

# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ РИХТМАЕЙРА – МЕШКОВА, РЭЛЕЙ – ТЕЙЛОРА И КЕЛЬВИНА – ГЕЛЬМГОЛЬЦА НА МОЩНЫХ ЛАЗЕРНЫХ УСТАНОВКАХ

## MODELING OF RICHTMYER – MESHKOV, RAYLEIGH – TYLOR AND KELVIN – HELMHOLTZ INSTABILITY DEVELOPMENT ON POWER LASER FACILITIES

*О. Г. Котова, И. В. Глазырин, К. Ф. Гребёнкин, Н. А. Михайлов, К. С. Назаров, А. В. Павленко, А. В. Потанов, М. Н. Чижков*

*O. G. Kotova, I. V. Glazyrin, K. F. Grebenkin, N. A. Mikhailov, K. S. Nazarov, A. V. Pavlenko, A. V. Potanov, M. N. Chizhkov*

Российский Федеральный Ядерный Центр – ВНИИ Технической Физики  
им. акад. Е. И. Забабахина, Россия, Снежинск, Челябинская обл., Россия, 456770

Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Scientific Research  
Institute of Technical Physics, 456770, Snezhinsk, Chelyabinskaya reg., Russia

Применение мощных лазерных установок для исследования газодинамических неустойчивостей Кельвина – Гельмгольца, Рихтмайера– Мешкова и Релея– Тейлора позволяет проводить эксперименты в сильно сжимаемых средах при высоких плотностях энергии. В работе приводятся результаты численного моделирования развития перечисленных газодинамических неустойчивостей. Результаты сравниваются с экспериментальными данными и данными численного моделирования.

Power laser facilities allow to investigate Richtmyer–Meshkov, Rayleigh–Tyler, Kelvin–Helmholtz hydrodynamic instabilities in strongly compressible fluid at high energy density physics. The work presents the results of numerical simulation of above-listed hydrodynamic instabilities development. Simulation results are compared to experiment and numerical model data.

### Введение

К настоящему времени накоплен обширный экспериментальный материал, позволяющий верифицировать программы по интегральным характеристикам зон турбулентного перемешивания: ширине зоны, скорости ее роста, распределения средней плотности на автомодельной стадии. Однако интегральных характеристик не всегда достаточно для верификации полуэмпирических моделей турбулентности.

Эксперименты на мощных лазерных установках демонстрируют новые возможности исследования неустойчивостей на контактных границах разноплотностных материалов в экстремальном термодинамическом состоянии. Эксперименты такого рода проводятся на установках: ГАРПУН, ИСКРА-3, NIKE, Shen Guang II, Shen Guang III, OMEGA, NIF.

Наиболее перспективной схемой для исследования гидродинамических неустойчивостей на ла-

зерных установках является схема миниатюрной ударной трубы, реализованная на установке OMEGA (энергия 5 кДж, длительность импульса 1 нс). Схема позволяет варьировать форму возмущения на контактной границе, отношения плотностей веществ, а также изменять начальные параметры системы по температуре и распределению давления действием вспомогательных греющих лучей.

Цель данной работы – проверить способность программы Фокус [1] корректно моделировать эксперименты с лазерной энергией 5 Дж, чтобы затем, опираясь на полученный опыт, получить оценки для энергии 2 кДж.

### Исследование неустойчивостей Рэлея – Тейлора и Рихтмаейра – Мешкова на лазерной установке OMEGA

В данном эксперименте исследовалась эволюция контактной границы разноплотностных сред с

периодическими комбинированными возмущениями, развивающаяся под действием неустойчивостей Рэля – Тейлора (РТ) и Рихтмайера – Мешкова (РМ). Опыты [2] проводились на установке OMEGA с использованием 10 лазерных пучков (энергия импульса – 5 кДж, длительность импульса – 1 нс, интенсивность облучения –  $6 \times 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>), которые генерировали ударную волну с числом Маха  $M = 15$ . Мишень состояла из полиамидного аблятора с плотностью 1,42 г/см<sup>3</sup> и пенопластовой нагрузочной секции с плотностью 0,1 г/см<sup>3</sup>. Для уменьшения боковой разгрузки вся сборка помещалась в миниатюрную ударную трубу из бериллия (см. рис. 1).

