

Моделирование разрушения жидких сред с использованием метода SPH

М. Н. Давыдов^{1,2*} В. К. Кедринский^{2†}

¹Институт гидродинамики имени М. А. Лаврентьева СО РАН,
Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 15

²Новосибирский государственный университет,
НГУ, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

(Статья поступила 11.11.2014; Подписана в печать 28.11.2014)

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.

PACS: 61.20.Ja УДК: С532.593+532.528+532.529+532.5.013.2

Ключевые слова: SPH метод, кавитационное разрушение, ударно-волновое нагружение.

ВВЕДЕНИЕ

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:

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

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

Численная аппроксимация функции $f(\mathbf{r})$, 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:

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

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

Поскольку сглаживающая функция W не равна нулю только в некоторой (малой) окрестности точки с координатой \mathbf{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.

В SPH формулировке уравнения газовой динамики имеют вид:

$$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} = -\rho_i \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{\rho_j} (\bar{v}_j - \bar{v}_i) W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h)$$

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} = - \sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} + \Pi_{ij} \right) \nabla W(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j, h)$$

где уравнение движения дополнительно содержит искусственную вязкость Π_{ij} , введение которой позволяет решить проблему численных неустойчивостей, возникающих при решении данной системы.

1. 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 по-

*E-mail: davydov@hydro.nsc.ru

†E-mail: kedr@hydro.nsc.ru

верхность [3]. Изначально жидкость содержит микро-неоднородности в виде микропузырьков свободного газа с начальными радиусом 5 мкм и объемной концентрацией 10^{-8} , что соответствует параметрам обычной дистиллированной воды.

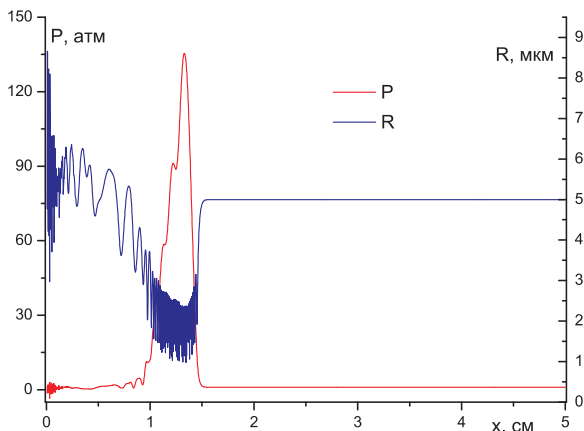


Рис. 1: Распределения давления и радиуса пузырьков в жидком слое для ударной волны ($t = 10$ мкс)

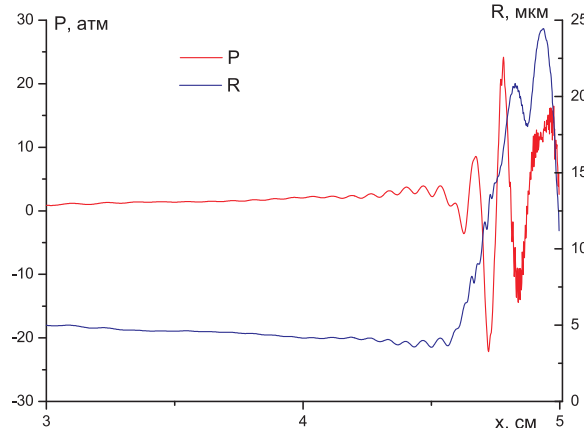


Рис. 2: Распределения давления и радиуса пузырьков в жидком слое для отраженной волны разрежения ($t = 37$ мкс)

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. 2), 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

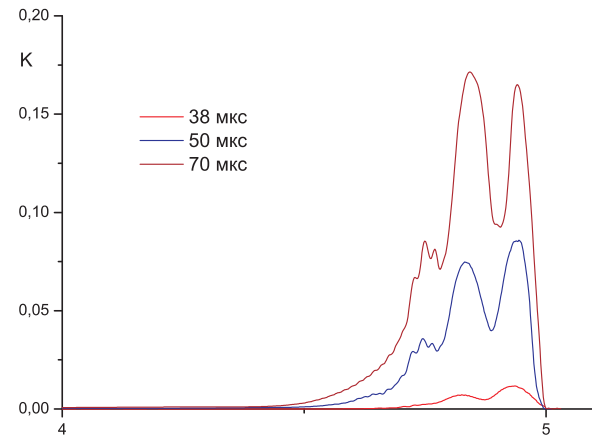


Рис. 3: Распределения объемной концентрации газовой фазы для различных моментов времени

