

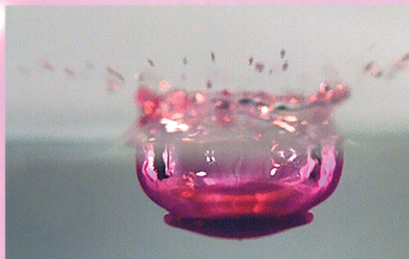
ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ

# 14-я международная конференция - ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ



ФГБУН ИНСТИТУТ  
ПРОБЛЕМ МЕХАНИКИ  
им. А.Ю. Ишлинского РАН

28 ноября - 01 декабря 2023 г.



# ВОЛНЫ И ВИХРИ В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ

МАТЕРИАЛЫ ШКОЛЫ

Москва, 2023 г.

*FUNDAMENTAL AND ENVIRONMENTAL FLUID MECHANICS*



**14-АЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ**

# **ВОЛНЫ И ВИХРИ В СЛОЖНЫХ СРЕДАХ**

Москва, 28 ноября – 01 декабря, 2023

## **WAVES AND VORTICES IN COMPLEX MEDIA**

PROCEEDINGS OF  
14-th INTERNATIONAL CONFERENCE –  
SCHOOL OF YOUNG SCIENTISTS

Moscow, November 28 – December 01, 2023

УДК 532

ББК

22/253

В67

В67

**Волны и вихри в сложных средах:** 14-ая международная конференция – школа молодых ученых; 28 ноября – 01 декабря 2023 г., Москва: Сборник материалов школы. – М.: ООО «ИСПО-принт», 2023. – 348 с.

ISBN 978-5-91741-289-4

Материалы 14-ой международной конференции – школы молодых ученых “Волны и вихри в сложных средах”, посвященной обсуждению фундаментальных и прикладных проблем механики жидкостей и газов в природных и техногенных системах.

*Ключевые слова:* волны, вихри, математическое и лабораторное моделирование, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 532  
ББК 22/253

Proceedings of the 14-th international conference – scientific school of young scientists “Waves and vortices in complex media” dedicated to the discussion of fundamental and applied problems in fluid and gas mechanics for environmental and technological systems.

*Keywords:* waves, vortices, mathematical and laboratory modelling, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.

ISBN 978-5-91741-289-4

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, 2023

соизмеримых с диаметром струи. В то же время, в большинстве работ, посвященных изучению закономерностей изгиба струи (например [4]) обсуждаются закономерности развития длинноволновых возмущений. Задача изгиба струи в математической формулировке оказывается аналогичной задаче потери устойчивости сжатой балки [5]; в этом смысле как правило задача исследуется в постановке, аналогичной теории балок Эйлера–Бернулли. В данной работе задача изгиба струи исследована в постановке, аналогичной теории изгиба балок Тимошенко. Дополнительно предложен метод расчета максимального углового отклонения струи, основанный на учете нелинейных эффектов в окрестности капиллярной форсунки. Проводится сравнение теоретически полученных результатов с экспериментами.

В КХИ ряд ограничений на параметры капельного потока определяются закономерностями взаимодействия капельного потока с уловителем капель. Разработано несколько различных концепций уловителей капель. Но в уловителе любого типа капельный поток взаимодействует с поверхностью движущейся пленки. В уловителе капель КХИ недопустимо возникновение вторичных капель при сборе дисперсного потока. В данной работе методами механики Лагранжа исследуются развитие неустойчивостей на поверхности жидкой пленки, взаимодействующей с капельным потоком.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Yakubenko P.A.* Capillary instability of an ideal jet of large but finite length // European journal of mechanics. В, Fluids. 1997. V. 16. N. 1. p. 39–48.
2. *Utemura A., Osaka J., Shinjo J. et al.* Coherent capillary wave structure revealed by ISS experiments for spontaneous nozzle jet disintegration // Microgravity Sci. Technol. 2020. V.32. p. 369–397.
3. *Fuchikami N., Ishioka S., Kiyono K.* Simulation of a Dripping Faucet // J. Phys. 1999. Soc. Jpn. 68. p. 1185–1196.
4. *Энтов В.М., Ярин А.Л.* Динамика струй капельной жидкости. Институт проблем механики АН СССР. Препринт № 127. 1979. 58 с.
5. *Bejan A.* On the buckling property of inviscid jets and the origin of turbulence // Letters in Heat and Mass Transfer. 1981. V. 8(3), p. 187–194.

Сафронов Андрей Александрович, [a.a.safr@yandex.ru](mailto:a.a.safr@yandex.ru)



## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ ВОДЫ С РАСПЛАВОМ СВИНЕЦ-ВИСМУТ

*Н.С. Сиваков<sup>1\*</sup>, С.Е. Якуш<sup>1</sup>, В.И. Мелихов<sup>2,3</sup>, О.И. Мелихов<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup>*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва*

<sup>2</sup>*Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва*

<sup>3</sup>*Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности АЭС,*

*Электрогорск*

*\*[sivakov@ipmnet.ru](mailto:sivakov@ipmnet.ru)*

#### 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 проектировании 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 динамическое поведение струи недогретой воды при проникновении в плоский сосуд с цилиндрическим днищем, 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 *feiFoam*, 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. Более 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°C. 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 совпадение безразмерного момента времени, соответствующего максимальной глубине ( $t^* \sim 100$ ), различие между абсолютными значениями максимальной глубины каверны составляет порядка 15%.

