



## Экспериментально-расчетное исследование полей давления при взрывном росте и разрушении паровых пузырей охладителя на перегретой поверхности

Юдин С.М.<sup>\*,\*\*</sup>, Ковешников К.С.<sup>\*,\*\*</sup>, Ивочкин Ю.П.<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>Объединенный институт высоких температур РАН

<sup>\*\*</sup>НИУ Московский энергетический институт

### Введение

Из множества теорий, описывающих дробление горячего расплава при его взаимодействии с жидкостью-охладителем, можно выделить т.н. кавитационно-акустическую гипотезу. В ее основе лежит предположение о том, что внутри металлической капли возникают зоны с отрицательными давлениями, которые могут быть вызваны внешним воздействием. Наличие таких зон свидетельствует о возникновении растягивающих напряжений, которые в свою очередь могут приводить к разрыву металла изнутри ввиду резкого внутреннего вскипания (кавитации). Данная теория используется для объяснения процесса тонкой фрагментации капель воды и олова при кратковременном воздействии на них лазерным импульсом [1].

Цель данной работы — оценить, может ли взрывное разрушение паровых пузырей охладителя на поверхности расплава [2] инициировать

импульсы давления, достаточные для возникновения явления внутреннего вскипания.

### Экспериментальное исследование

Из-за технических трудностей количественные измерения непосредственно в жидком металле сильно затруднены. Поэтому эксперименты по измерению пульсаций давления, которые сгенерированы коллапсом паровых пузырей при кризисе поверхностного кипения дистиллированной воды, проводились непосредственно в охлаждающей жидкости (Рис. 1).

Опыты выполнены с использованием горячих стальных стержней, имеющих полусферические торцевые окончания. Стержни погружены в воду на глубину радиуса полусферы. Температуры образцов и охладителя, измеряемых термопарами типа хромель – алюмель, варьировались, соответственно, в диапазонах (200–600) °С и (15–95) °С. На фиксированном расстоянии от нижнего торца располагался пьезодатчик, измеряющий импульс давления при взрывном разрушении паровой оболочки (Рис. 1а).

Результаты эксперимента показывают (Рис. 1б), что амплитуда давления, измеренная

© Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УФИЦ РАН  
© Институт проблем механики им А.Ю. Ишлинского РАН  
© Юдин Степан Михайлович, [yudin\\_uchebnaya@mail.ru](mailto:yudin_uchebnaya@mail.ru)  
© Ковешников Кирилл Сергеевич, [koveshnikov.ks@gmail.com](mailto:koveshnikov.ks@gmail.com)  
© Ивочкин Юрий Петрович, [ivochkin@yandex.ru](mailto:ivochkin@yandex.ru)

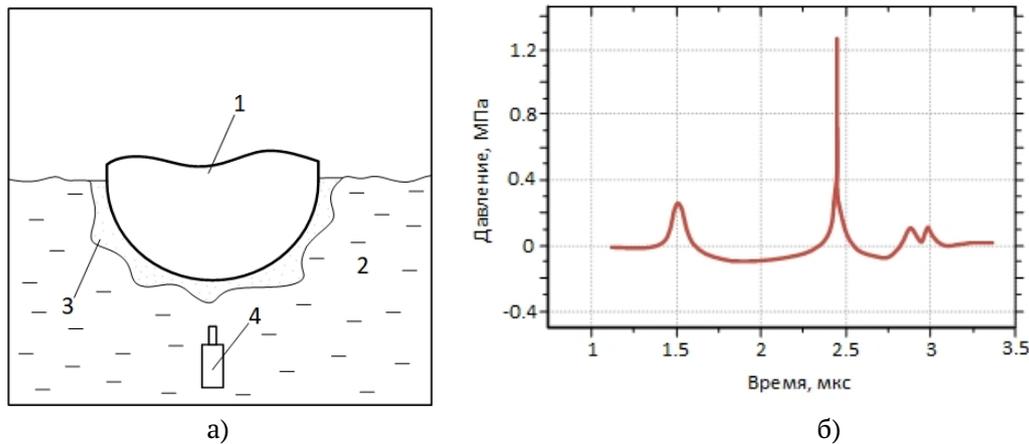


Рис. 1. а) Схема опытного участка установки: 1 – нагреваемый полусферический торец, 2 – охлаждающая жидкость, 3 – паровая пленка, 4 – пьезодатчик; б) Характерный вид осциллограммы давления на расстоянии 6 мм от торца полусферы

на расстоянии 6 мм, может превышать 10 атм., а время длительности отдельного импульса составляет несколько микросекунд.

