



## Численное исследование взаимодействия струи воды с расплавом свинец–висмут<sup>1</sup>

Сиваков Н.С.\* , Якуш С.Е.\* , Мелихов В.И.\*\*,\*\* , Мелихов О.И.\*\*,\*\*

\*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

\*\*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва

\*\*\*Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС, Электрогорск

### Введение

Взаимодействие высокотемпературных расплавов с водой может приводить к явлению парового взрыва, встречающемуся в различных областях (тяжелые аварии на АЭС, подводные извержения вулканов, металлургия). Опасность парового взрыва в ядерной энергетике связана с возникновением ударных волн вследствие быстрого вскипания теплоносителя (вода, жидкий натрий) при контакте с расплавом активной зоны, имеющим температуру порядка 3000 К. Резкое выделение пара в процессе взаимодействия и связанное с этим расширение среды приводят к распространению по двухфазной смеси взрывных волн, которые могут нарушить целостность корпуса реактора, повредить окружающие конструкции, нарушить герметичность оболочки [1]. В конечном итоге столь серьезные воздействия, не предусмотренные при проектирова-

нии энергетических реакторов, потенциально могут повлечь за собой непоправимые последствия, такие как выход радиоактивности в окружающую среду.

Перспективным направлением развития атомной энергетики является создание реакторов с тяжелометаллическим теплоносителем (ТЖМТ). Так, в 2021 году в России началось строительство атомного энергоблока мощностью 300 МВт с инновационным реактором на быстрых нейтронах БРЕСТ-ОД-300 со свинцовым теплоносителем. Другим типом ТЖМТ является свинцово-висмутовый теплоноситель (реакторы СВБР). Опасность возникновения парового взрыва при авариях на реакторах с ТЖМТ связана с возможным разрывом теплообменной трубки парогенератора, при котором происходит истечение воды в пространство, заполненное расплавом. Фрагментация воды и расплава, вскипание истекающей воды приводят к возникновению трехфазной смеси из расплава, пара и воды, в которой возможно возникновение паровых взрывов. Поэтому весьма актуально изучение процессов взаимодействия при проникновении струи воды в расплав тяжелого металла, включая экспериментальные и численные исследования.

В работе [2] экспериментально исследовалось

<sup>1</sup>Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (проект № 21-19-00709).

динамическое поведение струи недогретой воды при проникновении в плоский сосуд с цилиндрическим дном, заполненный расплавом свинец-висмут. Динамика проникновения струи и образования каверны в расплаве визуализировались с помощью нейтронной радиографии с высокой частотой кадров, при этом измерялась глубина проникновения, форма каверны, соотношение ее длины к ширине. Был проведен ряд экспериментов, различающихся скоростью водяной струи и температурой расплава, что позволило рассмотреть гидродинамический и тепловой аспекты взаимодействия.

Данная работа посвящена трехмерному численному моделированию взаимодействия струи расплава свинец-висмут с водой. Основной целью работы являлось сравнение полученных результатов с работой [2], поэтому все параметры задачи (геометрия сосуда, температура воды и расплава, скорость струи) в расчетах принимались в соответствии с экспериментальными данными. Свойства воды и водяного пара, а также свойства расплава свинец-висмут задавались в соответствии с литературными данными.

## Вычислительная модель

Численные расчеты проводились при помощи авторского расчетного модуля *fciFoam*, разработанного в рамках программного пакета с открытым кодом OpenFOAM. В этом модуле в рамках подхода Volume-of-Fluid (VOF) реализована модель сжимаемой среды с фазовыми переходами, не имеющая аналогов в стандартном наборе расчетных модулей. Созданная модель валидирована путем качественного и количественного сравнения с аналитическими и экспериментальными данными. Бо-

лее подробная реализация модели и результаты ее применения для расчета гидродинамических и тепловых явлений при взаимодействии воды с расплавами представлены в работе [3].

## Результаты

В работе исследовано проникновение струи воды диаметром  $D_j = 6$  мм со скоростью  $V_j = 4.7$  м/с в плоский сосуд с расплавом свинец-висмут при температуре  $T_m = 778$  К, температура воды составляла  $20$  °С. Как и в экспериментах [2], расчеты проводились при атмосферном давлении, выделяющийся при вскипании воды пар свободно вытекал из резервуара через открытую верхнюю границу.