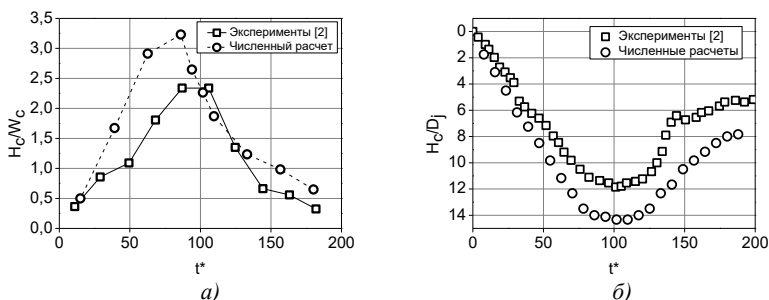


Рис. 1. Сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными: а) отношение глубины каверны к ее ширине; б) безразмерная глубина проникновения.

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 каверны 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.

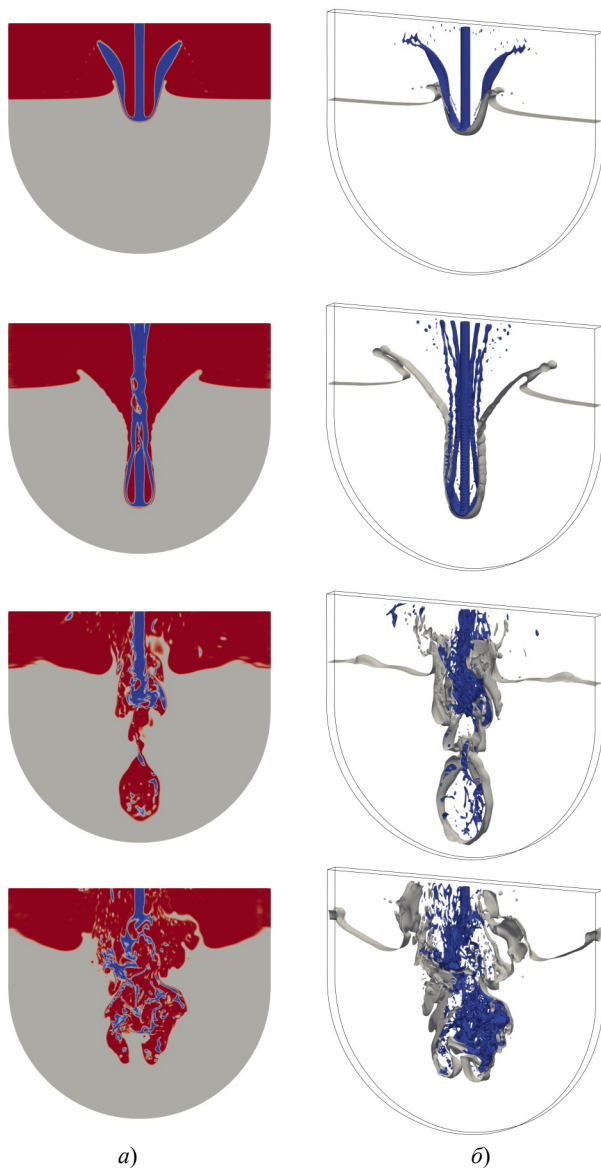


Рис. 2. Взаимодействие струи воды с расплавом: а) объемные доли фаз в плоскости симметрии; б) поверхности расплава и воды.  $t^* = 10, 65, 100, 150$  (сверху вниз)

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.

## БЛАГОДАРНОСТИ И ССЫЛКИ НА ГРАНТ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект № 21-19- 00709).

## 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.

Сиваков Никита Сергеевич, [sivakov@ipmnet.ru](mailto:sivakov@ipmnet.ru)

Якуш Сергей Евгеньевич, [yakush@ipmnet.ru](mailto:yakush@ipmnet.ru)

Мелихов Владимир Игоревич, [volodymyr.mel@yandex.ru](mailto:volodymyr.mel@yandex.ru)

Мелихов Олег Игоревич, [oleg.melikhov311@yandex.ru](mailto:oleg.melikhov311@yandex.ru)



## ДИНАМИКА СОЛИТОНОПОДОБНЫХ ВОЛНОВЫХ ГРУПП НА ВСТРЕЧНЫХ СТРУЙНЫХ ТЕЧЕНИЯХ

А.В.Слюняев<sup>1-3\*</sup>, В.И.Шура<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт прикладной физики им. А.В. Гапонова-Грехова РАН, Нижний Новгород

<sup>2</sup>Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

<sup>3</sup>НИУ "Высшая школа экономики", Нижний Новгород

<sup>4</sup>School of Mathematics and Computing, Keele University, UK

\*[slunyaev@ipfran.ru](mailto:slunyaev@ipfran.ru)