

Отчет о использовании кластера НГУ

Давыдов М. Н.

Тема работы. Основной темой проводимых работ является моделирование разрушения жидких сред при динамической разгрузке. В качестве численного метода выбран метод гидродинамических сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics — SPH). Программа для расчетов на C++ и CUDA написана мною, реализован параллельный расчет с использованием графических ускорителей.

Состав коллектива.

Давыдов Максим Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник Института гидродинамики СО РАН (лаборатория многофазных сред и кумуляции) и старший преподаватель НГУ (ММФ, кафедра теоретической механики).

Кедринский Валерий Кириллович, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник Института гидродинамики СО РАН (лаборатория многофазных сред и кумуляции).

Аннотация

В работе численно исследуется динамика состояния жидкости при динамической разгрузке, с использованием метода SPH [1]. Рассматриваются задачи о разрушении жидкости в рамках двух постановок: отражение ударной волны от свободной поверхности слоя жидкости и ударно-волновое нагружение жидкой капли [2]. В результате численного анализа динамики состояния полусферической капли установлено, что фокусировка отраженной от свободной поверхности капли ударной волны приводит к формированию в центре капли плотного быстрорасширяющегося кавитационного кластера. Показано, что использование метода SPH позволяет провести исследование структуры течения кавитирующей среды с высокой концентрацией газовой фазы и описать процесс инверсии ее двухфазного состояния — переход от кавитирующей жидкости к системе газ-частицы.

1 SPH метод

В настоящей работе рассмотрено применение метода сглаженных гидродинамических частиц (SPH) для численного моделирования разрушения жидких сред при ударно волновом нагружении.

Метод сглаженных частиц (Smoothed Particle Hydrodynamics - SPH) [1] — эффективный бессеточный лагранжевый численный метод, применяемый для расчетов структуры течения с неизвестной свободной границей, включая, в частности, высокоскоростные процессы в средах с существенно изменяющейся при интенсивном динамическом нагружении топологией моделируемых объектов.

В физическое пространство моделирования помещается N частиц в которых задаются нужные физические величины, значения которых в произвольной точке в пространстве получается в результате дискретизации интерполяционной формулы:

$$\langle f(\bar{r}) \rangle = \int f(\bar{r}') W(\bar{r} - \bar{r}', h) d\bar{r}',$$

где h — радиус сглаживания, а $W(\bar{r} - \bar{r}', h)$ — сглаживающая функция (ядро).

Численная аппроксимация функции $f(\bar{r})$, известной только в N точках, выполняется аналогично методу интегрирования Монте-Карло, соответствующие формулы для функции f и ее производной в SPH-методе выглядят следующим образом:

$$\langle f(\bar{r}) \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho(\bar{r}_i)} f(\bar{r}_i) W(\bar{r} - \bar{r}_i, h)$$
$$\langle \nabla f(\bar{r}) \rangle = \sum_{i=1}^N \frac{m_i}{\rho(\bar{r}_i)} f(\bar{r}_i) \nabla W(\bar{r} - \bar{r}_i, h)$$

Поскольку сглаживающая функция W не равна нулю только в некоторой (малой) окрестности точки с координатой \bar{r} , то суммирование проводится только по соседним узлам (частицам) в радиусе $2h$, где сглаживающая функция не равна 0. Следует заметить, что задача эффективного (экономичного по времени) поиска соседей является исключительно важной в реализации SPH метода.

2 Динамика структуры плоского жидкого слоя за фронтом волн разрежения

Рассматривается УВ, распространяющаяся от левой границы жидкого слоя шириной 5 см, имеющая треугольный профиль с амплитудой 15 МПа и длительностью 3 мкс. На правой границей — свободная поверхность [3]. Изначально жидкость содержит микронеоднородности в виде микропузырьков свободного газа с начальными радиусом 5 мкм и объемной концентрацией 10^{-8} , что соответствует параметрам обычной дистиллированной воды.