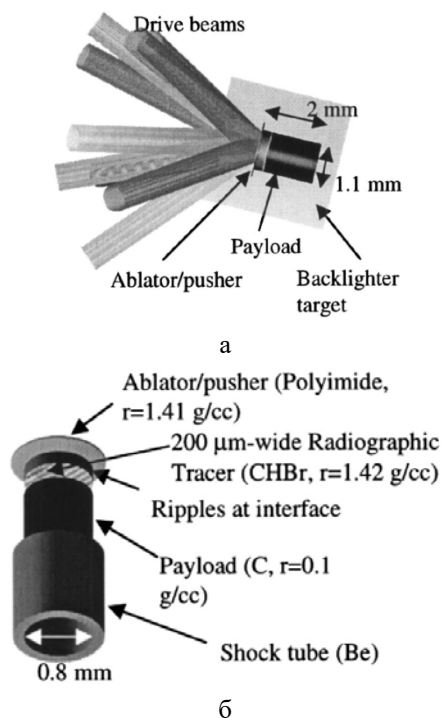


Рис. 1. Схема эксперимента [2] на установке OMEGA (а), структурный состав мишени (б)

Фронт ударной волны (УВ) за 1 нс импульсно ускоряет контактную границу (КГ) до скорости 70 км/с, что приводит к возникновению неустойчивости Рихтмайера – Мешкова. Затем в течение 40 нс граница замедляется, что приводит к возникновению на ней условий для развития неустойчивости Рэля – Тейлора. Процесс диагностируется рентгеновской методикой.

Начальные возмущения наносятся только на поверхность полиамида, поверхность пенопласта остается плоской. При этом длинноволновые возмущения границы (1-я мода) имеют длину волны

50 мкм и амплитуду 2,5 мкм, тогда как в случае 2-модовой границы к длинноволновому добавляется коротковолновое возмущение (10-я мода) амплитудой 0,25 мкм и длиной волны 5 мкм. Второй вариант 2-модовой границы отличается сдвигом фаз коротковолновой моды на  $\pi/2$ .

Моделирование описанного эксперимента по программе Фокус проводилось в двумерной плоской постановке. При этом были выбраны только длинноволновые возмущения, оба вещества (полиамид и пенопласт) соприкасались полностью без зазора. В силу специфики эйлерового подхода была задана дополнительная низкоплотная область для описания отраженной УВ (см. рис. 2).



Рис. 2. Схема расчетной области для моделирования развития РТ и РМ неустойчивостей. 4 подобласти: 1 – для учета отраженной УВ (газ,  $\rho = 0,01$  г/см<sup>3</sup>), 2 – область энерговыделения, 3 – ударник (1,42 г/см<sup>3</sup>) и 4 – углеродистая пена (0,1 г/см<sup>3</sup>). Размеры указаны в мм

В предположении равномерного выделения энергии лазерного импульса (ЛИ) по всей площади фокального пятна на глубину скин-слоя 10 мкм рассчитана удельная энергия  $45 \cdot 10^7$  Дж/г. Зависимость энерговыделения от времени задана в виде  $dE/dt = \epsilon_0 f(t)$ , где функция  $f(t)$  имеет вид трапеции, площадь которой равна 1 (см. рис. 3, а), длительность линейного роста и спада амплитуды – 0,2 нс. Значение поглощенной энергии  $\epsilon_0 = 1,57 \cdot 10^5$  Дж/г·нс вычислено таким образом, что положение УВ и КГ согласуется с экспериментом 1 (см. рис. 3, б). Данное значение соответствует коэффициенту поглощения энергии лазерного импульса 35 %.

Результаты двумерных расчетов по программе Фокус сравнивались с результатами 2D моделирования по программе CALE [3]. Сравнение показало, что контактная граница в расчете Фокус движется в среднем на 15 % медленнее, чем в расчете по программе CALE (см. рис. 4). Однако темп замедления границы на этапе торможения близкий, когда создаются условия для развития неустойчивости РТ.

