

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФРАГМЕНТАЦИИ В ЖИДКИХ СРЕДАХ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ (SMOOTHED PARTICLE HYDRODYNAMICS)*

А.П. Воробьев*, В.И. Кривенцев*, Qian Lin, Xuewu Cao****

**Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*

*** Shanghai Jiao Tong University (SJTU)*



Продemonстрирована возможность применения метода сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics) для численного моделирования процессов фрагментации в жидких средах. Выполнено тестовое моделирование ряда гидродинамических задач. Дано описание математической модели в приближении невязкой жидкости, с использованием искусственно введенного в уравнения Эйлера диссипативного члена¹.

ВВЕДЕНИЕ

При тяжелых авариях на ЯЭУ одним из важнейших процессов является фрагментация кориума в жидком теплоносителе. Данный процесс изучается достаточно длительное время. Для описания процесса фрагментации кориума проведено большое количество экспериментальных исследований и разработаны различные теоретические модели. Моделирование процессов фрагментации в жидких средах необходимо как для обоснования безопасности существующих и вновь создаваемых ЯЭУ, так и для повышения эффективности проводимых натурных экспериментов.

Применение метода сглаженных частиц (SPH – smoothed particle hydrodynamics) является новым подходом к решению задач численного моделирования процессов фрагментации в жидких средах. В рамках данного подхода разработан расчетный код, моделирующий взаимодействие жидких сред. Преобладающим механизмом процесса фрагментации могут являться как термические, так и гидродинамические эффекты. В данной работе рассмотрены только гидродинамические процессы, поскольку необходимы дополнительные экспериментальные данные для определения коэффициентов теплообмена в неравновесных процессах термического взаимодействия.

** Данная работа была поддержана совместным грантом Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) и Государственным фондом естественных наук (ГФЕН) – National Natural Science Foundation of China (NSFC) Китая (гранты NSFC No.50711120190 и РФФИ 06-08-39004-ГФЕН), а также отдельным грантом ГФЕН (Grant NSFC No.50576050).*

За основу расчетной методики приняты подходы, представленные в работах [1–4]. Проведен ряд численных экспериментов, демонстрирующих возможности метода SPH для моделирования процессов фрагментации в жидких средах.

БЕССЕТОЧНЫЕ МЕТОДЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ В ОБЛАСТЯХ С СИЛЬНО МЕНЯЮЩЕЙСЯ ГЕОМЕТРИЕЙ

Численный метод моделирования гидродинамических процессов, происходящих при фрагментации в жидких средах, должен удовлетворять следующим требованиям:

- корректно представлять свободную поверхность жидкости и границу раздела сред, их перемещение и образование волн на границе раздела сред;
- описывать эффекты разбрызгивания и образования ударных волн, взаимодействие разнородных жидкостей;
- гибкость расчетной модели, позволяющая включать дополнительные физические явления (физическая вязкость, термическое взаимодействие, фазовые переходы и т.п.).

В свете вышеизложенных требований наиболее подходящим является использование бессеточного лагранжева подхода, использующего частицы для аппроксимации значений функций. Предпочтение было отдано методу сглаженных частиц (smoothed particle hydrodynamics). Преимущества данного метода для случаев разрушения и слияния капель, фазовых переходов, разлета среды отмечены рядом авторов [5, 6].

Существует несколько вариаций метода SPH и техник численного моделирования, разработанных различными авторами для более корректного решения специальных задач [7, 8].

МЕТОД СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Метод сглаженных частиц основан на интерполяционном принципе, который позволяет выражать значение некоторой функции в произвольной точке, зная ее значение в наборе соседних точек. При этом для интерполяции используется так называемое сглаживающее ядро. Таким образом, интерполируемое значение функции A в некоторой точке r определяется уравнением

$$A_i(\vec{r}) = \int A(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', h) d\vec{r}', \quad (1)$$

где $W(r, h)$ – сглаживающее ядро – функция, обладающая следующим свойством:

$$\int W(\vec{r} - \vec{r}', h) d\vec{r}' = 1, \quad (2)$$

h – сглаживающий радиус.

При этом важно, чтобы при $h \rightarrow 0$ форма сглаживающего ядра стремилась к дельта-функции.

