

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Российская академия наук

Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике

ХІІІ ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКЕ

Сборник тезисов докладов в 4 томах

21—25 августа 2023 года
Санкт-Петербург

Т о м 4

МАТЕРИАЛЫ СИМПОЗИУМОВ
И ИСТОРИЧЕСКОЙ СЕССИИ



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС

Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2023

УДК 531/534
ББК 22.2
В85

ХIII Всероссийский Съезд по теоретической и прикладной механике : сборник тезисов докладов в 4 томах, 21–25 августа, 2023 г., Санкт-Петербург. Т. 4. Материалы симпозиумов и Исторической сессии. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2023. – 938 с.

Том 4 содержит расширенные тезисы устных и стендовых докладов одиннадцати симпозиумов и Исторической сессии.

ISBN 978-5-7422-8283-9 (т. 4)
ISBN 978-5-7422-8279-2
doi:10.18720/SPBPU/2/id23-630

© Российская академия наук, 2023
© Российский национальный комитет
по теоретической и прикладной механике, 2023
© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2023

ВЛИЯНИЕ НЕДОГРЕВА ВОДЫ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА С ВОДОЙ

Сиваков Н.С., Якуш С.Е.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН
sivakov@ipmnet.ru

Аннотация. Взаимодействие высокотемпературных расплавов с водой может приводить к явлению парового взрыва. Взрывы, возникающие в стратифицированной конфигурации, достаточно мощные, что говорит о развитии предварительного перемешивания расплава с водой. В данной работе рассматривается стратифицированная конфигурация в трехфазной системе «расплав-пар-вода». Проведены численные расчеты взаимодействий, происходящих при различных степенях недогрева воды до температуры насыщения. Рассмотрено влияние недогрева воды на ключевые факторы, влияющие на развитие области предварительного перемешивания: эволюцию поверхности расплава, развитие паровой пленки.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-19-00289.

Явление парового взрыва

Паровой взрыв – явление теплового взаимодействия между холодной (вода, другие вскипающие жидкости) и горячей жидкостями (высокотемпературные расплавы), происходящее при их смешении, приводящее к превращению внутренней энергии горячей жидкости в механическую энергию с формированием ударной волны, которая усиливается с течением времени в результате дальнейшего перемешивания жидкостей (самоподдерживающаяся волна термической детонации) [1, 2]. Данное явление встречается в энергетике, металлургии, вулканологии.

Важнейшей стадией парового взрыва является стадия предварительного перемешивания расплава с водой, в результате которой образуется взрывоопасная смесь крупных капель расплава, окруженных паровой пленкой. Достоверно известно, что характеристики волны парового взрыва существенно зависят от параметров трехфазной области предварительного перемешивания – размеров образующихся капель расплава, недогрева воды до температуры насыщения, перегрева расплава по отношению к температуре плавления.

Стратифицированные паровые взрывы, происходящие при растекании слоя расплава по дну бассейна с водой, могут быть достаточно мощными, что было показано в недавней экспериментальной работе [3]. Полученные результаты противоречат установившемуся предположению об устойчивости стратифицированной трехфазной системы «расплав-пар-вода» [4], включающему отсутствие стадии предварительного перемешивания. Экспериментально показанная возможность взрыва прививает интерес к изучению различных механизмов образования области предварительного перемешивания для стратифицированных конфигураций.

Параметры и расчетная модель

Данная работа посвящена трехмерному численному моделированию взаимодействия расплава с водой в стратифицированной трехфазной конфигурации «расплав-пар-вода». Условия взаимодействия предполагались близкими к экспериментам [3] по изучению стратифицированных паровых взрывов при растекании расплава $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-WO}_3$ в заполненном водой мелком бассейне. Данный расплав часто используется для моделирования реального кориума.

Взаимодействие инициируется движением цилиндрической струйки воды диаметром $D_j = 3$ мм и длиной $L_j = 34$ мм по направлению к поверхности расплава со скоростью $v_j = 8$ м/с с последующим ударом струи о поверхность слоя расплава глубиной $H_m = 14$ мм, отделенной от воды тонким слоем насыщенного пара $H_p = 2$ мм. Температура расплава принималась соответственно эксперименту [3]: $T_m = 1400$ К, а температура воды варьировалась значениями $T_l = 348, 323, 298$ К (недогрев до кипения $\Delta T = 25, 50, 75$ градусов соответственно).