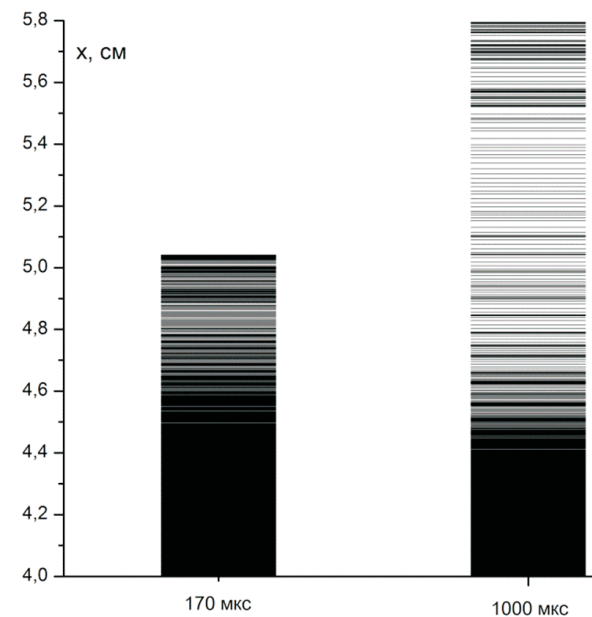


Рис. 4: Распределения объемной концентрации газовой фазы для различных моментов времени

свободной поверхности увеличивается (рис. 3), 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 появляются нескольких областей с растущими пузырьками, форма которых показана на рис. 4. Продолжающийся 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 расхо-

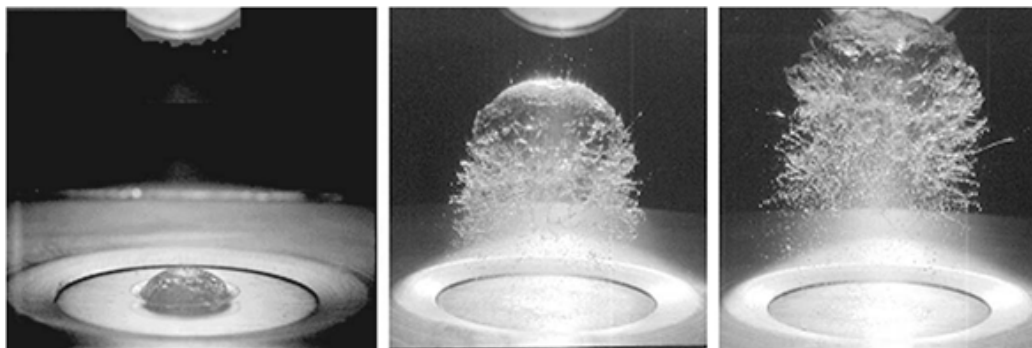


Рис. 5: Динамика структуры капли при ее нагружении ультракороткой ударной волной (100 мкс, 1000 мкс и 1500 мкс)

дятся 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.

2. 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.

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, натянутую 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 (рис. 6), а при отражении ее от свободной поверхности в среде появляются растягивающие напряжения, что ведет к росту газовой фазы. На рис. 7 видно, что 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 (рис. 8). Данные особенности сохраняются в процессе дальнейшего разрушения среды. К моменту времени 50 мкс уже можно говорить об образовании относительно большой пустой полости в центре капли и множестве маленьких областей по всему объему (рис. 9). Это соответствует состоянию «вскипевшей» капли, видимому в эксперименте (рис. 5).

Дальнейший разлет капли показан на рис. 10, к моменту времени 200 мкс 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 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 (рис. 11).