Сглаживающий радиус является одним из основных параметров приближения. Он определяет расстояние, в пределах которого другие частицы взаимодействуют с данной частицей – область влияния. В общем случае радиус области влияния частицы равен нескольким радиусам сглаживания:

$$R_{s, domain} = k \cdot h. \quad (3)$$

Значение коэффициента k определяется выбором сглаживающей функции. В случае $k = 2$ частицы, лежащие на расстоянии от h до $2 \cdot h$, оказывают меньшее влияние на параметры данной частицы, чем лежащие на расстоянии меньше h , а лежащие на расстоянии, превышающем два сглаживающих радиуса, совершенно не вносят вклад при расчете параметров в заданной точке. Для выполнения этого

условия необходимо, чтобы значение выбранной сглаживающей функции обращалось в нуль при значениях $r > 2 \cdot h$. Степень взаимного влияния частиц определяется крутизной сглаживающей функции.

В качестве сглаживающего ядра наиболее простым является применение функции Гаусса. Возможно использование сглаживающих функций, построенных с использованием сплайнов. В некоторых случаях такие сглаживающие функции позволяют достичь большей точности и скорости вычислений. Кроме того, гауссово сглаживающее ядро при $r=2 \cdot h$ не равно нулю, хотя и имеет весьма небольшое относительно максимума значение. Поэтому в расчеты вносится дополнительная ошибка, поскольку на практике сглаживание проводится только в пределах расстояния $2 \cdot h$ от частицы. Этого недостатка лишены сглаживающие сплайн-функции, т.к. можно построить такую сплайн-функцию, которая будет удовлетворять условию (2) и при этом обращаться в нуль на расстоянии $r=k \cdot h$ от рассматриваемой точки.

Однако серия проведенных вычислительных экспериментов со сплайн-функциями, например, с бикубической сплайн-функцией [9] вида:

$$W(r, h) = W_0 \begin{cases} 1 - \frac{3}{2} \left(\frac{r}{h} \right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{r}{h} \right)^3, & 0 \leq r \leq h \\ \frac{1}{4} \left(2 - \frac{r}{h} \right)^3, & h < r \leq 2h \\ 0, & r > 2h \end{cases} \quad (4)$$

не показала существенных преимуществ этих функций перед функцией Гаусса. Принимая во внимание также то, что именно гауссово сглаживающее ядро дает наиболее верную физическую интерпретацию SPH-уравнениям [1], в вычислениях использовалось сглаживающее ядро следующего вида:

$$W(r, h) = \frac{1}{h\sqrt{\pi}} e^{-(r^2/h^2)}. \quad (5)$$

Для проведения расчетов используется набор частиц, которые обладают такими свойствами, как масса, координаты центра, плотность, скорость. Набор параметров может быть расширен для какой-либо конкретной задачи, например, температурой, напряженностью электрического поля в данной точке и др. Масса частицам задается в начальный момент времени в соответствии с начальной плотностью. В процессе вычислений изменяется только плотность, а масса остается постоянной.

Величина сглаживающего радиуса может быть индивидуально задана для каждой частицы. Упрощенный подход предполагает одинаковое значение сглаживающего радиуса для всех частиц. Данный подход в ряде случаев менее точен, но очень эффективен. В вычислениях сглаживающий радиус принят постоянным и одинаковым для всех частиц. Значение сглаживающего радиуса равно начальному расстоянию между частицами.

Для дискретного набора частиц интерполяционное значение функции в некоторой точке a будет определяться уже не интегралом, а суммой по всем частицам b в пределах $2 \cdot h$ от рассматриваемой точки:

$$A_a(\vec{r}) = \sum_b m_b \frac{A_b}{\rho_b} W(\vec{r} - \vec{r}_b, h). \quad (6)$$