Основной экспериментальной характеристикой, полученной в работе [2] и описывающей конфигурацию каверны, возникающей при ударе струи воды по расплаву, является отношение ее глубины к ширине  $H_c/W_c$ . На рис. 1а) произведено сравнение экспериментальной [2] и численной оценок этого отношения. Видно, что численные расчеты дают правильную качественную картину развития каверны, хотя максимальное значение исследуемого отношения оказывается на 30% выше, чем в эксперименте. При этом время достижения максимума достаточно хорошо совпадает с экспериментом. К моменту достижения максимальной глубины проникновения каверна в расчетах уже интенсивно расширяется, тогда как в экспериментах наблюдается примерно постоянное значение отношения в течение некоторого времени после начала затормаживания струи.

На Рис. 1б) представлены рассчитанные и экспериментальные зависимости безразмерной глубины проникновения  $H_c/D_j$  от безразмерного времени  $t^* = tV_j/D_j$ . Наблюдается хорошее совпаде-

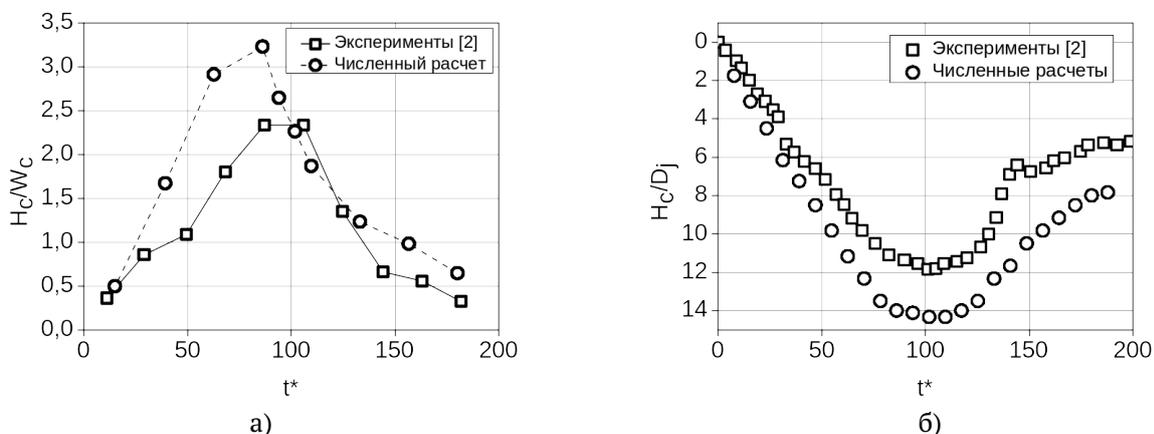


Рис. 1. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными: а) отношение глубины каверны к ее ширине; б) безразмерная глубина проникновения

ние безразмерного момента времени, соответствующего максимальной глубине ( $t^* \sim 100$ ), различие между абсолютными значениями максимальной глубины каверны составляет порядка 15%.

Результаты численных расчетов методом VOF, демонстрирующие процесс взаимодействия струи воды с расплавом, показаны на Рис. 2. Слева

(Рис. 2а) построены распределения объемных долей расплава, воды и пара в плоскости симметрии, справа (Рис. 2б) приведены поверхности воды и расплава в те же моменты времени.

В начальные моменты проникновения струи в расплав вода растекается по образующейся в расплаве каверне, при этом вдоль поверхности кавер-

