

Кафедра “Инженерной теплофизики” им. Кириллина (НИУ МЭИ)

Лаборатория 10.2 ОИВТ РАН “Тепломассообмена в энергетических установках”

“Изучение особенностей взрывной фрагментации
жидкометаллических капель, падающих в холодную воду”

Авторы: Ивочкин Ю.П., Синкевич О.А., Юдин С.М.

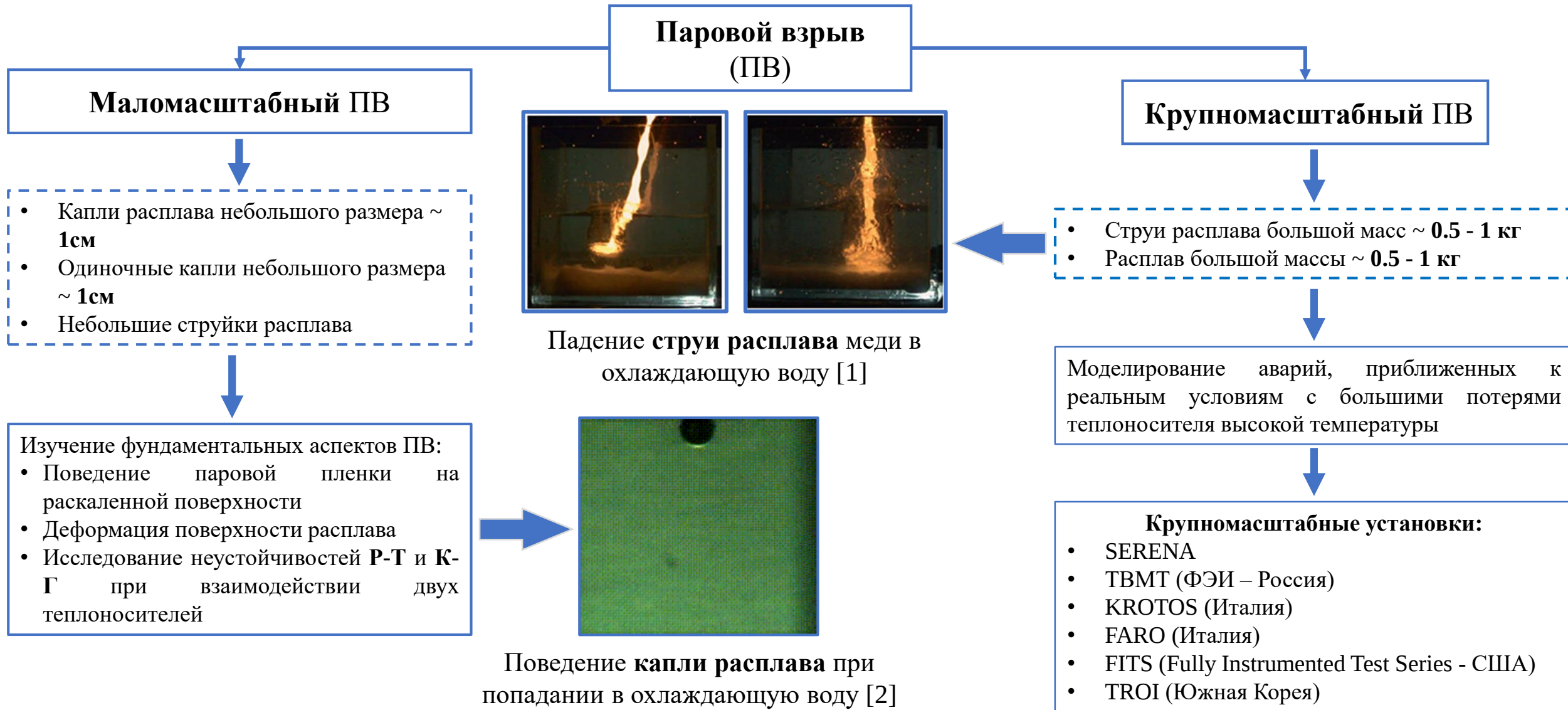
Докладчик: Юдин С.М.

Дата: 19.05.2025



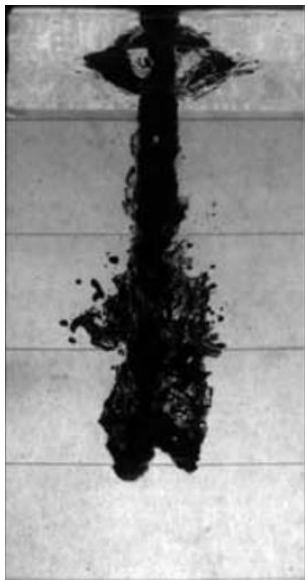
Москва, 2025

Паровой взрыв – феномен описывающий стремительное возникновение большого количества пара высокого давления при взаимодействии жидкого теплоносителя высокой температуры и холодного теплоносителя; Чаще всего, данное явление является сугубо отрицательным эффектом, т.к. способно оказывать разрушительное воздействие на корпусные элементы энергетических установок.

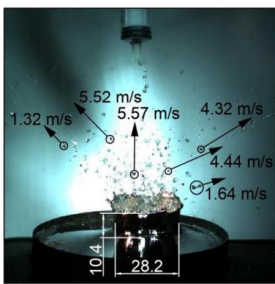
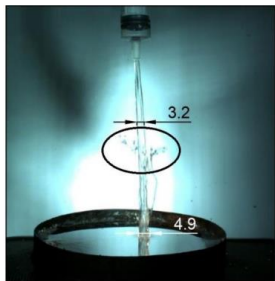


Металлургическая промышленность

- Попадание массы/струи расплава в область с охлаждающей жидкостью
- Попадание струи охлаждающей жидкости в объем расплавленного металла



а)



б)

Вход

а) струи расплавленного металла в воду [3]

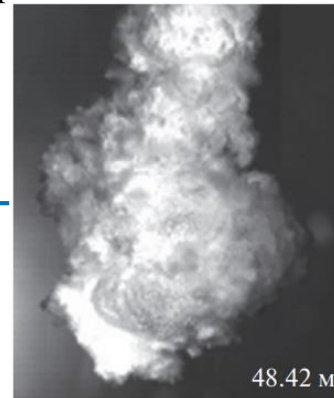
б) струи воды в область с расплавленным металлом [4]

Атомная энергетика

- Образование массы кориума с дальнейшим проникновением в бассейн с охлаждающей жидкостью
- Потеря теплоносителя в реакторах на жидких металлах и попадание расплава в область охлаждающей жидкости

Бумажная промышленность

- Взаимодействие высокотемпературных расплавов солей с водой



Паровой взрыв капли NaCl при $T = 900^\circ\text{C}$ в ходе взаимодействия с водой [5]

Транспортировка сжиженного газа

- Контакт сжиженного газа при крио температурах с водой

Моделирование РАСПЛАВА КОРИУМА с использованием ИМИТАТОРОВ

Легкоплавкие металлы и сплавы Sn, Pb, Сплав Вуда, Сплав Розе, Сплав Филдса, Bi и т.д.