Отсюда легко получить выражение для сглаженной плотности:

$$\rho_a(\vec{r}_a) = \sum_b m_b W(\vec{r}_a - \vec{r}_b, h). \quad (7)$$

С точки зрения идеи метода сглаженных частиц в вычислениях должно использоваться именно это уравнение. Однако при его применении для расчетов плотности частиц, лежащих на поверхности жидкости (т.е. не имеющих соседей в каком-либо направлении), плотность оказывается «сглаженной» на расстоянии $2 \cdot h$ за пределами реальной границы жидкости. Это приводит к появлению пониженной плотности на границе, как следствие к пониженному давлению, и в результате – к неустойчивости свободной поверхности. Для преодоления этого эффекта (как показано в [1]) вместо расчета сглаженной плотности частицы на каждом шаге по времени из уравнения (7), в начальный момент времени задается плотность каждой частицы, а на каждом шаге по времени рассчитывается скорость изменения плотности:

$$\frac{d\rho_a}{dt} = \sum_b m_b (\vec{v}_a - \vec{v}_b) \nabla_a W_{ab}. \quad (8)$$

Градиент сглаживающего ядра легко получается дифференцированием исходной функции:

$$\nabla_a W(r_{ab}, h) = \frac{-2r_{ab}}{h^3 \sqrt{\pi}} e^{-(r^2/h^2)}. \quad (9)$$

Уравнения сохранения импульса и внутренней энергии для случая невязкой жидкости записываются аналогично [1]:

$$\frac{d\vec{v}_a}{dt} = - \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} + \Pi_{ab} \right) \nabla_a W_{ab} + \vec{F}_a, \quad (10)$$

$$\frac{du_a}{dt} = \frac{1}{2} \sum_b m_b \left(\frac{P_b}{\rho_b^2} + \frac{P_a}{\rho_a^2} \right) (\vec{v}_a - \vec{v}_b) \cdot \nabla_a W_{ab}. \quad (11)$$

Для корректного описания ударных волн в жидкости вводится искусственная вязкость [6, 10]. Она обеспечивает необходимую диссипацию кинетической энергии, а также позволяет предотвратить проникновения быстро сближающихся частиц друг в друга. Член, описывающий искусственную вязкость в уравнении (10), состоит из двух слагаемых и определяется уравнением:

$$\Pi_{ab} = \begin{cases} \frac{-\alpha \bar{c}_{ab} \mu_{ab} + \beta \mu_{ab}^2}{\bar{\rho}_{ab}}; \vec{v}_{ab} \cdot \vec{r}_{ab} < 0 \\ 0; \vec{v}_{ab} \cdot \vec{r}_{ab} > 0 \end{cases} \quad (12)$$

$$\mu_{ab} = \frac{h \vec{v}_{ab} \cdot \vec{r}_{ab}}{\bar{r}_{ab}^2 + \eta^2}, \quad (13)$$

где \bar{c}_{ab} – среднее значение скорости звука, а $\bar{\rho}_{ab}$ – среднее значение плотности для частиц a и b .

Первое слагаемое вводит искусственную вязкость, аналогичную физической вязкости. Второе слагаемое необходимо для предотвращения нефизичного проникновения быстро сближающихся частиц друг сквозь друга. Константы выбирались с учетом рекомендаций, изложенных в работах [6, 10]: $\alpha = 0,1$; $\beta = 1,0$. В ряде численных экспериментов ввиду неустойчивого поведения частиц возникала необходимость корректировки констант.

Коэффициент $\eta^2 = 0,01 \cdot h \cdot h$ необходим для обеспечения стабильности в случае движения двух частиц навстречу друг другу [6]. Как и отмечалось в [1] конкретный

выбор коэффициентов оказывает слабое влияние на результаты моделирования.

В расчетах внимание, в первую очередь, уделялось гидравлическому взаимодействию жидких сред без учета процессов теплообмена, поэтому уравнение (11) не включалось в систему решаемых уравнений.

В соответствии с концепцией, изложенной в [1], реальная жидкость аппроксимируется жидкостью с искусственной сжимаемостью. Для определения давления в уравнении (10) используется уравнение состояния:

$$P = B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^7 - 1 \right). \quad (14)$$

Уравнение (14) показывает насколько изменяется давление при изменении плотности относительно начальной значения ρ_0 . Коэффициент B определяет диапазон изменения плотности и равен начальному давлению $P_0 = 1,0e5$.