### Численные оценки

Первоначально, опираясь на экспериментальные данные, было оценено значение амплитуды давления в точке взрывной генерации паровой структуры на горячей поверхности. Для этого проводилось численное моделирование, соответствующее эксперименту, в акустическом приближении в области охлаждающей жидкости (воде).

Расчет производился методом итерационного пересчета амплитуды давления  $p_0$ , т.е. амплитудное давление в предполагаемом месте разрушения - на нижнем торце капли варьировалось до тех пор, пока на интересующем нас расстоянии расчетное значение не совпадало с экспериментальными 1 МПа.

Характерный вид пульсаций, представленный на Рис. 1б позволяет при построении математической модели использовать гауссову форму (1) для описания импульса давления, инициируемого на поверхности расплава:

$$p_{\text{gauss}} = \begin{cases} p_0 e^{-\frac{\pi^2(t-t_0)^2}{t_0^2}}, & t \in [0, t_0], \\ 0, & t \geq t_0 \end{cases} \quad (1)$$

здесь  $t_0$  — длительность импульса задавалась порядка 1 мкс. Также предполагается, что по мере распространения волнового фронта форма импульса не изменяется, а область нагружения имеет линейный размер порядка 1 мм.

В качестве уравнения состояния для воды ис-

пользовалось соотношение в форме Тэта:

$$p = p_0 + \left( \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right),$$

здесь  $p < 3 \cdot 10^9$  Па, а  $B = 31 \cdot 10^7$ ,  $n = 7, 15$ .

В результате была получена следующая зависимость амплитудного значения давления в охлаждающей жидкости по мере удаления от места схлопывания (Рис. 2а) при наличии только одного поверхностного источника. Согласно результатам расчета, давление при таком нагружении в месте схода паровой структуры может достигать 20 МПа (200 атм.).

Опираясь на полученное значение импульса давления (удара по поверхности) был проведен расчет акустических полей непосредственно в жидкометаллической капле. Импульсная нагрузка осуществлялась в трех различных конфигурациях: одиночный местный источник давления, пара местных источников на верхнем и нижнем торцах капли, воздействие по всей сферической поверхности. В последнем случае имитируется взрывное одновременное разрушение всей паровой пленки.

Для жидкого олова при температуре плавления использовалась зависимость плотности от давления согласно уравнению состояния Ми-Грюнейзена (Рис. 2б).

Результаты расчета свидетельствуют, что внутри жидкого металла действительно возникают отрицательные давления (Рис. 3), которое практически линейно изменяется от количества дискретных источников.

При воздействии импульсом по всей поверхности давление концентрируется в центре капле