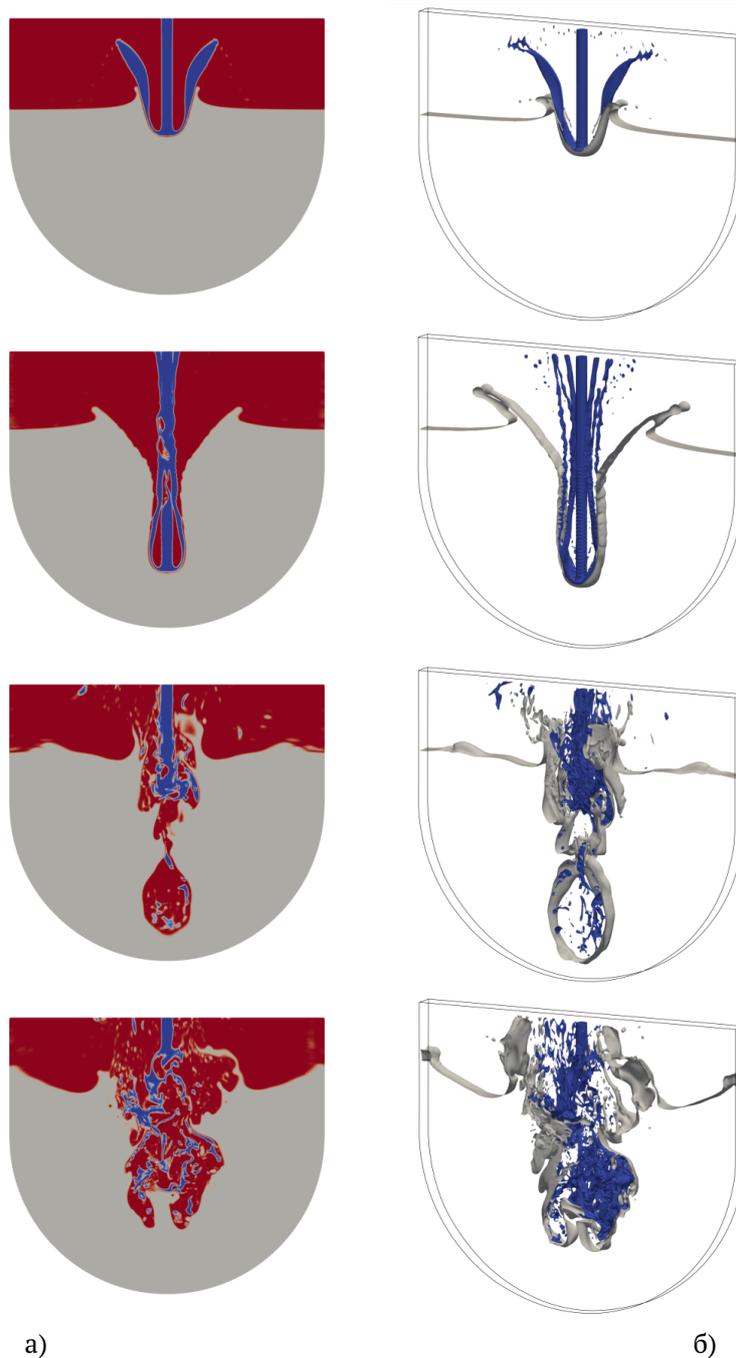


Рис. 2. Взаимодействие струи воды с расплавом: а) объемные доли фаз в плоскости симметрии; б) поверхности расплава и воды.  $t^* = 10, 65, 100, 150$  (сверху вниз)

ны направлен поток воды, поднимающийся вверх (рис. 2,  $t^* = 10$ ). Толщина водяной пленки при приближении ко дну каверны заметно меньше, там происходит вскипание воды, а образующийся пар, в свою очередь, возмущает поверхность каверны, меняя ее конфигурацию. По мере проникновения струи в расплав каверна начинает сужаться (Рис. 2,  $t^* = 65$ ), что приводит к взаимодействию струи воды и противоточного двухфазного потока воды и пара. Далее происходит разделение каверны на две части (Рис. 2,  $t^* = 100$ ), нижняя часть каверны имеет довольно гладкую форму, что может говорить о происходящем в ней пленочном кипении. После достижения максимальной глубины каверна начинает схлопываться, одновременно с этим в области начинается неустойчивое кипение, приводящее к значительной деформации поверхности расплава, что в свою очередь приводит к увеличению теплоотдачи от расплава к воде и еще более сильному вскипанию воды (рис. 2,  $t^* = 150$ ). Часть воды вытесняется из полости, и в дальнейшем форма каверны принимает свою окончательную конфигурацию. Описанные выше этапы взаимодействия хорошо соответствуют этапам, выделенными в экспериментальной работе [2] на основе анализа данных рентгеновской съемки.

## Заключение

При численном моделировании взаимодействия струи воды с расплавом свинец-висмут методом VOF получена картина, хорошо согласующаяся с экспериментальными наблюдениями. На этапе первичного проникновения струи, вплоть до достижения максимальной глубины проникновения, расчет воспроизводит наблюдающиеся в экспериментах конфигурации каверны, включая ее разделение на две части. В процессе взаимодействия, сопровождающегося интенсивным кипением, происходит сильное развитие гидродинамической неустойчивости на поверхности каверны, приводящее к фрагментации расплава и образованию трехфазной области. Для более подробного изучения влияния кипения на динамику взаимодействия в дальнейших работах будет проведена оценка возникающих тепловых потоков и коэффициентов теплоотдачи.

## Список литературы

- [1] Мелихов В.И., Мелихов О.И., Якуш С.Е. Теплофизика и гидродинамика паровых взрывов. М., ИПМех РАН, 2020, 276 с.
- [2] Sibamoto Y., Kukita Y., Nakamura, H. Visualization and Measurement of Subcooled Water Jet Injection into High-Temperature Melt by Using High-Frame-Rate Neutron Radiography // Nucl. Technol. 2002. V.139. P. 205–220.
- [3] Yakush S.E., Sivakov N.S. Numerical Modeling of High-Temperature Melt Droplet Interaction with Water // Ann. Nucl. Energy. 2023. V. 185. Article 109718.