Для перемещения частиц используется простое уравнение движения, дополненное членом, учитывающим взаимное влияние частиц. Дополнительный член эмулирует физическое явление поверхностного натяжения, что позволяет придать большую стабильность свободной поверхности жидкости, а также предотвратить проникновение одной жидкости в другую:

$$\frac{d\vec{r}_a}{dt} = \vec{v}_a + \varepsilon \sum_b m_b \left(\frac{\vec{v}_b - \vec{v}_a}{\bar{\rho}_{ab}} \right) W_{ab}. \quad (15)$$

Здесь $\bar{\rho}_{ab}$ – средняя плотность между двумя частицами, а $0 < \varepsilon < 1$ – константа. Скорость каждой частицы на текущем шаге по времени определяется решением системы уравнений (8), (10), (12) и корректируется в соответствии с уравнением (15). Очевидно, что на скорость частицы оказывают большее влияние более близко расположенные частицы и общее движение частиц жидкости начинает носить более упорядоченный характер. В численных экспериментах ε принимает значения в диапазоне от 0,0 до 0,2.

Для формирования твердых границ сосудов в ряде задач применялись неподвижные частицы, которые взаимодействуя с частицами жидкой среды, сообщают им дополнительное ускорение:

$$a(r) = \frac{D}{r} \left(\left(\frac{r_0}{r} \right)^9 - \left(\frac{r_0}{r} \right)^6 \right). \quad (16)$$

Направление ускорения – вдоль линии, соединяющей центры частиц, в сторону от граничной частицы к частице жидкости. Величина коэффициента D по порядку должна соответствовать квадрату максимальной скорости жидких частиц в эксперименте. Это необходимо для предотвращения проникновения быстрых частиц сквозь твердые стенки. В расчетах коэффициент D принимался равным 10.

Граничные частицы располагаются с интервалом в три раза меньшим, чем начальное расстояние между частицами жидкости, что позволяет создать достаточно надежный барьер для частиц жидкой среды.

ТЕСТ НА СОХРАНЕНИЕ НЕСЖИМАЕМОСТИ НА ПРИМЕРЕ КОЛЕБАНИЙ ДВУМЕРНОЙ ЭЛЛИПТИЧЕСКОЙ КАПЛИ

Для проверки алгоритма и расчетного кода был проведен ряд численных экспериментов. Все эксперименты моделировались в 2 измерениях, однако авторы не видят серьезных препятствий для проведения 3-мерных расчетов, а упрощенность расчетов объясняется необходимостью отладки кода на более простых моделях на начальном этапе разработки.

С целью валидации созданного кода и подбора необходимых констант в решаемых уравнениях был проведен численный расчет простейшей задачи – формоизменение жидкой капли при больших скоростях деформаций. Данная задача рассматривалась в работе [1].

Капле, состоящей из 279 частиц (рис. 1), находящейся в невесомости в начальный момент времени задается линейное поле скоростей $[-50(x - x_0); 50(y - y_0)]$. Диаметр капли 0,4 м, начальная скорость частиц на поверхности 10 м/с. При этом, как и ожидалось, деформация с погрешностью, не превышающей 10%, соответствует поведению несжимаемой жидкости. В данном случае индикатором несжимаемости жидкости является постоянство площади капли. Колебания плотности не превышали 5%. Величина колебаний плотности зависит от равномерности распределения частиц. Достичь меньших колебаний плотности можно увеличив количество частиц, а также изменив форму сетки в начальном распределении частиц.

В целом результаты данного теста хорошо описывают поведение несжимаемой жидкости и согласуются с результатами подобных расчетов, представленными в работе [1].

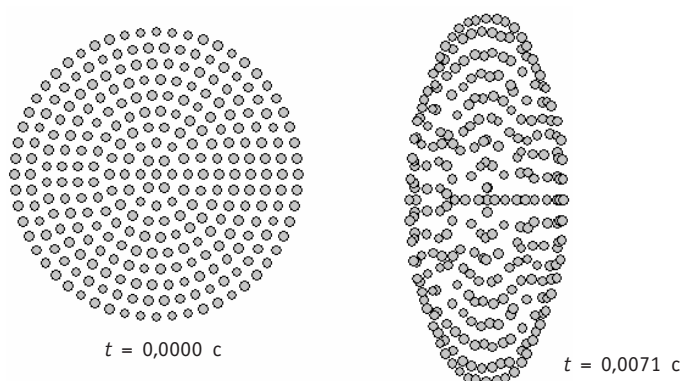


Рис. 1. Распределение частиц при моделировании эволюции эллиптической капли: $d = 0,4$ м, $\rho = 1000$ кг/м³, начальная скорость $v_0 = [-50(x - x_0); 50(y - y_0)]$ м/с