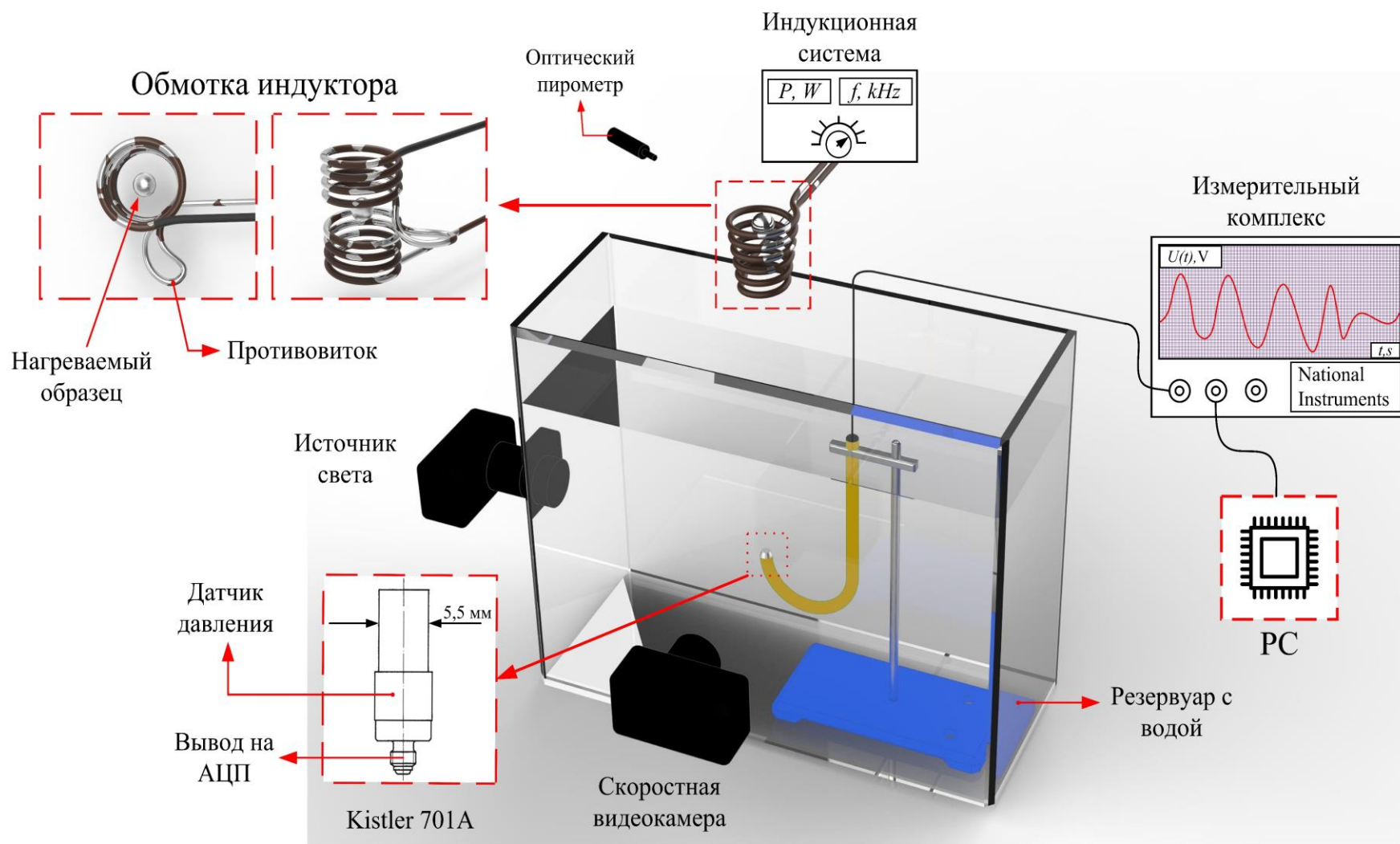
Расплавы на основе Bi и Pb и их эвтектики + расплавы солей

Тугоплавкие металлы и стали, а также их смеси

Важнейшей характеристикой при паровом взрыве является давление. Глобальная цель данной работы – исследование механизмов (причин) фрагментации расплава через импульсы давления;



- Измерение импульсов давления при паровых взрывах вида $P(t)$ и дальнейший анализ
 - Установление зависимости возникающих амплитудных значений давления P_0 от начальной температуры расплава T_0 ;
- Установление корреляции между наблюдаемой взрывной фрагментацией металлической капли и зависимостью вида $P(t)$;
- Оценка амплитудных значений давления P_0 , генерируемых вблизи места взрыва капли при их последовательной фрагментации;

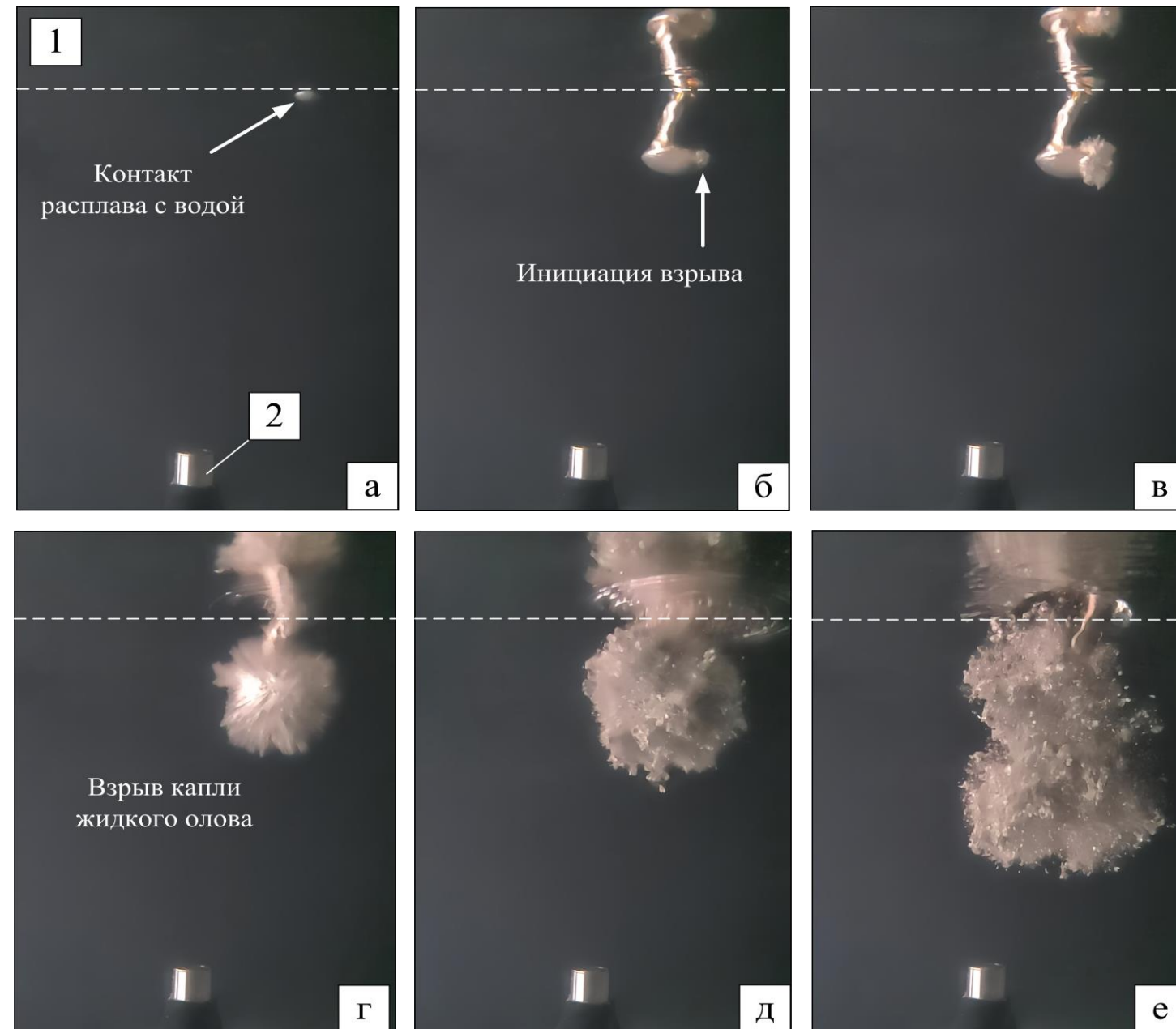


Упрощенная схема экспериментальной установки;
охлаждающая жидкость вода при $T_w = 18^\circ\text{C}$