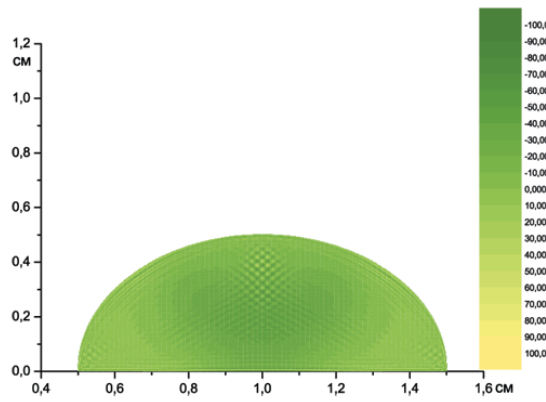


Рис. 6: Ударная волна, распространяется по капле, отражаясь от ее поверхности ($t = 5$ мкс)

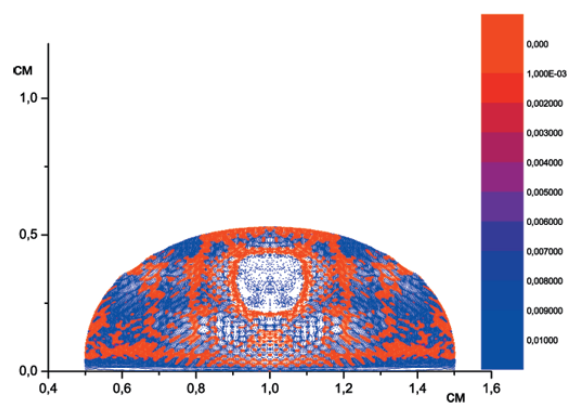


Рис. 9: Объемная концентрация в моменты времени 50 мкс

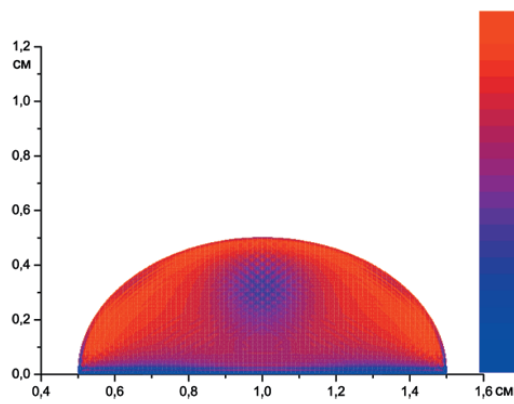


Рис. 7: Распределение объемной концентрации в капле ($t = 5$ мкс)