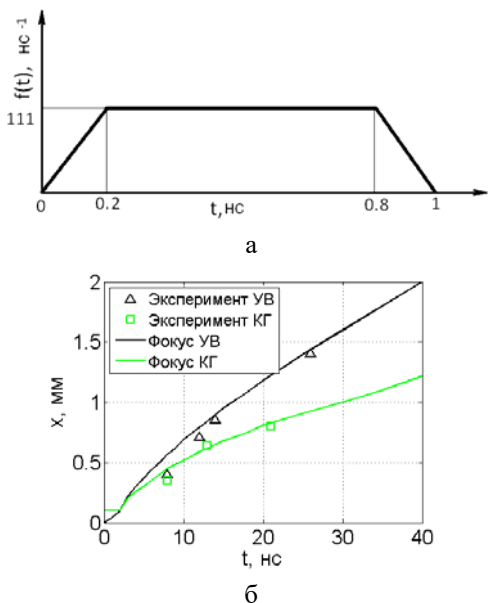


Рис. 3. Временной профиль энерговыделения (а), положение УВ и контактной границы в эксперименте (маркеры) и в расчет Фокус (кривые) (б)

Из распределений плотности на рис. 5, полученных в расчетах по программам Фокус и CALE, видно вполне удовлетворительное совпадение форм и размеров струй. Формы пузырей заметно различаются, что, возможно, связано с тем, что в отличие от расчета CALE, где использовались реальные табличные уравнения состояния (УРС), расчет по Фокус был проведен с УРС идеального газа.

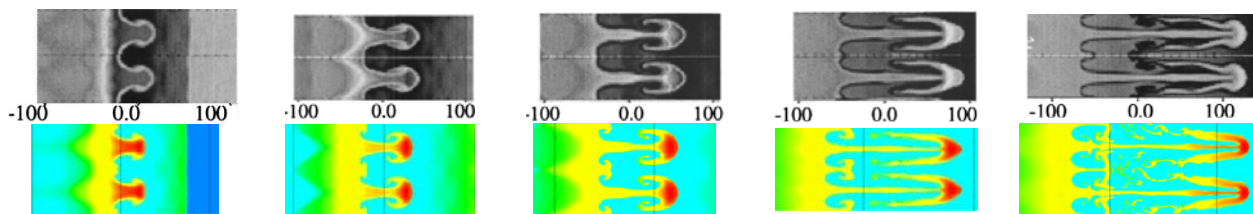


Рис. 5. Распределение плотности в моменты времени: слева направо 4, 6, 8, 12 и 16 нс. Сверху – расчет по программе CALE, снизу – по Фокусу. В расчете Фокуса одно деление соответствует 100 мкм

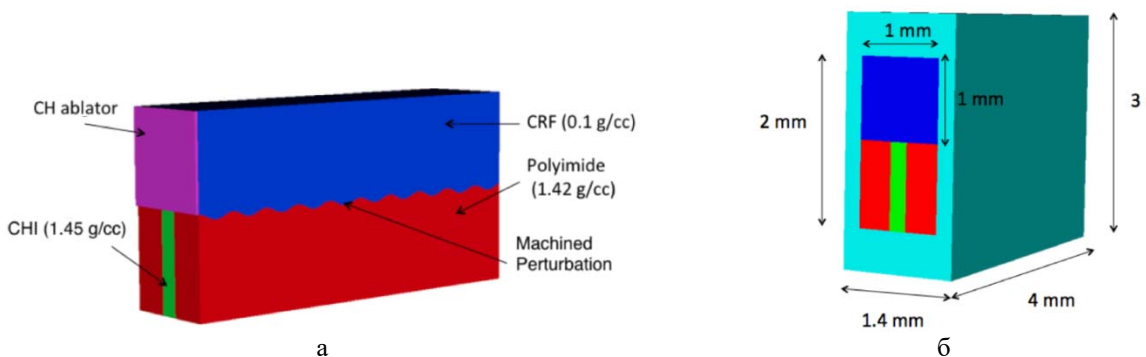


Рис. 6. Конфигурация мишени в эксперименте [4]. Внутренняя часть (а), то же в трубке из бериллия (б)