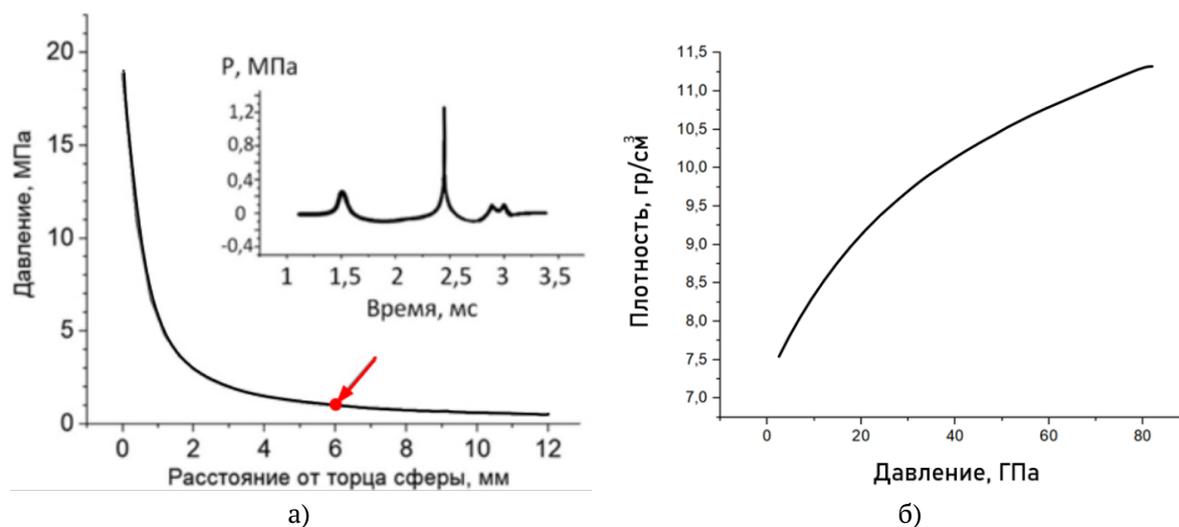


Рис. 2. а) Расчетный график зависимости давления от расстояния до места схода паровой структуры при нагружении одним источником б) график зависимость давления в жидком олове от плотности согласно уравнению Ми-Грюнейзена

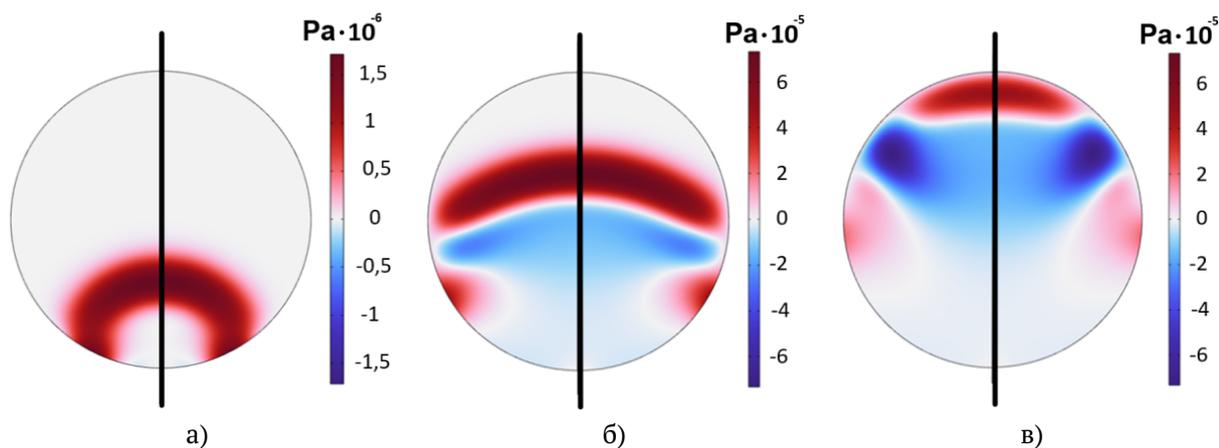


Рис. 3

и может возрастать на 1–2 порядка до (200–2000) МПа.

## Выводы

В результате работы был проведен численный расчет, благодаря которому была установлена кривая зависимости давления по мере удавления от места разрушения паровой структуры, а также оценено значения давления в самом месте разрушения.

Полученные акустические поля в капле жидко-

го олова не противоречат гипотезе кавитационно-акустической фрагментации расплава.

## Список литературы

- [1] Vinokhodov A. Y. et al. Formation of a fine-dispersed liquid-metal target under the action of femto-and picosecond laser pulses for a laser-plasma radiation source in the extreme ultraviolet range // Quantum Electronics. 2016. V. 46 (1), p. 23.
- [2] Синкевич О. А. и др. Экспериментальное исследование пленочного и переходного режимов кипения на твердых и жидкометаллических полусферах, погруженных в недогретую жидкость // Труды РНКТ-4. 2006. Т. 4. С. 208–211.