Параметры системы	
$H, \text{ мм}$	75
$m, \text{ г}$	10
$T_w, ^\circ\text{C}$	18
$T_{\text{melt}}, ^\circ\text{C}$	600-800

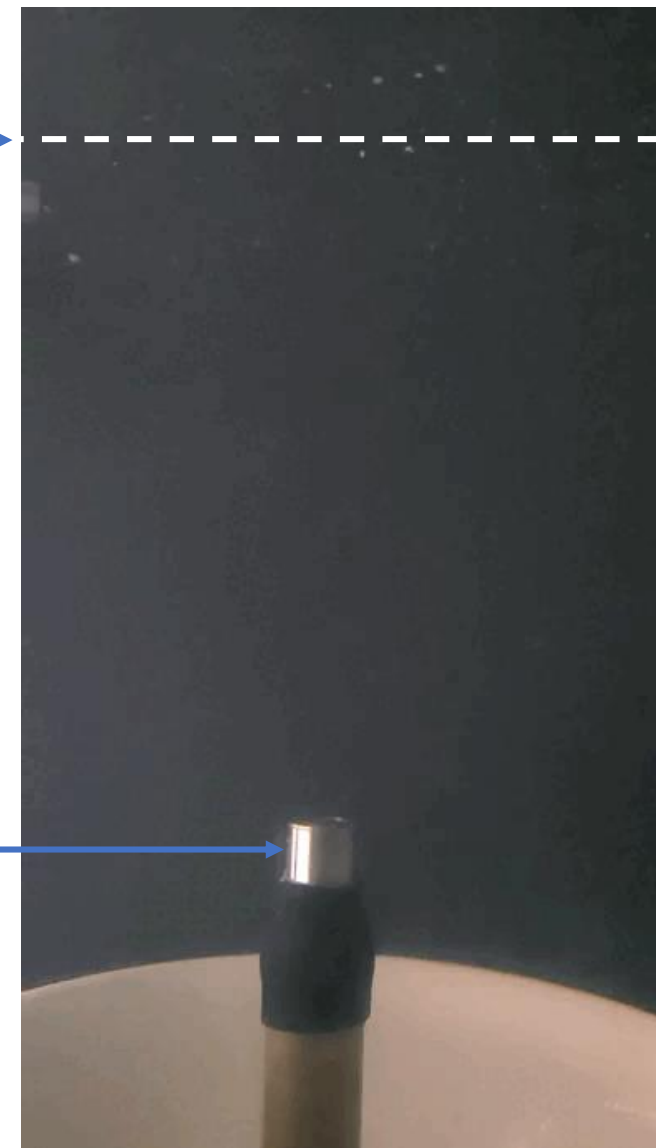


Параметры датчика	
$P_{\text{max}}, \text{ bar}$	500
$f, \text{ kHz}$	150
$T_{\text{min}}, ^\circ\text{C}$	-196
$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	200
$C, \text{ pF}$	5

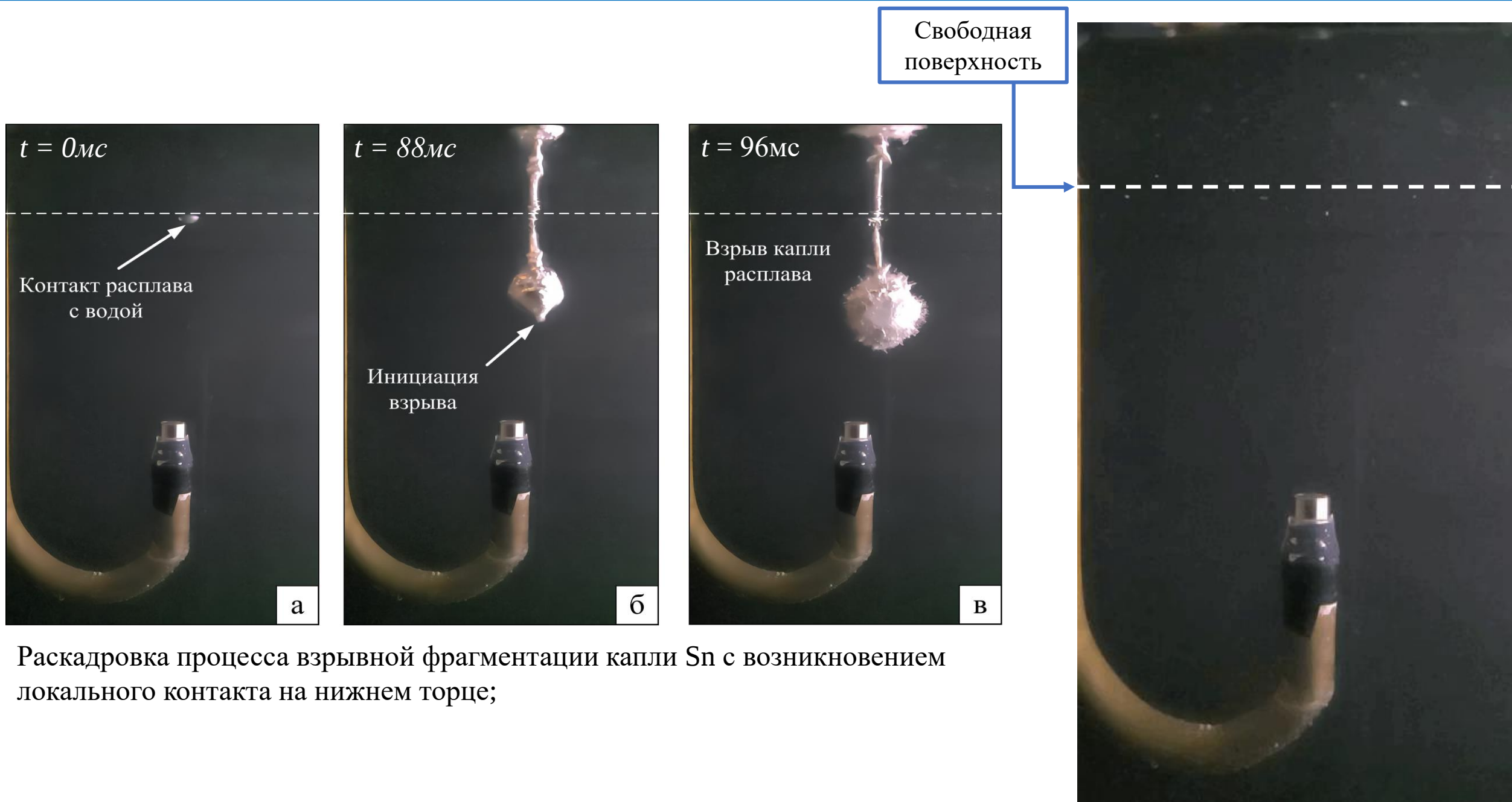


Свободная
поверхность

Датчик
давления



1 – вода;
2 – пьезодатчик давления Kistler 701A;