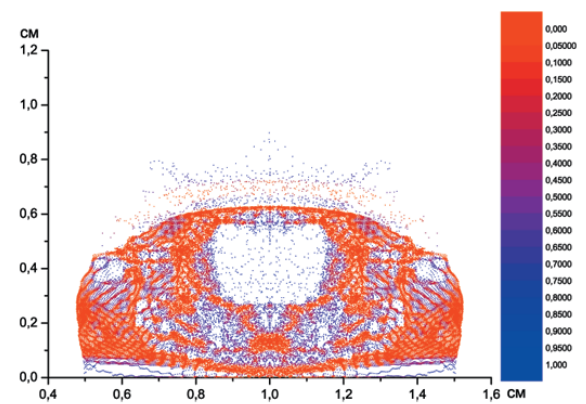


Рис. 10: Объемная концентрация в моменты времени 200 мкс

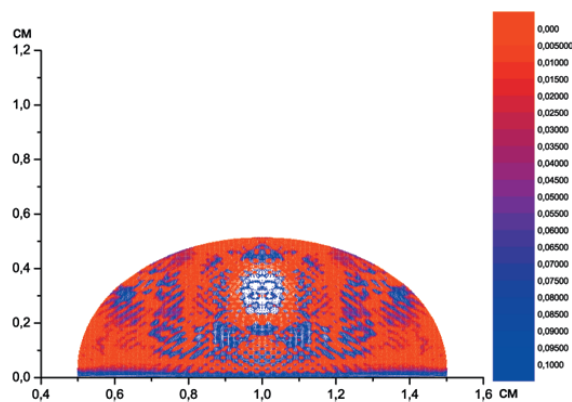


Рис. 8: Объемная концентрация в моменты времени 25 мкс

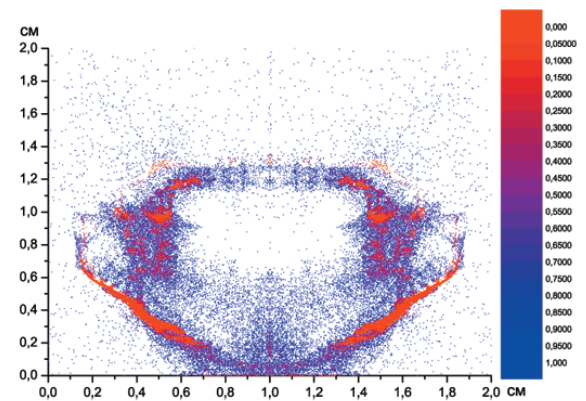


Рис. 11: Объемная концентрация в моменты времени 1000 мкс

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом можно сделать вывод что SPH метод корректно моделирует распространение ударных волн и волн разрежения в двухфазной среде, а также с его помощью можно получить картину кавитационного разрушения жидкости.

Численный анализ динамики состояния полусферической капли в процессе ее ударно-волнового нагружения показал, что фокусировка отраженных от свободной поверхности капли ударных волн приводит к формированию в окрестности центра капли плотного, быстро расширяющегося кавитационного кластера. Коалесценция пузырьков в кластере приводит к трансформации среды в систему газ-частицы, а в центре капли образуется газовое облако. В свою очередь это приводит к вылету частиц из этой зоны и образова-

нию «парашюта» с пустотой внутри и последующему распаду среды на отдельные фрагменты и частицы.

Механизм этого процесса, определенный ранее как внутренний «кавитационный» взрыв капли, практически подтвержден после адаптации SPH-метода к задачам импульсного разрушения двухфазных сред. Полученные численные результаты по характерным размерам и временам вполне соответствуют особенностями экспериментальной картины кавитационного разрушения капли.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-01-00134-а).

-
- [1] *Monaghan J.J.* J. of Comp. Phys. **110**, №2. P. 399. (1994).
 [2] *Давыдов М.Н., Кедринский В.К.* ПМТФ. **54**, №6. С. 17. (2013).
 [3] *Давыдов М.Н., Кедринский В.К.* ПМТФ. **44**, №5. С. 72. (2003).
 [4] *Omang M., Borve S., Trulsen J.* J. Comp. Phys. **213**, N1, P. 391. (2006).
 [5] *Кедринский В.К., Бесов А.С., Гутник И.Э.* Доклады РАН **356**, №4. (1995).
 [6] *Кедринский В.К.* Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. (Новосибирск: Изд. СО РАН, 2000).

SPH metod for modelling fracture of fluid

M. N. Davydov^{1a}, V. K. Kedrinskii^{2b}

¹*Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS, Novosibirsk, 630090, Russia*

²*Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090, Russia*

E-mail: ^adavydov@hydro.nsc.ru, ^bkedr@hydro.nsc.ru

It is numerical investigated of dynamics of the state of a liquid on decompression by SPH [1]. The two statement is demonstrated reflection shock wave from free surface and shock wave loading of a liquid droplet [2]. A numerical analysis shows that focusing of the shock wave reflected from the free surface of the droplet leads to the formation of a dense, but rapidly expanding cavitation cluster at the droplet center. It is shows tnat SPH can be used to a investigation of a fluid structure of a cavitating liquid with high volume of a gas phase and to describe the process of inversion of the two-phase state of this medium: transition from a cavitating fluid to a system consisting of a gas and particles. Keywords: smoothed particle hydrodynamics(SPH)method,cavitation-induced fracture, shock- waveloading.

PACS: 61.20.Ja

Keywords: smoothed particle hydrodynamics (SPH) method, cavitation-induced fracture, shock-wave loading.

Received 11.11.2014.

Сведения об авторах

1. Давыдов Максим Николаевич — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, тел.: (383) 333-24-98, e-mail: davydov@hydro.nsc.ru.
2. Кедринский Валерий Кириллович — докт. физ.-мат. наук, профессор; тел.: (383) 333-26-65, e-mail: kedr@hydro.nsc.ru.