). The role of Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities in astrophysics // Astrophys. Space. Phys. Vol. 10.

Kamchibekov M. D., Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V., Sotskov E. A. (1997). On the gas-liquid interface shape effects on turbulent mixing // Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France / Ed. by G. Jourdan, L. Houas. P. 238–244.

Kucherenko Yu., Shibarshov L., Chitaikin V., Balabin S., Pylaev A. (1991). Experimental study of the gravitational turbulent mixing self-similar mode // Proc. of the 3rd IWPCTM, Abbey of Royaumont, France. P. 427–454.

Landeg D., Philpot M., Smith I., Smith A. (1993). The laser sheet as a quantitative diagnostic in shock tube experiments // Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England / Ed. by P. F. Linden, D. L. Youngs, S. B. Dalziel. Cambridge University Press. P. 230–239.

Lebedev A. I., Nizovtsev P. N., Rayevsky V. A., Solovyov V. P. (1995). Rayleigh-Taylor instability in strong media, experimental study // Proc. of the 5th IWPCTM, Stony Brook, New York, USA / Ed. by R. Young, J. Glimm, B. Boston. P. 138–142.

Lewis D. J. (1950). The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes. Part II // Proc. Royal Soc. Vol. A202. P. 1068, 81–96.

Markstein G. H. (1957). Flow disturbances induced near a slightly wavy contact surface of a flame front traversed by a shock wave // *J. of the Aeronautical Sci.* Vol. 24. P. 238–239.

Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V. (1991). About turbulent mixing dynamics at unstable boundary of liquid layer, accelerated by compressed gas // *Proc. of the 3rd IWPCTM, Abbey of Royaumont, France.* P. 467.

Meshkov E. E. (1992). Instability of shock-accelerated interface between two media // *Advances in compressible turbulent mixing / Ed. by A. C. Buckingham, C. E. Leith, P. Dannevik. Proc. Of the 1th IWPCTM, Princeton, 1st IWPCTM Princeton, USA, 1988.* P. 473–503.

Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V., Rogachov V., Zhidov I. (1993). Turbulent mixing development investigation with converging jelly rings // *Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England / Ed. by P. F. Linden, D. L. Youngs, S. B. Dalziel. Cambrige University Press.* P. 578.

Meshkov E. E. (1995). One approach to the experimental study of hydrodynamic instabilities: creation of a gas-gas interface using the dynamic technique // *Proc. of the 5th IWPCTM, Stony Brook, USA / Ed. by R. Young, J. Glimm, B. Boston.* P. 237.

Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V., Pavlovskii V. A., Rogatchov V. G., Zhidov I. G. (1995). Jelly Technigue applications in evolution study of hydrodynamic instabilites on unstable plane and gylindrical surfaces // *Ibid.* P. 243–250.

Meshkov E. E., Nevmerzhitsky N. V., Zmushko V. V. (1997A). On possibilites of investigating hydrodynamic instabilites and turbulent mixing development in spherical geometry // *The Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France / Ed. by L. Houas, G. Jourdan.* P. 343.

Meshkov E. E., Nikiforov V. V., Tolshmyakov A. L. (1997B). Investigation into turbulent mixing development at the gas-gas interface driven by a convergent cylindrical shock wave // *Ibid.* P. 348.

Meshkov E. E., Tolshmyakov A. L. (1999). Study of the effect of eccentricity in converging shock on light-gas compression by a heavy one for cylindrical geometry // *Proc. Of the 7th IWPCTM, St.-Petersburg, Russia / Ed. by E. Meshkov, Yu. Yanilkin, V. Zhmailo.* P. 98–103.

Meshkov E., Nevmerzhitsky N., Senkovsky E., Sotskov E., Til'kunov V. (1999). The growth of local perturbation on unstable surface of liquid layer driven by compressed gas // *Proc. of the 7th IWPCTM, St.-Petersburg, Russia / Ed. by E. Meshkov, Yu. Yanilkin, V. Zhmailo.* P. 95.

Meshkov E. (2004). On new possible directions of hydrodynamical instabilities and turbulent mixing investigations for the solution some practical problems // *Abstracts of the papers of the 9th IWPCTM, Cambridge, UK, 19–23 July 2004.* P. 74.