Свободная поверхность

Раскадровка процесса фрагментации



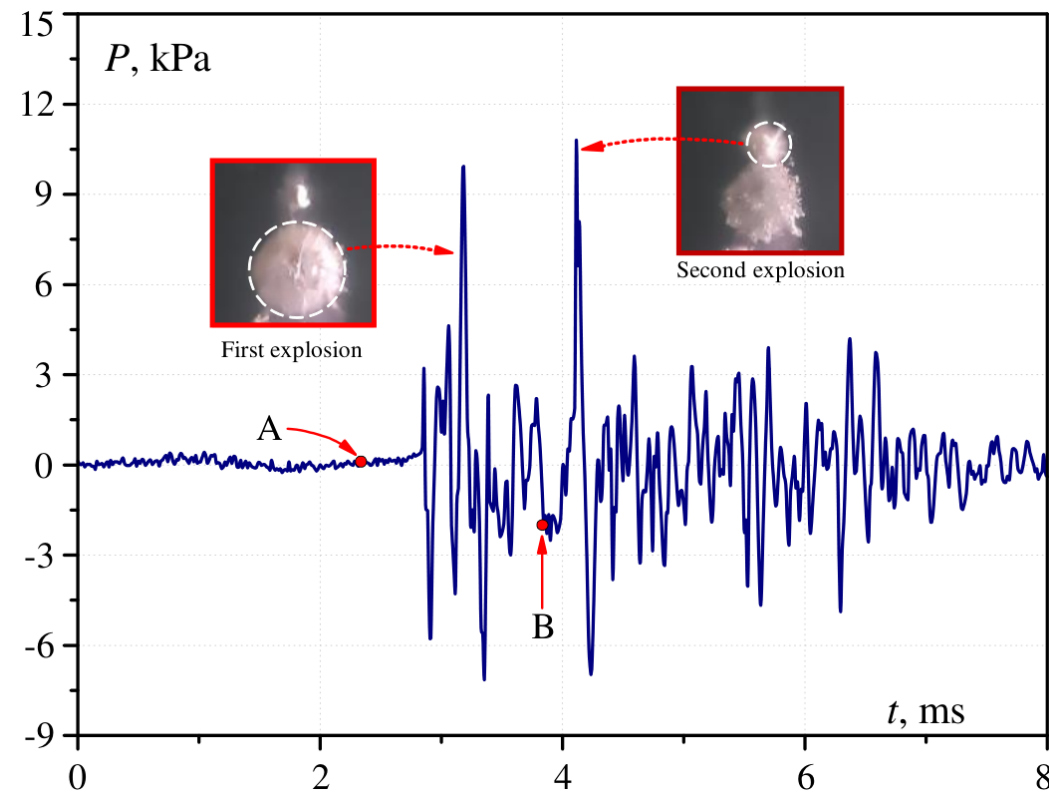


График $P(t)$ при двух последовательных взрывах;

Давления на датчике

L_1 , мм	L_2 , мм	R_1 , мм	R_2 , мм	δ , мм	$P_0(L_1)$, кПа	$P_0(L_2)$, кПа
27	48	10,5	4,5	4,3	3,86	4,21

Параметры задачи

Согласно [6,7] подобную задачу можно рассматривать в акустическом приближении.

Нестационарное волновое уравнение:

$$\frac{1}{\rho_w c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_w} \nabla P \right) = 0$$

Уравнение состояние для воды:

$$P(\rho) = P_{amb} + B \left(\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^n - 1 \right)$$

Начальные условия:

$$\frac{\partial P(t=0)}{\partial t} = 0$$

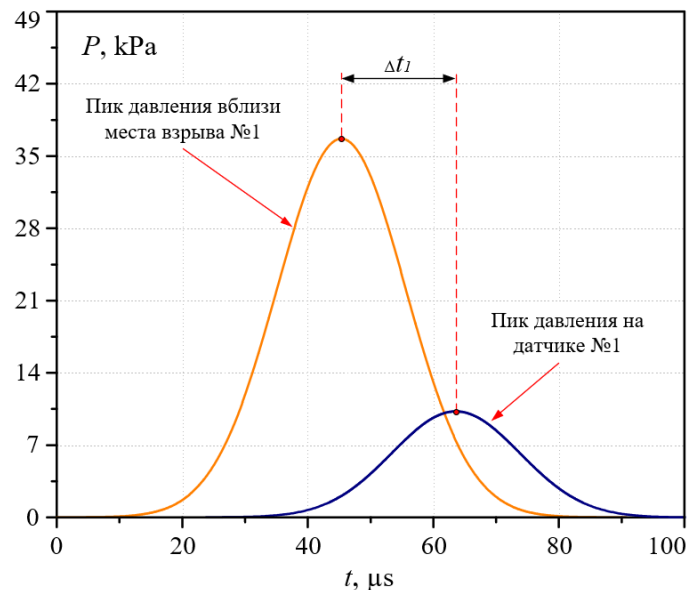
$$P(t=0) = 0$$

Условие жесткой стенки:

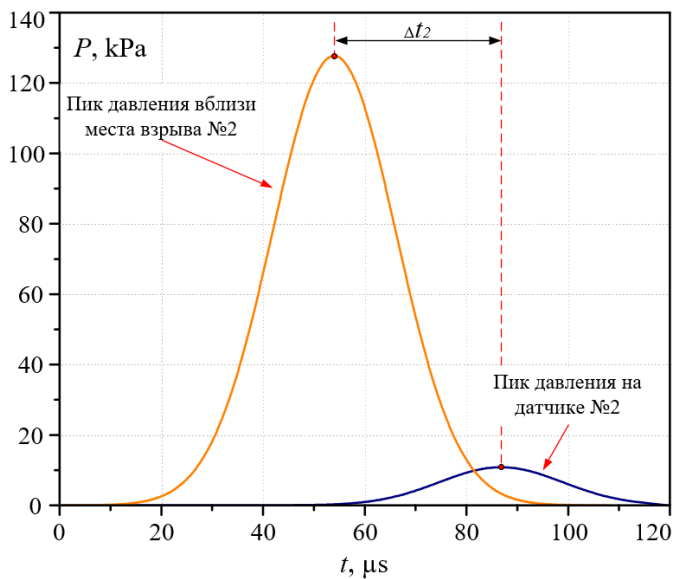
$$-\hat{n} \left(-\frac{1}{\rho} \nabla P \right) = \frac{\hat{n}}{\rho} \left(\frac{\partial P}{\partial r} \hat{r} + \frac{\partial P}{\partial z} \hat{z} \right) = 0$$

Имитация источника давления:

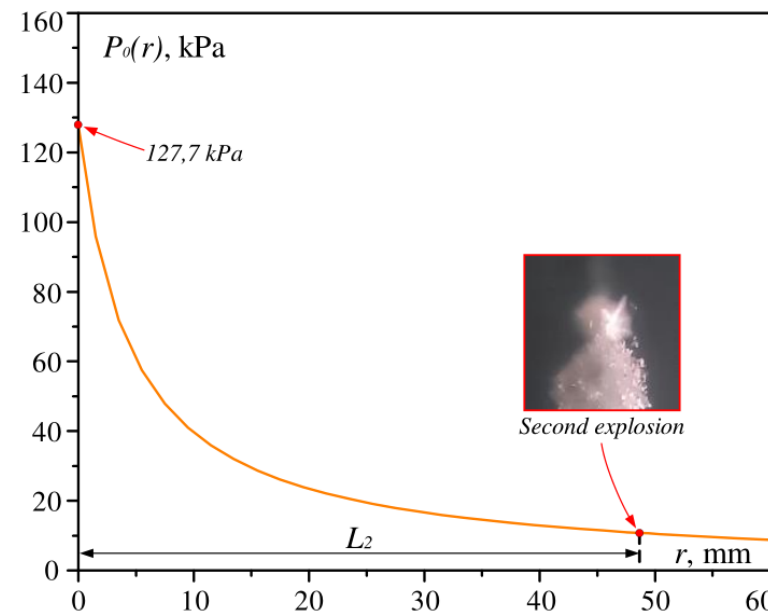
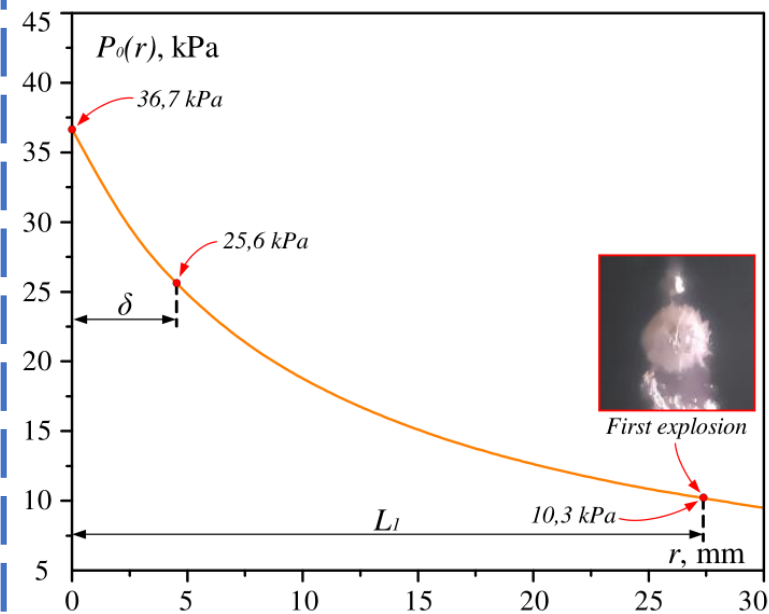
$$P(t) = \begin{cases} P_0 \left(e^{\frac{-\pi^2(t-t_0)^2}{t_0^2}} - e^{-\pi^2} \right), & t \in [0, t_0] \\ 0, & t \geq t_0 \end{cases}$$



При взрыве первой капли



При взрыве второй капли

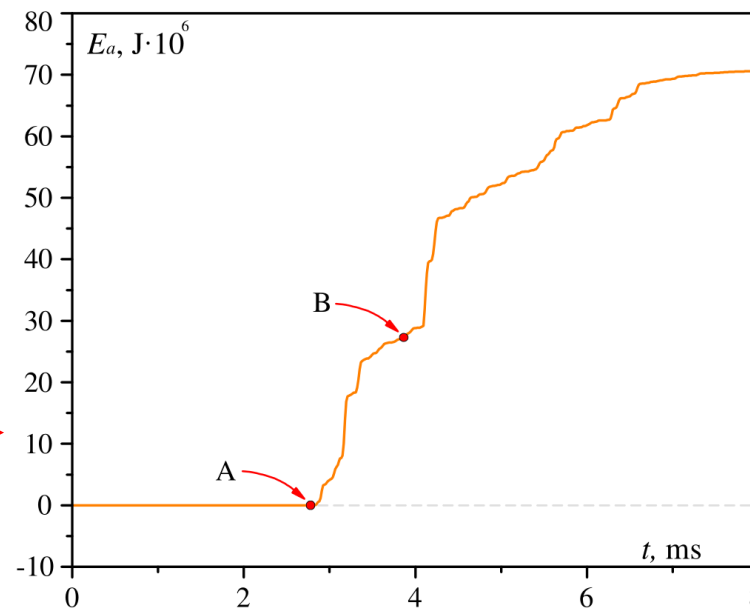


Падение амплитудного значения давления P_0 от расстояния;

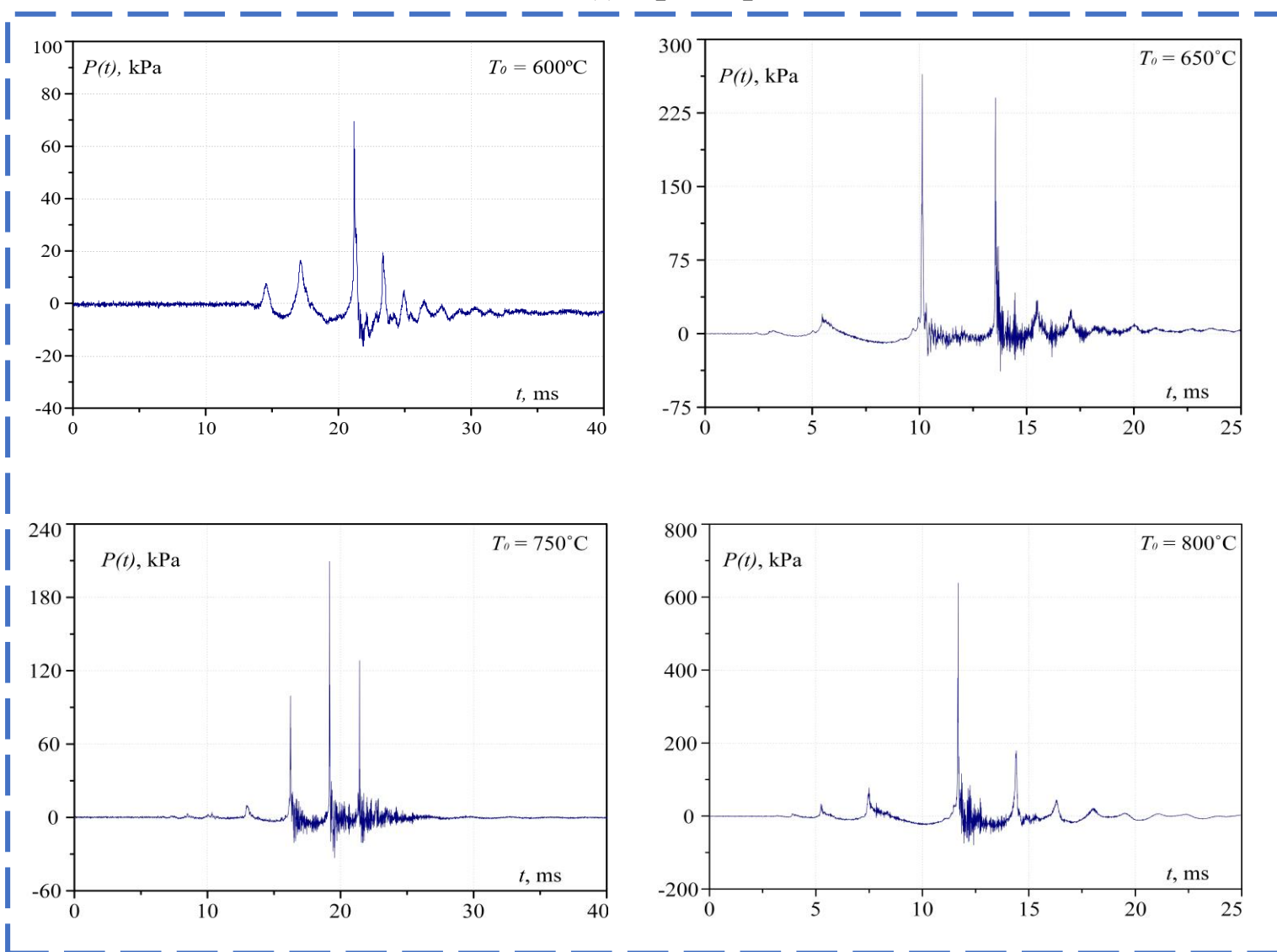
Расчет акустической энергии:

$$E_a = \frac{1}{2\rho_w c_0^2} \int_V (P(t))^2 dV$$

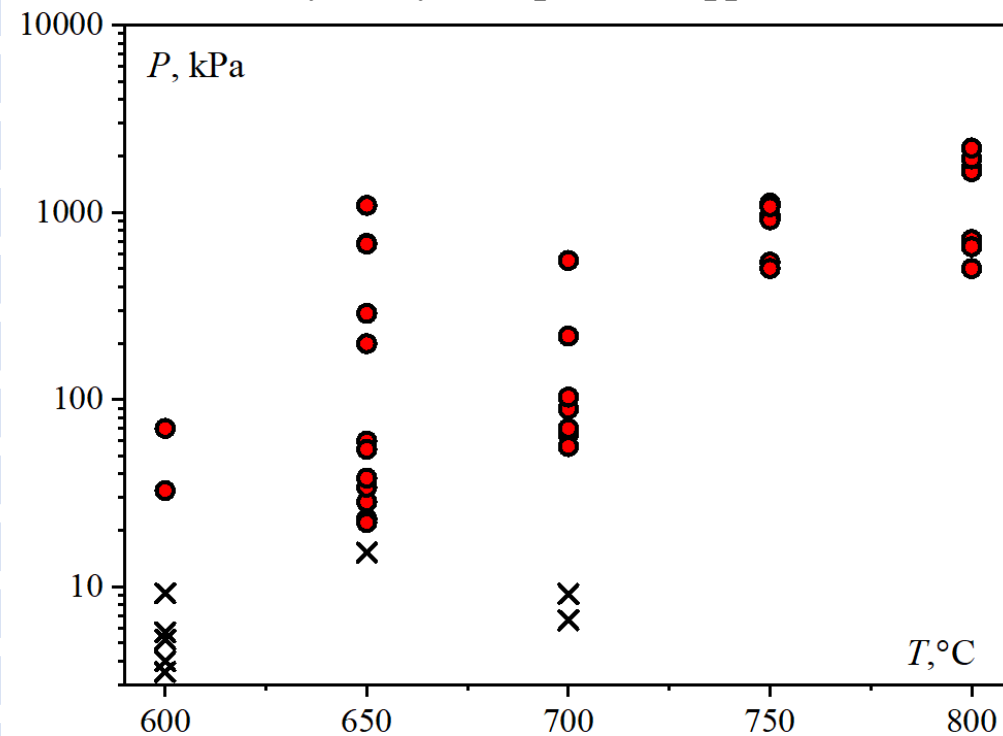
$$E_a = \frac{2\pi L^2}{\rho_w c_0} \int_0^\tau (P(t))^2 dt$$



Типичные зависимости $P(t)$ при взрыве капли жидкого Sn



- – Наблюдается взрывная фрагментация
- ✕ – Отсутствует взрывная фрагментация



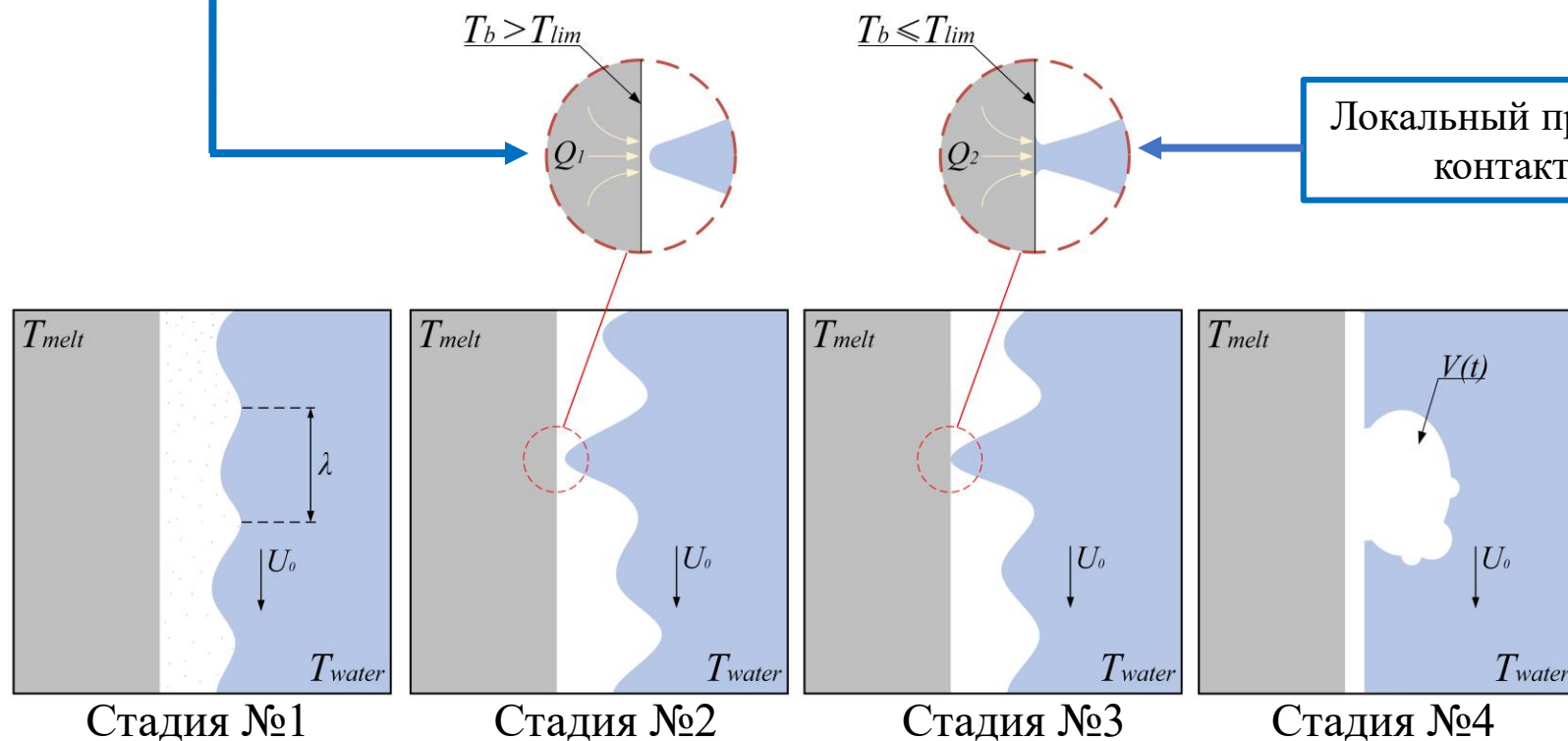
Амплитудные значения давления P_0 от начальной температуры капли T_0

В случае неустойчивости **К – Г**:

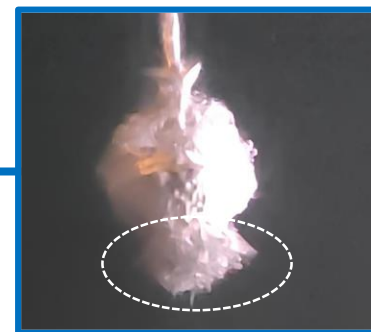
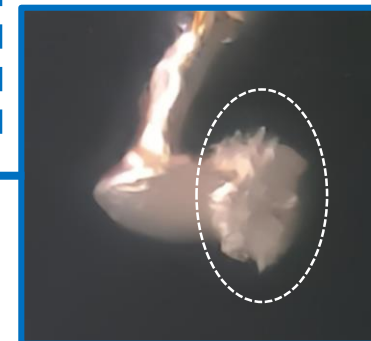
$$\lambda \geq \lambda_{crit} = \frac{2\pi\sigma(\rho_m + \rho_w)}{U_0^2 \rho_m \rho_w}$$

Захолаживания в гребнях
подходящей волны

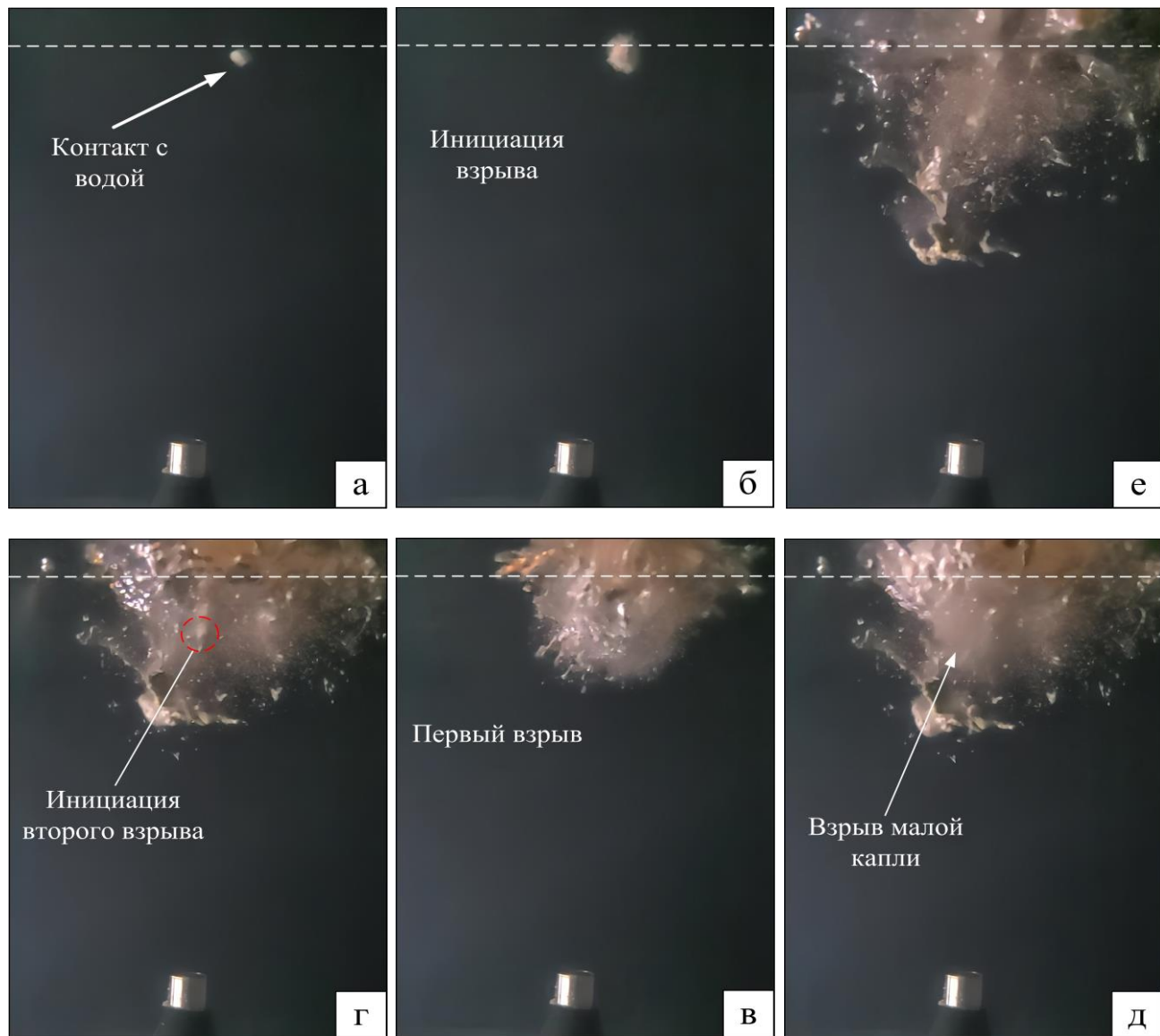
- 1) Возникновение неустойчивости на поверхности;
- 2) Образование волн на поверхности;
- 3) Реализация серии периодических подходов и отходов холодной воды в гребнях волн;
- 4) Интенсивное охлаждение поверхности капли до $T_b \leq T_{lim}$;
- 5) Возникновение прямого контакта и рост поверхностного возмущения;