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ ФРАГМЕНТАЦИЯ ПАДАЮЩЕЙ ЖИДКОЙ КАПЛИ В НЕПОДВИЖНОЙ ЖИДКОЙ СРЕДЕ

Для демонстрации возможностей моделирования взаимодействия двух жидкостей, проведены два численных эксперимента, результаты которых представлены на рис. 2 и 3. В объем жидкости с плотностью 1000 кг/м³, находящейся в сосуде с твердыми стенками, под действием силы тяжести падает жидкая капля с плотностью 9000 и 2500 кг/м³. Скорость капли в момент контакта с объемом жидкости $V_c = 6$ м/с. Для моделирования использовалось 5472 частицы, из которых 130 – частицы падающей капли, 523 – частицы, формирующие твердую стенку.

На рисунках видно, что частицы более тяжелой жидкости (более темные) не смешиваются с остальными частицами.

При контакте капель с объемом жидкости происходит деформация капель (уплощение). При дальнейшем гидродинамическом взаимодействии в случае капли с $\rho = 9000$ кг/м³ происходит ее фрагментация на несколько крупных частей. В случае капли с $\rho = 2500$ кг/м³ фрагментация не наблюдается, однако в ряде подобных экспериментов происходил отрыв отдельных частиц капли. Это может быть объяснено недостатками расчетной модели и некорректным подбором коэффициентов.