Общий размер расчетной области составляет $50 \times 25 \times 70$ мм, в ней вводится декартова сетка размером $200 \times 100 \times 330$ ячеек с частичным разрежением по координате z в верхней части области.

Используемый расчетный код основан на методе объема жидкости (Volume of Fluid, VOF), в котором для описания многофазной системы вводится эффективная жидкость, свойства которой зависят от объемных долей фаз. Численное моделирование проводилось с помощью набора инструментов CFD с открытым исходным кодом OpenFOAM-v2012 [5]. Для решения требуемых задач на основе существующих расчетных модулей был реализован новый решатель *foamFoam*, адаптированный к задачам с сжимающимися жидкостями и фазовыми переходами одновременно. Вычислительный модуль был верифицирован на аналитических решениях и валидирован на экспериментальных данных, а также использован в недавней работе по изучению взрыва одиночных капель расплава [6].

Основные результаты

Изначально, при ударе цилиндрической струи воды по расплаву начинается формирование каверны на поверхности расплава. По мере продвижения струи вглубь расплава, края каверны в виде тонкой пленки расплава поднимаются вверх и образуют венец расплава различной формы (рис.1). Видно, что эти формы заметно различаются. Если для варианта с наименьшим недогревом форма венца представляет практически гладкую цилиндрическую поверхность, то для самой холодной жидкости форма венца состоит из множества струек расплава, которые к тому же фрагментируются на мелкие капли, что существенно повышает площадь поверхности контакта расплава с водой и приводит к дополнительному парообразованию.

Когда струя воды достигает дна расчетной области, каверна начинает увеличиваться в размерах за счет двух основных факторов – радиального движения жидкости и сопутствующего парообразования. Результаты показали, что максимальный диаметр каверны в плоскости нижней границы расчетной области наблюдается при недогреве воды $\Delta T = 75$ градусов и соответствует 22 мм, для недогревов $\Delta T = 50$ и $\Delta T = 25$ градусов данные диаметры составили 19 и 17 мм соответственно. Это можно объяснить тем, что часть неиспарившейся воды наибольшая для случая с максимальным недогревом.



Рис. 1. Форма поверхности расплава в момент времени 50 мс; недогрев $\Delta T = 25, 50, 75$ градусов (слева направо)

Далее образовавшаяся каверна схлопывается, при этом образуется вертикальная кумулятивная струйка расплава (рисунок 2). Для случая с самой горячей водой данная струя имеет выраженную цилиндрическую форму, когда как для двух остальных вариантов эта форма является сложной, вследствие того, что при подъеме расплав сталкивается с водой, и чем эта вода холоднее, тем сложнее расплаву подниматься вверх. Действительно, если недогрев воды небольшой, то времени подъема оказывается достаточно, чтобы испарить воду над расплавом, и струя поднимается уже сквозь область образовавшегося пара, что хорошо заметно на рисунке 3. Максимальные высоты подъема целостных частей струй относительно начального уровня расплава наблюдаются около 110 мс и составляют 26, 15 и 8 мм для недогрева воды $\Delta T = 25, 50$ и 75 градусов соответственно.



Рис. 2. Форма поверхности расплава в момент времени 100 мс; недогрев $\Delta T = 25, 50, 75$ градусов (слева направо)