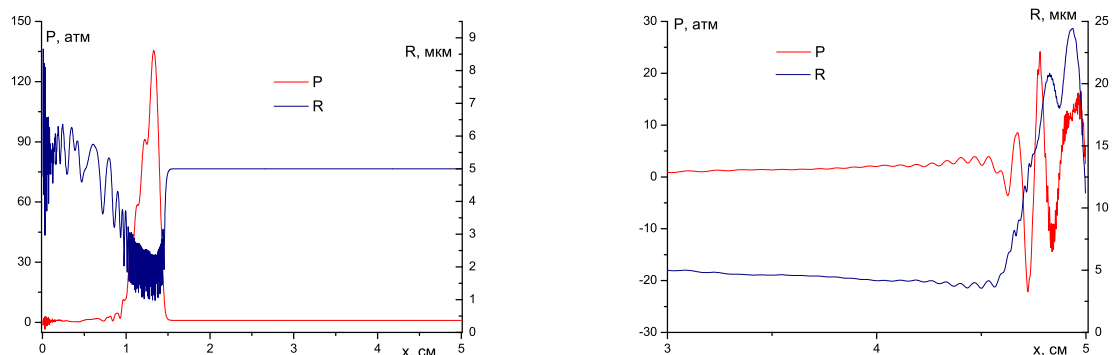


Рис. 1. Распределения давления и радиуса пузырьков в жидком слое для ударной волны ($t = 10$ мкс) и отраженной волны разрежения ($t = 37$ мкс)

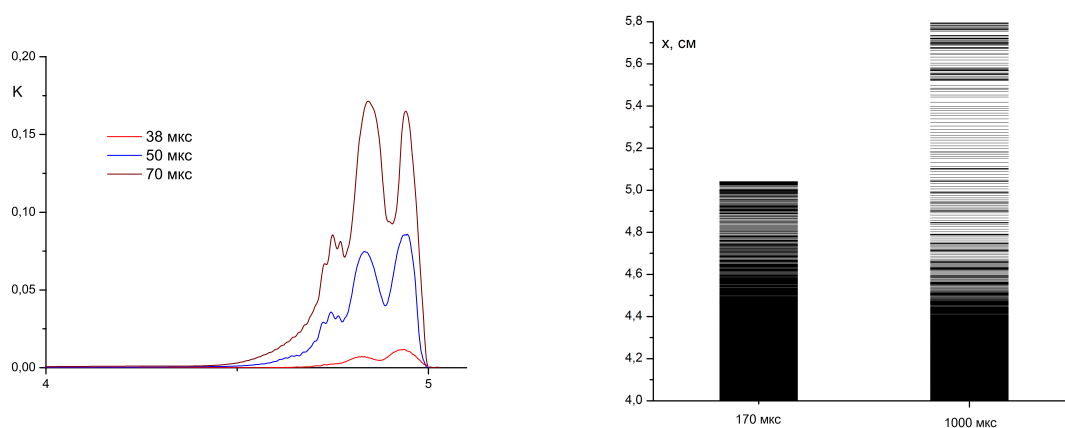


Рис. 2. Распределения объемной концентрации газовой фазы для различных моментов времени

На рис. 1 показано распределение радиуса пузырьков и профиль волны, в момент когда ударная волна распространяется по слою. Вследствие малости радиуса пузырьков и небольшой объемной концентрации, профиль волны, распространяясь по слою практически не меняется и существенного затухания волны не происходит. Пузырьки, сжимаясь в ударной волне за ее фронтом, продолжают пульсировать вокруг первоначального значения. При отражении от свободной поверхности ударная волна трансформируется в волновой пакет (рис. 1), а пузырьки, попав в фазу разрежения, интенсивно растут. Радиусы пузырьков выросли уже на порядок и в этом масштабе пульсации пузырьков, хорошо видимые ранее, практически незаметны.

В дальнейшем концентрация газовой фазы вблизи свободной поверхности увеличивается (рис. 2), а профиль массовой скорости прекращает изменяться со временем, что соответствует экспериментальным данным [6]. Распространение сформировавшегося волнового пакета от свободной поверхности приводит к развитию кавитации вблизи свободной поверхности и в результате появляется нескольких областей с растущими пузырьками, форма которых показана на рис. 2. Дальнейший рост объемной концентрации можно интерпретировать как образование зон, в которых среда должна разорваться, формируются некие откольные слои.

Дальнейшие расчеты показывают, что частицы жидкости разлетаются, и теряют связь между собой (в SPH-формулировке это означает что частицы расходятся на расстояние больше радиуса сглаживания), что является критерием разрушения среды. При этом значение концентрации газовой фазы стремится к значению, которое соответствует одиночной частице в окружающем воздухе. Также выделяются группы частиц, разделенные практически пустыми промежутками пространства, эти группы можно считать отдельными каплями или фрагментами жидкости.