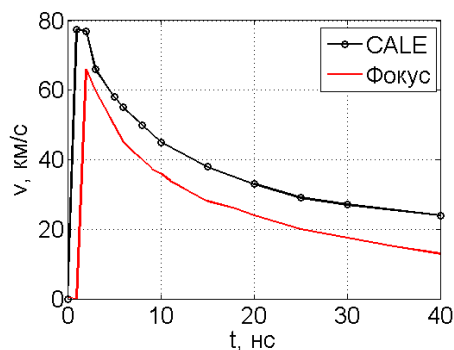


Рис. 4. Скорость границы раздела веществ

### Исследование неустойчивостей Кельвина – Гельмгольца на лазерной установке OMEGA

Во втором опыте [4] также использовалась миниатюрная бериллиевая ударная труба прямоугольного сечения  $1 \times 2 \times 4$  мм. Схема мишени для проведенных экспериментов показана на рис. 6. Верхний слой мишени изготовлен из формальдегидной пены, насыщенной углеродом, (пена CRF,  $\text{C}_{1000}\text{O}_{48}\text{H}_{65}$ ,  $\rho = 0,1 \text{ г/см}^3$ ), нижний слой (PAI/CHI/PAI) склеен из трех пластин, две внешних – из полиамидного пластика (PAI,  $\text{C}_{22}\text{H}_{14}\text{O}_4\text{N}_2$ ,  $\rho = 1,42 \text{ г/см}^3$ ) и центрального из йодированного полистирола (CHI,  $\text{C}_{50}\text{H}_{47}\text{I}_3$ ,  $\rho = 1,45 \text{ г/см}^3$ ). На контактной границе верхнего и нижнего слоев вырезаны синусоидальные возмущения с длиной волны 400 мкм и амплитудой – 30 мкм.

Эксперимент проведен с энергией лазерного излучения – 4,3 кДж (третья гармоника – 0,351 мкм) в десяти силовых пучках, что повышало однородность воздействия на мишень. Каждый луч имел длительность 1 нс, 100 пс время нарастания и спада, с гауссовым распределением интенсивности в пятне радиусом 430 мкм. Суммарная мощность излучения –  $8 \times 10^{14}$  Вт/см<sup>2</sup>. Лазерная абляция полистирола формирует в слое пены ударную волну амплитудой  $\sim 50$  Мбар, экран из золотой фольги толщиной 50 мкм препятствует формированию УВ в нижнем слое мишени от лазерного излучения в «крыльях» гауссова распределения. Разница в волновых течениях верхнего и нижнего слоев, а также наличие синусоидальных возмущений контактной границы, приводят к развитию взаимопроникновения веществ вследствие неустойчивости Кельвина – Гельмгольца.

Расчеты по программе Фокус проведены в плоской двумерной и трехмерной постановках, при этом также использовалось уравнение состояния идеального газа. В 2D постановке расчет проведен без учета бериллиевой трубки (см. рис. 7) на квадратной сетке шагом 1 мкм, описывающий длину волны четырьмя сотнями ячеек, а амплитуду тридцатью. Энерговклад  $\varepsilon_0 = 5,6 \cdot 10^4$  Дж/г нс рассчитан с учетом изменения плотности и толщины аблятора. Расчетная область в 2D постановке показана на рис. 7.

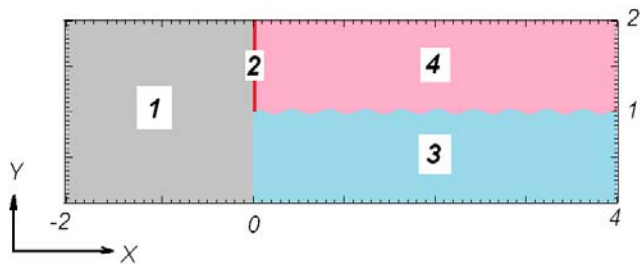


Рис. 7. Схема 2D расчета развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца. Размеры указаны в мм

Согласно рис. 8, в расчете Фокус формы вихревых структур, возникающих вследствие развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на границе пластик-пена после прохождения УВ в пене, хорошо согласуются с экспериментом. С течением времени высота вихрей увеличивается. Как следует из рис. 9, данный численный расчет удовлетворительно воспроизводит эту динамику.