- Meyer K. A., Blewett P. J.* (1972). Numerical investigation of the stability of a shock-accelerated interface between two fluids // *Phys. Fluids*. Vol. 15, No. 5. P. 753–759.
- Mikaelian K.* (1998). Analitic approach to nonlinear Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities // *Phys. Rev. Lett.* Vol. 80, No. 3. P. 508.
- Miles J. W.* (1960). Taylor instability of a flat plate // *General Atomics Rep. GAMD-7335*.
- Nevmerzhitsky N., Meshkov E., Ioilev A., Zhidov I., Pylev I., Sokolov S.* (1993). Wave processes effect on the dynamics of turbulent mixing at liquid layer surface accelerated by compressed gas // *Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England / Ed. by P. F. Linden, D. L. Youngs, S. B. Dalziel. Cambridge University Press. P. 112.*
- Oades K.* (1997). Measurements of Turbulent Richtmyer-Meshkov mixing on the AWE HELEN Laser // *Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France. P. 393–398.*
- Parkes J. H., Salter S. H.* (1996A). Improvement in and relating to explosion suppression // *UK patent, GB 2 292 997.*
- Parkes J. H., Salter S. H.* (1996B). Improvements in decontamination // *UK patent, GB 2 294 105.*
- Parkes J. H.* (1998). Suppressing explosion and installation // *UK patent, GB 2 306 884.*
- Poggi F., Thorembe M. H., Rodriguez G., Haas J. F.* (1998). Velocity measurements in turbulent gaseous mixtures induced by Richtmyer-Meshkov instability // *Phys. Fluids*. Vol. 10, No. 11. P. 2698–2700.
- Prestridge K., Vorobieff P., Rightley P. M., Benjamin R. F.* (1999). Flow visualization and PIV measurement of the mixing evolution of a shock-accelerated gas curtain // *Proc. of the 22nd Int. Symp. on Shock Waves, Imperial College, London, UK, 18–23 July.*
- Raevsky V. A.* (1995). Rayleigh-Taylor instability effects in acceleration of plane solid layer // *Proc. of the 5th IWPCTM, Stony Brook, New York, USA / Ed. R. Young, J. Glimm, B. Boston. P. 60–65.*
- Rayleigh Lord* (1883). // *Proc. London Math. Soc.* Vol. 14. P. 70.
- Rightley P. M., Vorobieff P., Martin R., Benjamin R. F.* (1999). Experimental observations of the mixing transition in a shock-accelerated gas curtain // *Phys. of Fluids*. Vol. 11, No. 1. P. 186–200.
- Richard A., Croso H., Valadon M., Muchielli F., Salvatore P., Reverdin C., Lamontagne O., Zielinski F., Meyer B.* (1997). Indirect drive ablation front instability experiments on Phebus // *Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France. P. 428–433.*
- Richtmyer R. D.* (1960). Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // *Commun. Pure Appl. Math.* Vol. 13. P. 297.

Rogatchov V., Zhidov I., Klopov B., Meshkov E., Tolshmyakov A. (1991). Non-Stationary flows in the proximity of angular points of gas accelerated liquid layer // Proc. of the 3rd IWPCTM, Abbey of Royaumont, France. P. 1.

Rodriguez G., Galametz I., Croso H., Haas J. F. (1993). Richtmyer-Meshkov instability in a vertical shock tube // Proc. of the 4th IWPCTM, Cambridge, England, UK / Ed. by P. F. Linden, D. L. Youngs, S. B. Dalziel. Cambridge University Press. P. 260–269.

Shaner J. W. (1984). Pattern formation by shock processes // Physica. Vol. 12D. North-Holland, Amsterdam. P. 154–162.

Sadot O., Erez L., Alon U., Oron D., Levin L., Erez G., Ben-Dor G., Shvarts D. (1997). Experimental and theoretical study of nonlinear evolution of single-mode and two-bubble interaction under Richtmyer-Meshkov instability // Proc. of the 6th IWPCTM, Marseille, France. P. 440–445.

Smith A., Holder D. A., Philpott M. K., Millar D. B. (1999). Notch and double bump experiments using the 200×100 mm linear shock tube // Proc. of the 7th IWPCTM, St.-Petersburg, Russia / Ed. by E. Meshkov, Yu. Yanilkin, V. Zhmailo. P. 124–130.

Taylor G. I. (1950). The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // Proc. Royal Soc. Vol. A201. P. 192.

Youngs D. (1992). Experimental Investigation of turbulent mixing by Rayleigh-Taylor instability. Advances in compressible turbulent mixing / Ed. A. C. Buckingham, C. E. Leith, P. Dannevik. P. 607–626.

Youngs D. (1994). Numerical simulation of mixing by Rayleigh-Taylor and Richtmyer-Meshkov instabilities // Laser and Particle Beams. Vol. 12, No. 4. P. 725–749.

Мешков Евгений Евграфович

**Исследования гидродинамических неустойчивостей
в лабораторных экспериментах**

Редактор *Зимакова Н. Ю.*

Корректор *Костюничева Н. Ю.*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *Фролова С. Н.*

Подписано в печать 08.12.2005 г. Формат 70×100/16

Печать офсетная Усл. печ. л. ~ 11,2 Уч.-изд. л. ~ 12,5

Тираж 300 экз. Заказ 1252-2005

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе
ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ"

607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23