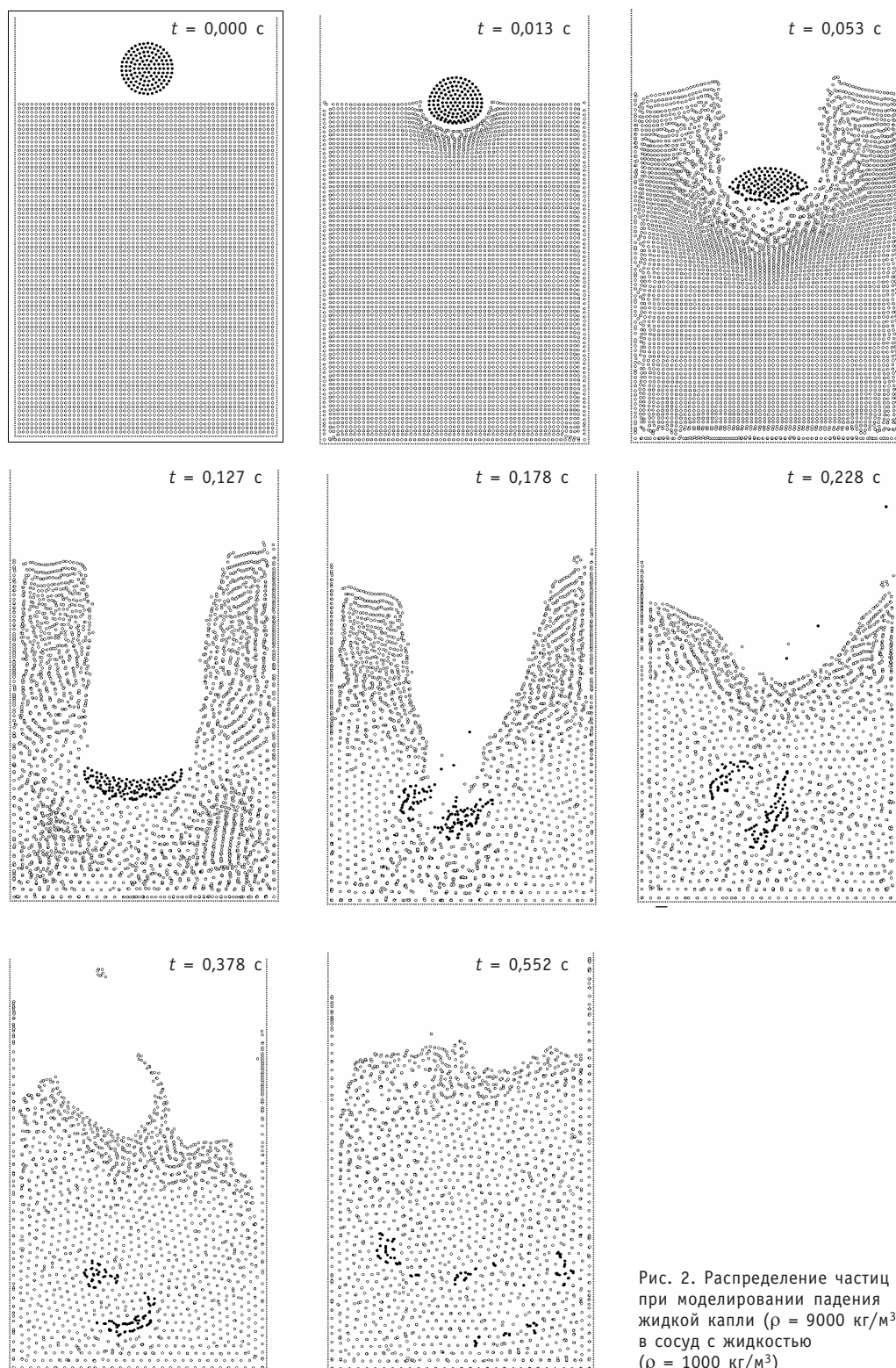


Рис. 2. Распределение частиц при моделировании падения жидкой капли ($\rho = 9000 \text{ кг/м}^3$) в сосуд с жидкостью ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$)