На рентгенограмме, полученной в эксперименте [4] (см. рис. 8, а), обозначены низкоплотные области в верхней части мишени. В расчетах, проведенных в двумерной постановке по программам CALE и Фокус, подобные области отсутствуют. Из анализа трехмерных расчетов [5] было определено, что низкоплотные области на рентгенограмме появляются вследствие вдавливания пены в бериллиевые стенки. Для проверки этого эффекта по программе Фокус проведено 3D модели-

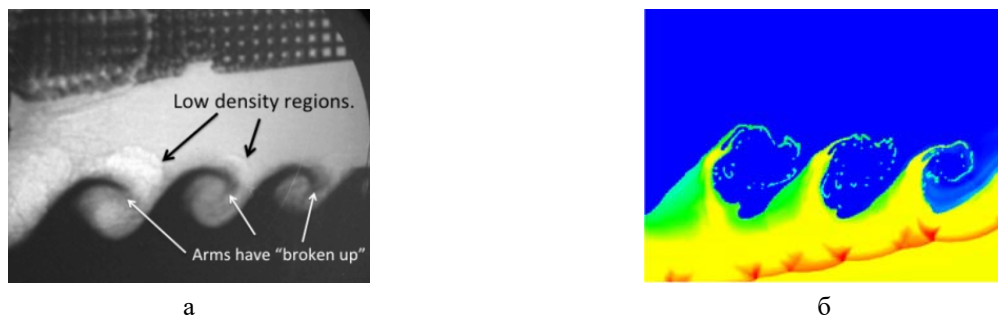


Рис. 8. Изображение развития возмущений на втором, третьем и четвертом вихре в момент выхода УВ за границу мишени – 75 нс. Рентгенограмма [4] (а), распределение плотности (расчет Фокус) (б)

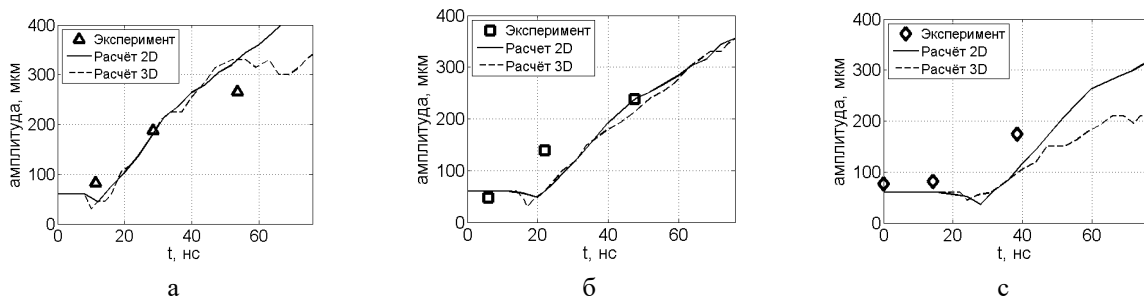


Рис. 9. Динамика роста амплитуды второго (а) третьего (б) и четвертого вихря (в). 2D и 3D расчет по Фокус с сравнением с экспериментом

рование со стенками из бериллия толщиной 0,2 мм и с учетом симметрии данной задачи. Схема постановки расчета показана на рис. 10

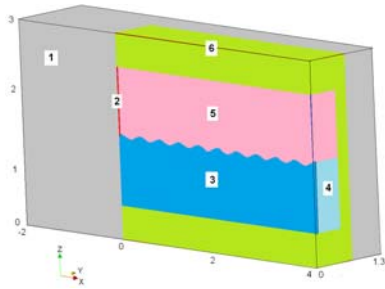


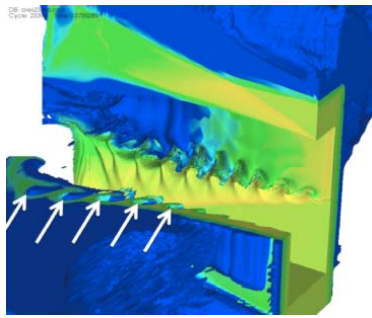
Рис. 10. Геометрия 3D расчета развития неустойчивости Кельвина – Гельмгольца

Полученные результаты сравнивались с расчетом [5], проведенным по лагранжево-эйлеровой программе ARES [6] на сетке с размерами ячейки