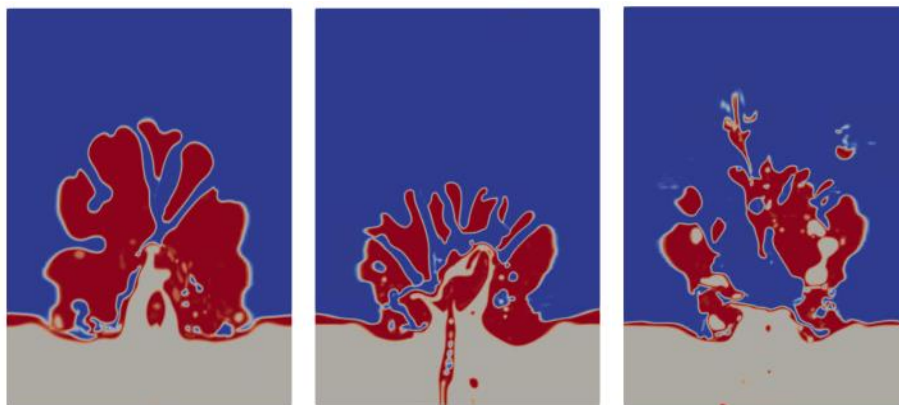


Рис. 3. Структура трехфазного течения в плоскости симметрии в момент времени 80 мс; недогрев воды $\Delta T = 25, 50, 75$ градусов (слева направо)

Важнейшим фактором, ускоряющим теплообмен между расплавом и водой, и, в частности, влияющим на энергетику парового взрыва, является увеличение площади поверхности расплава при взаимодействии. На рисунке приведен график эволюции данной относительной площади для двух вариантов недогрева воды. Заметно, что после начального взаимодействия площадь поверхности для варианта с большим недогревом воды превышает площадь поверхности для случая с более теплой водой. Взаимодействие расплава с более холодной водой приводит к увеличению скорости испарения, повышению локального давления в области контакта, что и приводит к фрагментации расплава, образованию струек и мелких капель. Поведение графика в области в районе 80 мс, где, вопреки ожиданиям, площадь для варианта с меньшим недогревом больше, чем для более холодной жидкости, можно объяснить на основе рисунка 3. Каверна в этом случае схлопывается не полностью из-за наличия захваченной неиспарившейся воды, что и увеличивает регистрируемую площадь.

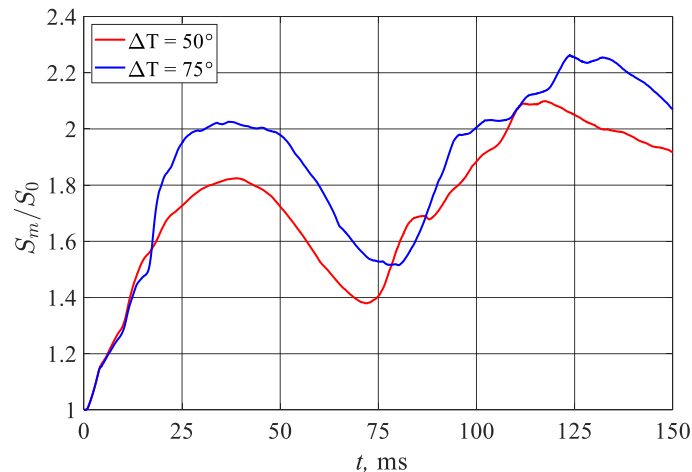


Рис. 4. Относительная площадь расплава в зависимости от времени

Заключение

В данной работе путем численного моделирования методом VOF было изучено влияние недогрева воды на характеристики взаимодействия расплава с водой при ударе одиночной водяной струйки по поверхности расплава. Показано, что для наиболее холодной воды наблюдается наиболее выраженное развитие поверхности расплава с формированием множества капель и микроструек. Это создает условия для формирования трехфазной области предварительного перемешивания, характерной для стратифицированных паровых взрывов. В дальнейшей работе планируется рассмотреть механизм предварительного перемешивания в приближенных к реальным условиям, включающих растекание слоя расплава по дну заполненного водой бассейна.

Литература

1. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. М., ИПМех РАН, 2020, 276 с.
2. Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Термическое взаимодействие высокотемпературных расплавов с жидкостями // Теплофизика высоких температур. 2022. Т. 60. № 2. С. 280–318.
3. Kudinov P., Grishchenko D., Konovalenko A., Karbojian A. Premixing and steam explosion phenomena in the tests with stratified melt-coolant configuration and binary oxidic melt simulant materials // Nucl. Eng. Design, 2017. V. 314. P. 182–197.
4. Berthoud, G. Vapor Explosions // Annu. Rev. Fluid Mech. 2000, V. 32. P. 573–611.
5. OpenFOAM. The open source CFD toolbox, 2023 URL <https://www.openfoam.com>
6. Yakush S., Sivakov N. Numerical modeling of high-temperature melt droplet interaction with water // Ann. Nucl. En., 2023. V. 185. 109718.