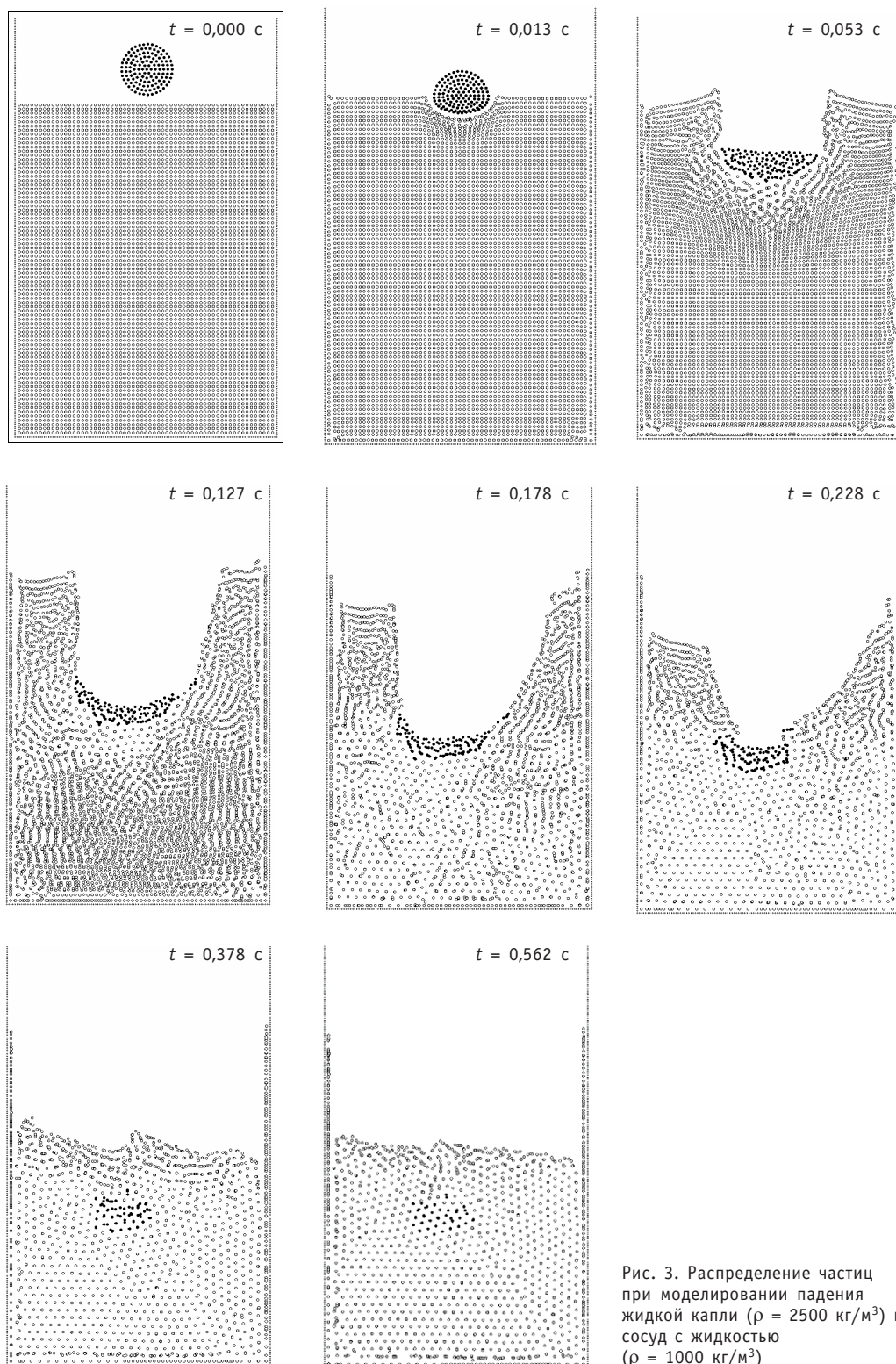


Рис. 3. Распределение частиц при моделировании падения жидкой капли ($\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$) в сосуд с жидкостью ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$)

Несмотря на использование концепции искусственной вязкости, поведение системы жидкостей соответствует реально наблюдаемым физическим явлениям, таким как волны на свободной поверхности жидкости, образование и слияние капель, ударные волны в объеме жидкости. В процессе эксперимента система «жидкий объем» – «капля» за счет диссипации теряет кинетическую энергию и приходит к стабильному состоянию.

Несмешивание двух разнородных жидкостей достигается за счет суммирования в уравнении (8) только по частицам данной жидкости, а в уравнении (10) по всем частицам, лежащим внутри области влияния рассматриваемой частицы. Также используется коррекция скорости для частиц жидкостей с коэффициентом $\varepsilon=0.2$.

Из приведенных иллюстраций видно, что в области вертикальных стенок сосуда наблюдается аномальное поведение частиц жидкости, что, по-видимому, указывает на недостатки выбранной методики моделирования взаимодействия частиц жидкости с частицами твердой стенки. Данное аномальное поведение вблизи вертикальных границ не оказывает существенного влияния на интересующие авторов проблемы.

К сожалению, аналитическое решение данной задачи невозможно даже в упрощенной постановке, а описанные в доступной литературе эксперименты проводятся для случаев, в которых существенным является наличие сильного термического взаимодействия между жидкостями. Поэтому в настоящее время верификация полученных результатов представляется затруднительной. Однако авторы планируют проведение специальных экспериментов на опытной установке в Шанхайском технологическом университете (SJTU), которые позволят произвести сравнение данных расчетов с экспериментальными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе метода SPH создан расчетный код, позволяющий моделировать процессы фрагментации в жидких средах, обусловленные гидродинамическими эффектами. Метод SPH впервые применен для изучения взаимодействия жидких сред с различной плотностью, в частности, их гидродинамической фрагментации.

Численные эксперименты показали большой потенциал метода SPH по моделированию свободной поверхности жидкости, перемещаемой границе раздела различных жидких сред, образования волн на поверхности, капель, ударных волн в жидкости и ряда других эффектов. Полученные результаты соответствуют реальным физическим процессам, однако требуется тщательный подбор коэффициентов в решаемых уравнениях.

Отмечен ряд недостатков в предлагаемой математической модели. Методика моделирования взаимодействия частиц жидкости с твердыми стенками, основанная на использовании специальных граничных частиц, показала свою состоятельность, но очевидна необходимость ее доработки для предотвращения ряда аномальных явлений.

Метод SPH может быть в дальнейшем применен для моделирования не только гидродинамических, но и для термических эффектов, играющих важную роль в процессах фрагментации в жидких средах. Для этого требуется разработка законченной теоретической модели термического взаимодействия и наличие надежных данных о термодинамических свойствах взаимодействующих жидкостей.