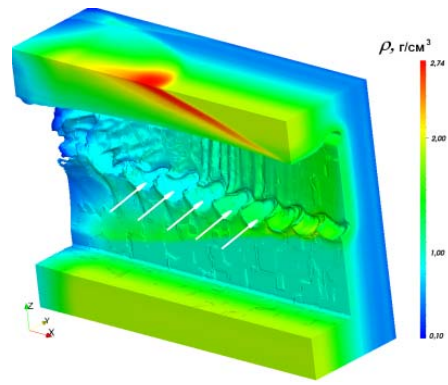
7 мкм, 15 мкм, 20 мкм по направлениям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , соответственно. Признаком, указывающим на существование низкоплотных областей, является наличие «пузырей» пены, проникающих в бериллиевую стенку. На рис. 11 хорошо видны углубления, появляющиеся в бериллии после расширения пены в результате прохождения УВ.

К моменту выхода УВ на границу области (см. рис. 12) средняя глубина проникновения пены в стенку из бериллия составляет 300 мкм. Это значение отличается от результата, полученного по программе ARES (~500 мкм). Для получения лучшего согласия необходимо использовать более точные УРС материалов.

Поперечный размер пузырей в плоскости XOZ близок к расчетному по программе ARES и соответствует длине волны возмущения  $\lambda_{кг}$ .

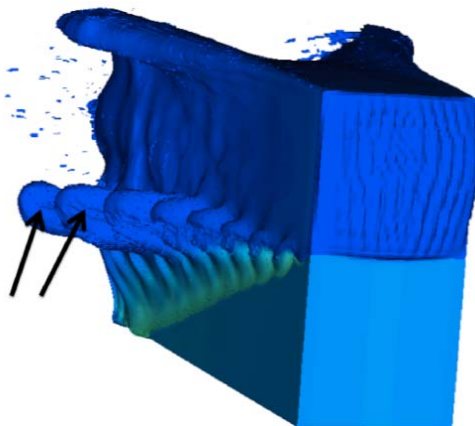


а

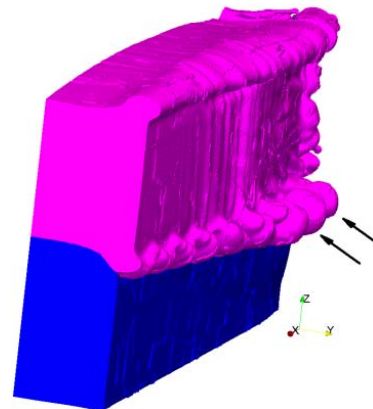


б

Рис. 11. Форма стенки из бериллия в момент выхода УВ из расчетной области с распределением плотности на поверхности. Стрелки указывают на углубления. Расчет ARES (а), Фокус (б)



а



б

Рис. 12. Распределение пены и пластика в момент выхода УВ из расчетной области. Расчет ARES (а), Фокус (б). Стрелки указывают на пузыри пены

### Возможность исследования неустойчивостей РТ и РМ на установке с энергией 2 кДж

Для моделирования развития РТ и РМ неустойчивостей на установке с энергией 2 кДж рассматривается два вида возмущений с длиной волны  $\lambda = 200$  мкм и амплитудой  $a = 20$  мкм: гармоническое и пилообразное (см. рис. 13, слева). Плотность в области 3 (см. рис. 2) не изменяется  $\rho_3 = 1,41$  г/см<sup>3</sup>, а плотность в области 4 варьируется таким образом, чтобы значение числа Атвуда,  $A = (\rho_3 - \rho_4)/(\rho_3 + \rho_4)$ , составило 0,2; 0,57 и 0,95. На рис. 13 показано распределение концентраций веществ в областях 3 и 4 для  $A = 0,57$ . Видно, что пузыри и струи при гармоническом и пилообразном возмущениях имеют схожую форму и размеры. До момента выхода УВ из мишени структура течения остается регулярной.

Дополнительно проведено моделирование для случая, когда начальное возмущение является суперпозицией двух пилообразных возмущений: с длинами волн 200 и 128 мкм, амплитудами 20 мкм и 10 мкм, соответственно. Согласно рис. 14, с ростом числа Атвуда неустойчивость на контактных

границах развивается быстрее, и в случае  $A = 0,95$  оболочка из пластика практически разделилась на отдельные фрагменты.