3 Кавитационное разрушение капли

На диафрагму электромагнитной ударной трубки помещалась капля дистиллированной воды радиусом от нескольких миллиметров до сантиметра. При ударе диафрагмы по капле в ней формировалась ударная волна с амплитудой 15 МПа и длительностью порядка 3–4 мкс. В процессе разрушения капли можно выделить начальную стадию — формирование плотной кавитационной зоны (кластера), когда внутри капли появляются первые микрокластеры кавитационных пузырьков миллиметровых размеров, причем можно выделить две области кавитации — в центральной части капли и на периферии.

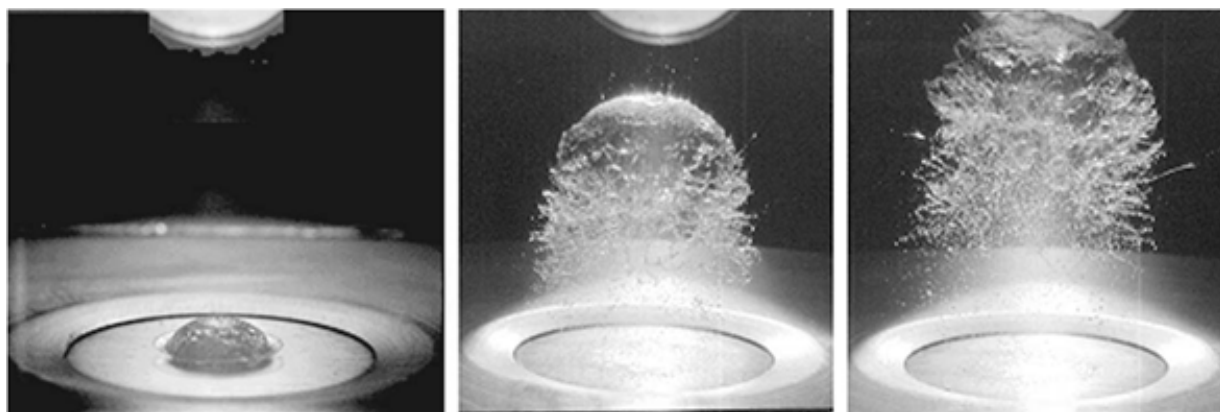


Рис. 3. Динамика структуры капли при ее нагружении ультракороткой ударной волной (100 мкс, 1000 мкс и 1500 мкс)

В дальнейшем продолжается рост и объединение кавитационных кластеров, к 70–100 мкс вся капля «вскипает» и приобретает ярко выраженную ячеистую структуру, основа которой — крупные кластеры, в которые объединяются растущие в поле растягивающих напряжений пузырьки. В дальнейшем зона кавитации инерционным образом разрастается. Сама капля трансформируется в купол со структурой в виде пространственной сетки из жидких жгутов, затянутую тонкой жидкой пленкой. Образуется некий «купол», похожий на парашют. Впоследствии жидкая сетка распадается на отдельные фрагменты, которые в дальнейшем распадаются на отдельные капельки.

Для численного моделирования процесса разрушения капли SPH метод был реализован в осесимметричной постановке [4]. Форма капли полагалась полусферической, радиуса 5 мм. В начальный момент времени, частицы, моделирующие мембрану, начинали движение вверх с вертикальной начальной скоростью 10 м/с, которая в дальнейшем уменьшалась по линейному закону, и тем самым задавая ударную волну треугольного профиля с шириной 3 мкс и амплитудой около 15 МПа, действующую на каплю.

Распространение ударной волны внутрь капли приводит к сжатию пузырьков, а при отражении ее от свободной поверхности в среде появляются растягивающие напряжения, что ведет к росту газовой фазы, и вблизи контакта свободной границы и мембраны объемная концентрация начинает расти. Далее ударная волна достигает «вершины» капли и полностью отражается фокусируясь волной разгрузки на оси симметрии в центре капли.

К моменту времени 25 мкс в центре капли образовалась ярко выраженная область повышенной концентрации газовой фазы, также заметен кавитационный слой около мембраны, связанный с отрывом капли от поверхности. Данные особенности сохраняются в процессе дальнейшего разрушения среды. К моменту времени 50 мкс (рис. 4) уже можно говорить об образовании относительно большой пустой полости в центре капли и множестве маленьких областей по всему объему. Это соответствует состоянию «вскипевшей» капли, видимому в эксперименте (рис. 3).

Дальнейший разлет капли показан на рис. 4, становится заметен отрыв капли от мембраны, а пустота в центре увеличилась за счет объединения мелких областей, обособленных в ранние моменты времени. Необходимо заметить, что речь уже идет не о зоне, в которой находятся частицы с высокой концентрацией

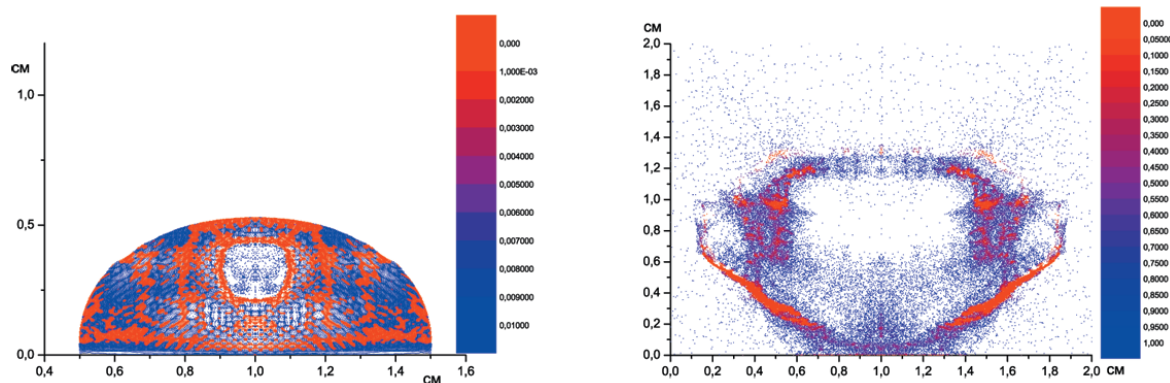


Рис. 4. Объемная концентрация в моменты времени 50 и 1000 мкс

газовой фазы, а о том, что частицы, двигаясь с массовой скоростью, улетают из этой области. Слой частиц, окружающий центр капли, становится ясно выделенным и образует «парашют», наблюдаемый в эксперименте. Таким образом, относительно быстрый рост кавитационного кластера в центре капли приводит к своеобразному кавитационному «взрыву» капли изнутри [5]. Видно, что среда распалась на несколько несвязанных между собой областей, дальнейший разлет которых приводит к распылению частиц по всему окружающему объему.

Список литературы

- [1] *Monaghan J.J.* // *J. of Comp. Phys.* 1994. **110**. № 2. p. 399–406.
- [2] *Давыдов М.Н., Кедринский В.К.* // *ПМТФ.* 2013. №6. с. 17–26.
- [3] *Давыдов М.Н., Кедринский В.К.* // *ПМТФ.* 2003. **44**. №6. с. 72–79.
- [4] *Omang M., Borve S., Trulsen J.* // *J. Comp. Phys.* V. 2006. **213**, N. 1, p. 391–412.
- [5] *Кедринский В. К., Бесов А. С., Гутник И. Э.* // *Доклады РАН* 1995. **356**, №4.
- [6] *Кедринский В. К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Изд. СО РАН. Новосибирск. 2000.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы. Ускорение вычислений за счет использования графических ускорителей и возможность запустив расчет выполнять другую работу.
Перечень публикаций.

1. Давыдов М.Н., Кедринский В.К. Моделирование кавитационного разрушения капли методом SPH // XIII Всероссийский семинар Динамика Многофазных Сред, Новосибирск, 8-10 октября 2013 г.
2. Давыдов М.Н., Кедринский В.К. Моделирование разрушения жидкости в волне декомпрессии методом SPH. // Новые математические модели в механике сплошных сред: Построение и изучение. 18–22 апреля 2014, Новосибирск
3. Давыдов М.Н., Кедринский В.К. Моделирование разрушения жидких сред с использованием метода SPH. Первая Всероссийская акустическая конференция 6–10 октября 2014, Москва.
4. М.Н. Давыдов, В.К. Кедринский Метод сглаженных частиц в задачах моделирования кавитационного разрушения жидкости при ударно-волновом нагружении // *ПМТФ*, 2013, №6, с. 17-26
5. М.Н. Давыдов, В.К. Кедринский Моделирование разрушения жидких сред с использованием метода SPH. // Ученые записки физического факультета МГУ, принята в печать

Впечатления от работы и предложения по совершенствованию. Была бы полезна инструкция о работе на кластере с системами контроля версий (Git, Github, Subversion).