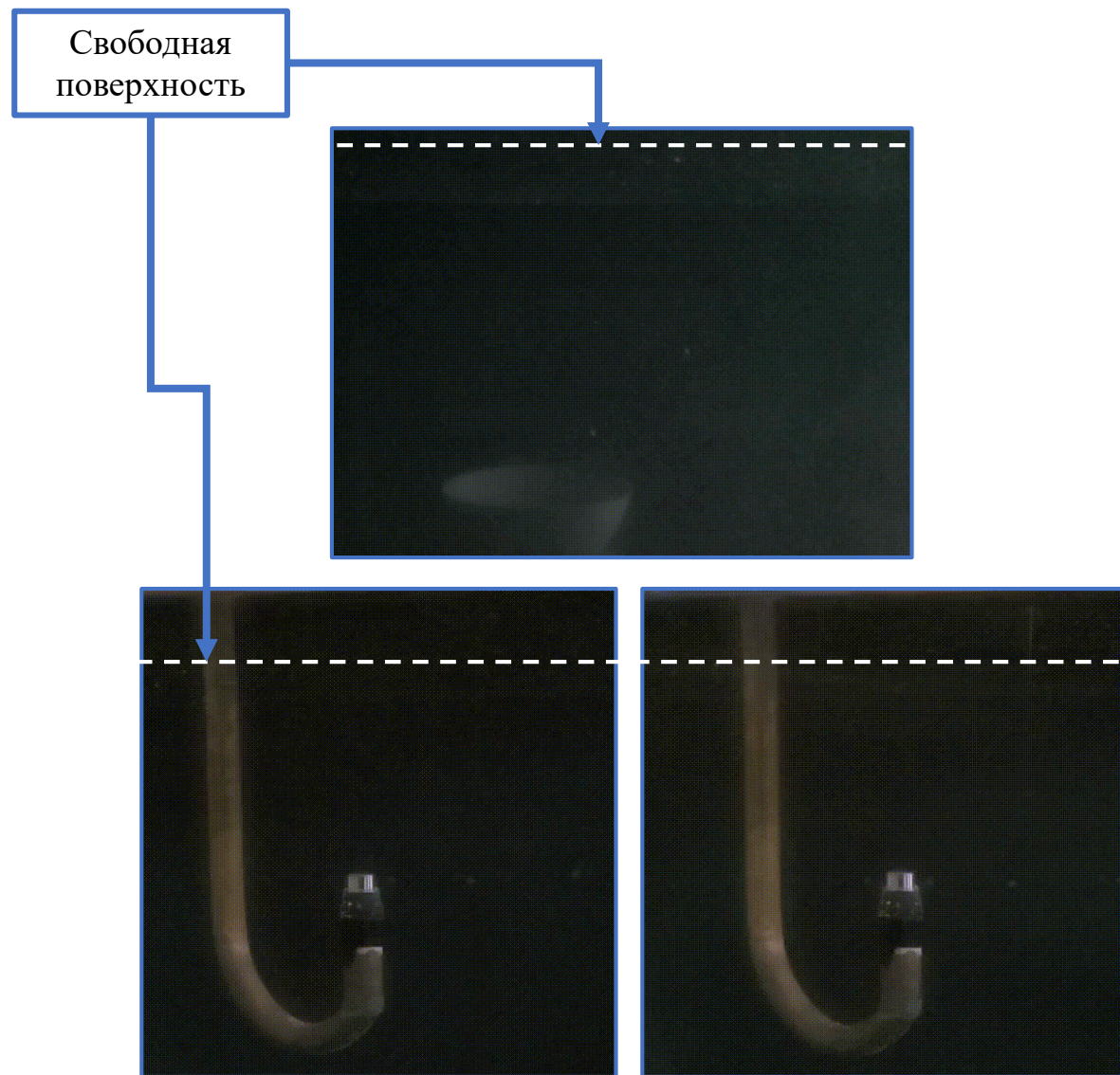
Локальный прямой
контакт



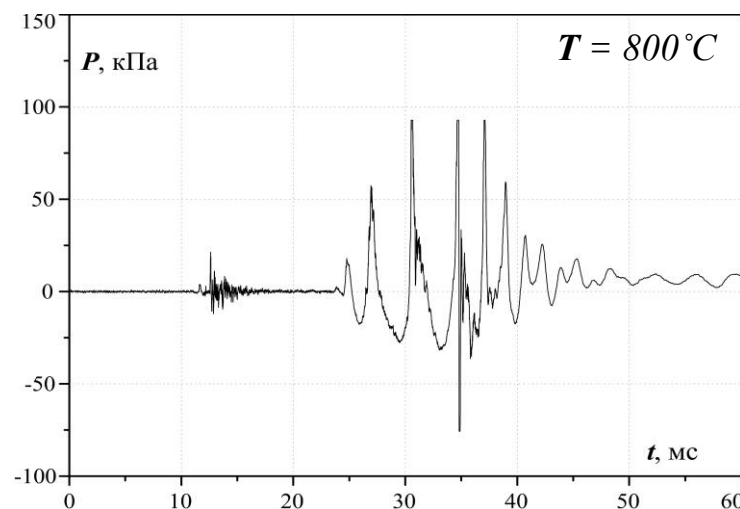
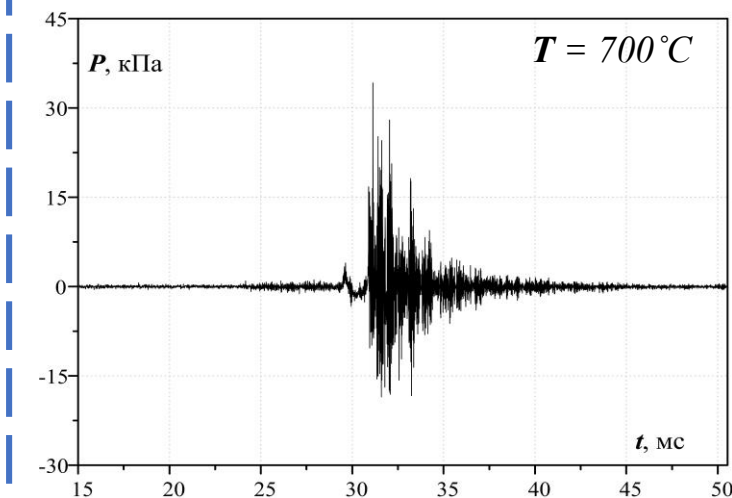
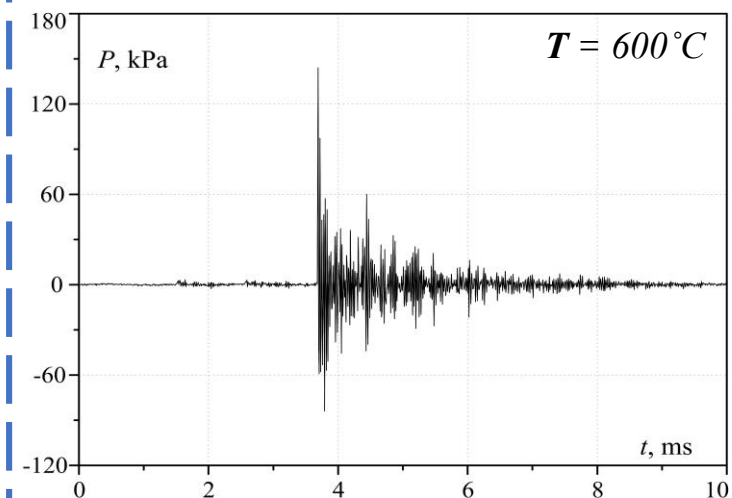
Раскадровка процесса типичной взрывной фрагментации расплавленного Вi;



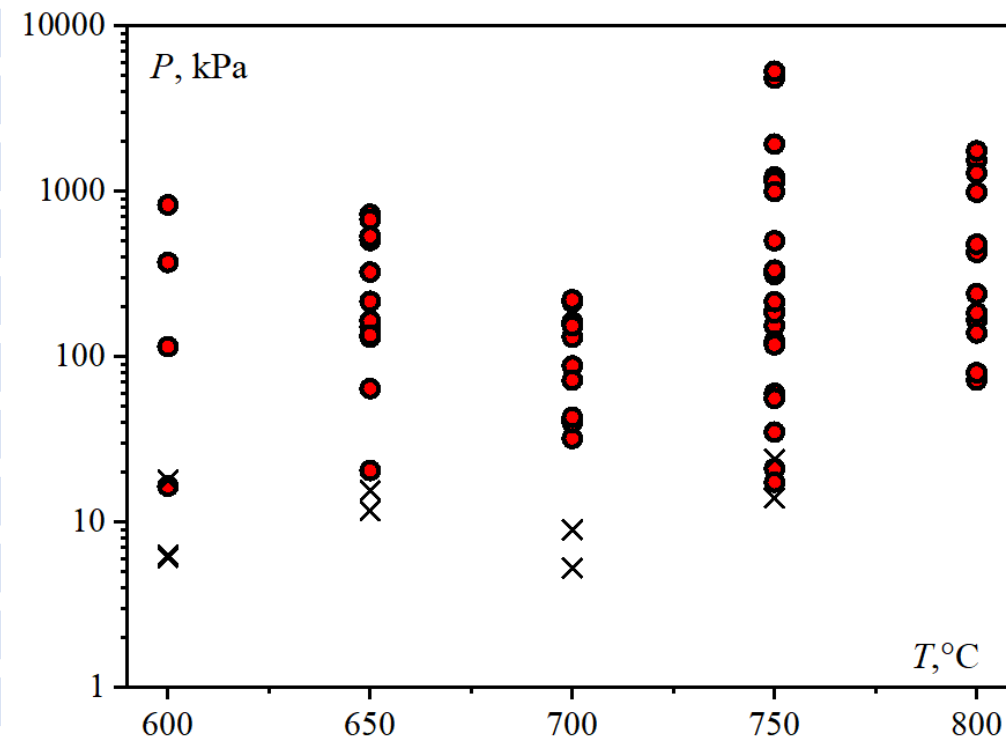
Поверхностная фрагментация расплавленного Вi;



Типичный зависимости $P(t)$ при взрыве капли жидкого Вi



- – Наблюдается взрывная фрагментация
- ✕ – Отсутствует взрывная фрагментация



Амплитудные значения давления P_0 от начальной температуры капли T_0

- Экспериментально было подтверждено, что прямой контакт между поверхностью капель и холодной водой приводит к последующему паровому взрыву;
- Установлены характерные графики зависимости $P(t)$ для обоих металлов и исследован эффект начальной температуры, согласно которому повышение T_0 для расплава Sn приводит к явному увеличению амплитуда давления, в то время как для Вi подобного явления не наблюдается;
- Для расплава Sn паровые взрывы наблюдаются в объеме охлаждающей жидкости, в то время как для Вi чаще всего взрыв происходит на поверхности воды, что вероятно сказывается на возникающих амплитудных значениях;
- Проведенные численные оценки по давлениям, возникающих вблизи места взрыва при последовательном взрыве двух капель показали, что амплитуды достигают $\sim 10^5$ Па; Данного порядка достаточно для дестабилизации паровой пленки на близлежащей капли и возникновения последующего взрыва;
- Наблюдаемые различия во взаимодействии двух металлов с водой на данном этапе указывают на невозможность использования легкоплавких металлов как ИМИТОТОРОВ РАСПЛАВА КОРИМА (из вестник ОИВТ);

- [1] **Li M.** et al. Fragmentation and solidification of fuel–coolant interaction of columnar molten iron and water // **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**. – 2023. – Т. 148. – №. 20. – С. 10897-10906.
- [2] **Manickam L.** et al. An experimental study on the intense heat transfer and phase change during melt and water interactions // **Experimental heat transfer**. – 2019. – Т. 32. – №. 3. – С. 251-266.
- [3] **Abe Y.** et al. Fragmentation behavior during molten material and coolant interactions // **Nuclear Engineering and Design**. – 2006. – Т. 236. – №. 14-16. – С. 1668-1681.
- [4] **Yakush S. E.** et al. Experimental Study on the Interaction of an Impulse Water Jet with Molten Metal // **Fluids**. – 2023. – Т. 8. – №. 6. – С. 166.
- [5] **Вавилов С. Н., Васильев Н. В., Зейгарник Ю. А.** Паровой взрыв: экспериментальные наблюдения // **Теплоэнергетика**. – 2022. – №. 1. – С. 78.
- [6] **Cole R. H., Weller R.** Underwater explosions // **Physics Today**. – 1948. – Т. 1. – №. 6. – С. 35-35.
- [7] **В.К. Кедринский** // Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели /. - Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. - 434 с

Спасибо за внимание!!!