### Возможность исследования неустойчивости Кельвина – Гельмгольца на установке с энергией 2 кДж

Моделирование неустойчивости Кельвина – Гельмгольца для параметров установки с энергией 2 кДж проведено только в двумерной постановке, совпадающей с соответствующей постановкой для OMEGA с точностью до амплитуды и длительности энерговыделения.

Согласно рис. 15 и 16, в случае 2 кДж УВ движется медленнее в среднем на 20 % при сохранении темпа торможения. Вследствие этого, скорость движения пены за фронтом УВ меньше, и неустойчивость развивается менее интенсивно. Вихревые структуры растут с меньшей скоростью. Тем не менее, общая картина течения не меняется, и уровень развития неустойчивости остается схожим.

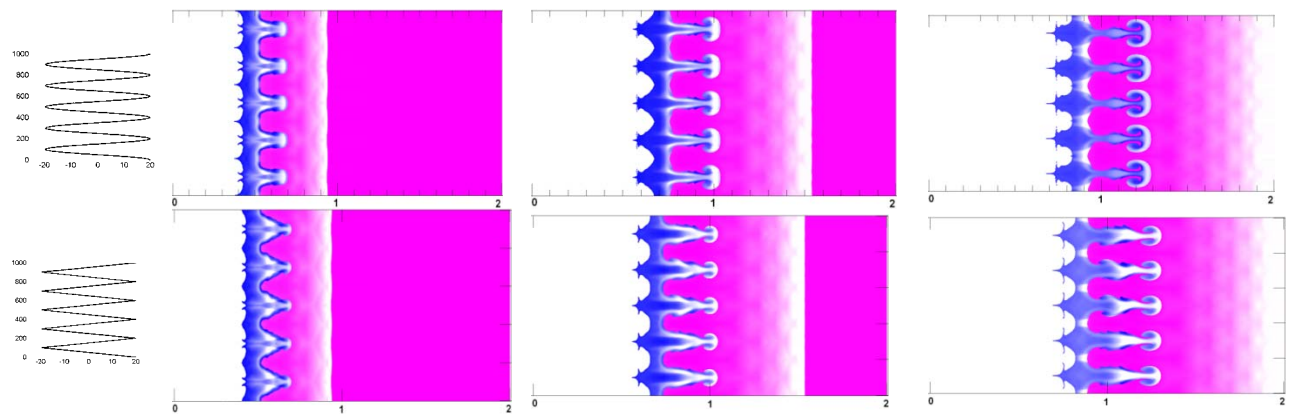


Рис. 13. Столбец 1 – возмущения, заданные на границе областей 3 и 4: гармоническое (сверху), пилообразное (снизу). Столбцы 2–4 – распределение концентраций веществ в области 3 (синий цвет) и в области 4 (лиловый) с учетом градиента плотности для  $A = 0,57$ . Моменты времени слева направо 40, 80 и 120 нс

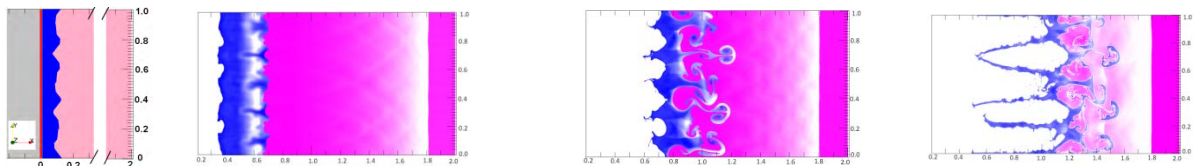


Рис. 14. Слева – профиль начального возмущения. Распределение концентраций веществ в области 3 (синий цвет) и в области 4 (лиловый) при одинаковом положении фронта УВ  $x = 1,8$  мм слева направо для  $A = 0,2$ ; 0,57 и 0,95. Моменты времени 160, 100 и 45 нс, соответственно

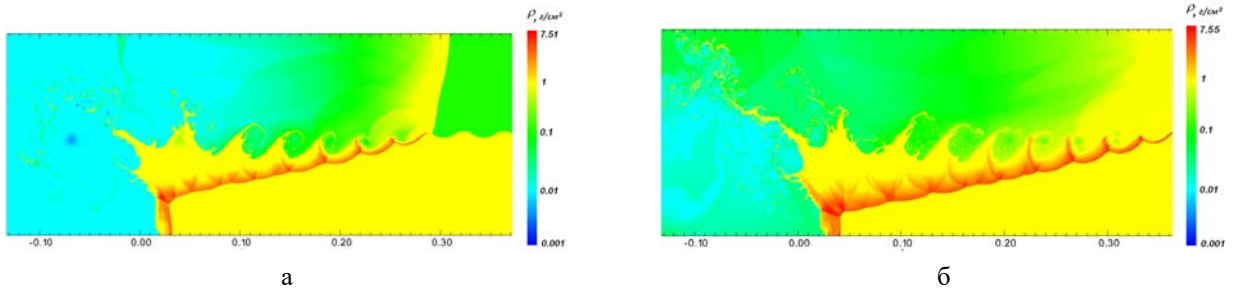


Рис. 15. Распределение плотности в момент времени 80 нс. Для установки с энергией 2 кДж (а), для установки OMEGA (4,3 кДж) (б)

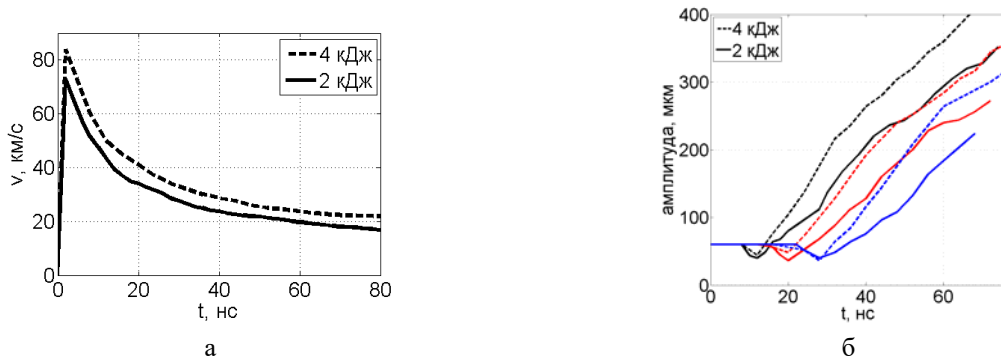


Рис. 16. Скорость УВ (а), зависимость от времени амплитуды второго (черные кривые), третьего (красные кривые) и четвертого вихря (синие кривые) (б). Данные для 2 кДж (сплошные линии) сдвинуты по временной шкале влево для совмещения моментов взаимодействия соответствующей волны с УВ

## Заключение

Результаты численного моделирования экспериментов на установке OMEGA показывают, что программа Фокус корректно описывает возникающие течения и развитие гидродинамических неустойчивостей. При этом трехмерные расчеты развития неустойчивостей более точно описывают эксперимент по сравнению с двумерными.

Расчеты с энергией ЛИ 2 кДж и длительностью 3 нс подтвердили возможность изучения неустойчивостей при различном соотношении плотностей веществ на контактной границе.

## Список литературы

1. Mikhailov N. A. The Convergence Order of Weno Schemes Behind a Shock Front // *Mathematical*

*Models and Computer Simulations*. 2015. Vol. 27, N 2. P. 129–138.

2. Edwards M. J., Blue B., Hansen J. F. et al. The effect of a short-wavelength mode on the evolution of a long-wavelength perturbation driven by a strong blast wave // *Physics of Plasmas*. 2004. Vol. 11.

3. Barton R. T. // *Numerical Astrophysics* Jones and Bartlett, Boston. 1985.

4. Harding E. C., Hansen J. F., Hurricane O. A. et al. Observation of a Kelvin-Helmholtz Instability in a High-Energy-Density Plasma on the Omega Laser // *Phys. Rev. Lett.* 2009 Vol. 103, 045005.

5. Raman K. S., Hurricane O. A., Park H. S. et al. Three-dimensional modeling and analysis of a high energy density Kelvin-Helmholtz Experiment // *Physics of Plasmas*. 2012, Vol. 22. LLNL-JRNL-531731.

6. Darlington R. M., McAbee T. L., Rodrigue G. // *Comp. Phys. Comm.* 2001. Vol. 135, N 58.