Литература

1. *Monaghan J.J., Thompson M.C., Hourigan K.* Simulation of free surface flows with SPH//ASME symposium on computational methods in fluid dynamics (Lake Tahoe, 19-23 June, 1994).
2. *Gingold R.A., Monaghan J.J.* Smoothed particle hydrodynamics: theory and application to non-spherical stars//Mon. Not. R. astr. Soc. – 1977. – 181. – P. 375-389.
3. *Monaghan J.J.* Smoothed particle hydrodynamics//Annu. Rev. Astron. Astrophys. – 1992. 30: 543-574.
4. *Monaghan J.J.* An introduction to SPH//Computer Physics Communications. – 1988. – V. 48. – P. 89-96.
5. *Блажевич Ю.В., Иванов В.Д., Петров И.Б., Петвиашвили И.В.* Моделирование высокоскоростного соударения методом гладких частиц// Математическое моделирование. – 1999. – Т. 11. – № 1.
6. *Liu G.R., Liu M.B.* Smoothed Particle Hydrodynamics. A Meshfree Particle Method. – World Scientific Publishing Co Pte Ltd. 2003.
7. *Kulasegaram S., Bonet J.* Variational formulation of fractional step methods in SPH fluid mechanics applications/European congress on computational methods in applied sciences and engineering (ECCOMAS 2004), 24-28 July, 2004.
8. *Di L., Sigalotti G., Daza J., Donoso A.* Modelling free surface flows with smoothed particle hydrodynamics// Condensed Matter Physics. – 2006. – V. 9. – № 2(46). – P. 359-366.
9. *Ellero M., Kroger M., Hess S.* Viscoelastic flows studied by smoothed particle hydrodynamics// Journal of non-Newtonian fluid mechanics. – 2002. -105. – P. 35-51.
10. *Lattanzio J.C., Monaghan J.J., Pongracic H., Schwarz M.P.* //Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 1985. – V. 215. – P.125.

Поступила в редакцию 27.12.2007

Contribution of (γ , n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.542:536.24

Experimental Researches of Direct Contact Steam Generators Characteristics with Heavy Liquid Metal Heat-Carriers \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, S.U. Savinov, P.A. Bokov, M.D. Zefirov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 8 illustrations. – References – 4 titles.

Experimental researches of direct contact lead and lead-bismuth heat-carriers steam generators elements characteristics are resulted.

The water-steam phase input and dispergation devices entered into liquid metal, formed bubbles sizes, the bubbles emersion speed, characteristics of heat exchange between liquid metal and bubbles were researched. Experiments were conducted under a range of lead and lead-bismuth eutectic temperatures 350-550°C; pressure of submitted water 0,2-8,0 MPa; forming bubble and the jet (torch) outflow charges of water up to 200 kg/h; durable liquid metal free surface steam loading up to 10,0 m³/m²h.

УДК 621.039.534

Numerical Modeling of Fragmentation in Liquid Media with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method \A.P. Vorobev, V.I. Kriventsev, Qian Lin, Xuewu Cao; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 3 illustrations. – References – 10 titles.

An application of the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to liquid media fragmentation is demonstrated. Sample hydrodynamics problems are solved numerically. The detailed mathematical explanation of the method is given for non-viscous fluid approach while using artificial dissipative term applied in the Euler equation.

УДК 536.24.621.039.526

Natural Convection Specificity in Complex Loops \S.G. Kalyakin, Yu.P. Djusov, Yu.Yu. Shteyn, Yu.V. Klimanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 10 titles.

Now the natural convection is of great interest for many researchers from the point of view its use in the systems of passive cooling and removal of residual heat from nuclear reactor core at accident situations. Due to it investigation of the natural convection specificity is rather actual and useful for the NPP safety validation.

In this paper the investigation of natural convection evolution dynamics in closed loop is presented and the character of flow parameters changing in dependence of different factors (heat generation intensity, loop geometry) is shown.

УДК 621.039.564

Choosing of Frequency Range for Thermocorrelation Flowmeter \B.V. Keadze, V.A. Shurupov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 8 titles.

Thermocorrelation method is widely used at test facilities and reactors in particular for flow measurement in fuel subassemblies. The experiments at flow calibration rig and reactor loop using hardware and digital filters suggested strong dependence of booth systematic and statistical error from frequency range chosen. Some practical recommendations are given for different conditions with the aim to minimize total error.

УДК 532.542:621.181.6

The Reduce of VVERs Steam Generator Power Output due to Deposits on the Tubes \A.A. Lukyanov, V.B. Smykov, Yu.S. Yuriev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya