

# Влияние массы расплава и параметров источников импульсного давления на волновые поля в металлическом расплаве

В. М. Косенков\*, А. В. Иванов

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
г. Николаев, 54018, Украина, \*e-mail: [v.m.kosenkov@gmail.com](mailto:v.m.kosenkov@gmail.com)*

Поступила в редакцию 29.12.2025

После доработки 02.04.2026

Принята к публикации 07.04.2026

На основе математического моделирования выполнено исследование влияния параметров магнитно-импульсного, электроразрядного и комбинированного источников импульсного давления на волновые поля в расплаве алюминия различной массы. Отмечено повышение интенсивности волновых полей в расплаве, создаваемых электроразрядным источником при увеличении массы расплава. Определено малое влияние массы расплава на возникающие в нем волновые поля под действием магнитно-импульсного источника давления. Выявлено существенное влияние амплитуды импульсных источников давления и массы расплава на изменение плотности его внутренней энергии.

*Ключевые слова:* электрический разряд, расплав, акустические волновые процессы, магнитно-импульсное нагружение, параметры импульсного давления

УДК 537.528:621.3.017:534.21

<https://doi.org/10.52577/eom.2026.62.2.19>

## ВВЕДЕНИЕ

В литейном производстве используют различные способы обработки расплава в температурных интервалах от жидкого состояния до начала полного затвердевания. Существуют две группы способов – реагентные и энергетические. В первом случае в расплав вводят разные виды реагентов, а в энергетических методах воздействуют на расплав полями различной физической природы. Энергетическое воздействие сопровождается различными видами преобразований первичной энергии, запасенной в конденсаторной батарее, в электромеханических, электромагнитных, термоэлектрических, термоакустических и т.п. процессах. В их числе электромагнитно-акустические преобразования энергии (ЭМАП), которые происходят в условиях скинирования электромагнитной энергии, когда глубина скин-слоя ( $\delta$ ) меньше размеров объекта обработки [1–3]. Задачи ЭМАП сводятся к изучению условий и факторов возбуждения акустических волн давлением магнитного поля, которое генерируется в скин-слое при протекании импульсов электрического, разрядного тока, распространении акустических возмущений и их взаимодействии с преградами (стенками технологического реактора) и фазами объекта обработки (неоднородностями) для прогноза эффекта акустического воздействия.

Изучение этой проблемы в работах [4–10] ограничивалось решением частных задач для

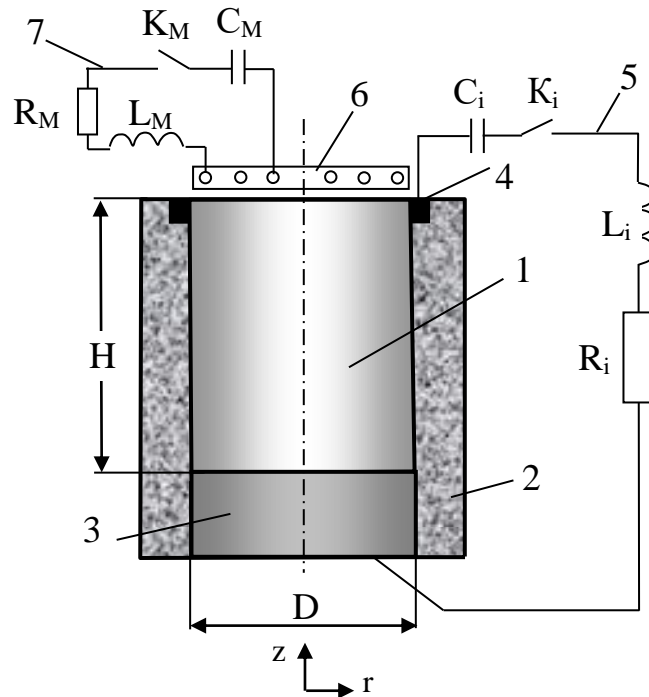
исследования некоторых явлений на отдельных этапах ЭМАП. Расплав нагружали или индуктором [4–7], или пропускали ток непосредственно через расплав [8, 9]. Анализ функциональных возможностей ЭМАП без привязки к способу формирования магнитного давления в скин-слое [10–16] показывает только качественную формализованную картину физических механизмов ЭМАП. В работе [2] исследованы волновые поля в расплаве, создаваемые магнитно-импульсным (МИ) и электроразрядным (ЭР) источниками и их комбинацией, но только при неизменных параметрах давления на расплав. В работе [3] исследовано влияние параметров давления на расплав, но только для алюминиевого сплава массой 100 кг.

Поэтому исследование волновых полей в расплаве, формируемых при ЭМАП, для определения возможности их использования при обработке расплавов по-прежнему актуально как в научном, так и в практическом отношении.

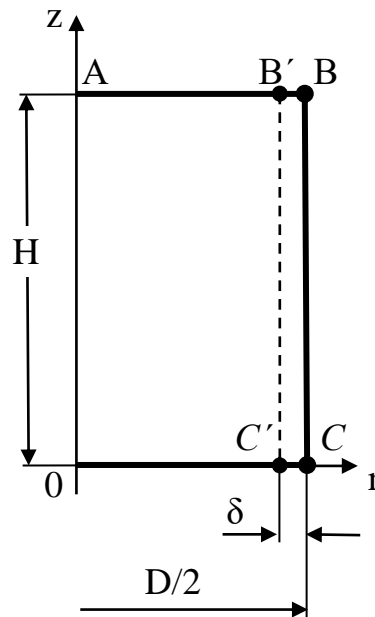
Цель данной работы – изучить влияние параметров давления, создаваемого магнитно-импульсным и электроразрядным источниками, а также их совместным действием, на волновые поля в металлическом расплаве разной массы.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Волновые процессы в расплаве металла исследовали, используя схему, приведенную на



**Рис. 1.** Схема моделируемой системы: 1 – полость керамической формы, заполненная расплавом металла; 2 – керамический корпус формы; 3 – металлическое дно; 4 – кольцевой электрод; 5 – контур для разряда между электродами 3 и 4; 6 – индуктор; 7 – контур для разряда на индуктор;  $C_i$  – емкость конденсаторной батареи в контуре 5;  $L_i$  – индуктивность разрядного контура 5;  $R_i$  – сопротивление элементов разрядного контура 5;  $K_i$  – коммутатор в контуре 5;  $C_M$  – емкость конденсаторной батареи в контуре 7;  $L_M$  – индуктивность разрядного контура 7;  $R_M$  – сопротивление элементов разрядного контура 7;  $K_M$  – коммутатор в контуре 7.



**Рис. 2.** Схема расчетной области.

**рис. 1.** Полость 1 в керамическом корпусе цилиндрической формы 2 с металлическим дном 3 заполнена расплавом алюминиевого сплава. В верхней части корпуса 2 установлен кольцевой электрод 4. К электроду 4 и дну 3 подключены кабели разрядного контура 5, который характеризуется индуктивностью  $L_i$  и активным сопротивлением  $R_i$ , содержит конденсаторную батарею  $C_i$  и коммутатор  $K_i$ . Над свободной поверхностью расплава установлен плоский индуктор 6, подключенный к разрядному

контур 7, содержащему конденсаторную батарею  $C_M$  и коммутатор  $K_M$  и имеющему индуктивность  $L_M$  и активное сопротивление  $R_M$ . Размеры цилиндрической полости 1 определяются диаметром  $D$  и высотой  $H$ .

Воздействие на расплав в полости 1 можно осуществлять тремя способами: электрическим разрядом (ЭР) конденсаторной батареи  $C_i$  в контуре 5, разрядом конденсаторной батареи  $C_M$  в контуре 7 на индуктор 6 (МИ) или одно-

ременным разрядом конденсаторных батарей  $C_i$  и  $C_M$  в контурах 5 и 7 (МИ+ЭР) соответственно.

В первом случае разряд конденсаторной батареи  $C_i$  в контуре 5 происходит через расплав между электродами 3 и 4. Частота колебаний тока в контуре 5 составляет десятки килогерц, поэтому в расплаве вблизи цилиндрической поверхности образуется скин-слой, по которому протекает электрический ток. В результате возникающего импульсного магнитного поля давление в скин-слое повышается, что приводит к генерированию волн давления в расплаве.

Во втором случае разряд конденсаторной батареи  $C_M$  происходит в контуре 7 через индуктор 6. Возле свободной поверхности расплава генерируются токи Фуко и возникает электродинамическое давление на поверхность расплава, создающее в нем волны давления.

В результате одновременного разряда конденсаторных батарей  $C_i$  и  $C_M$  в контурах 5 и 7 волны давления в расплаве распространяются от цилиндрической и свободной поверхностей полости 1.

Учитывая осевую симметрию полости 1, заполненной расплавом, а также осевую симметрию нагружения расплава, процессы в нем можно исследовать, используя схему, представленную на рис. 2. Магнитно-импульсное давление ( $P_M$ ) на расплав происходит на границе AB, а от электрического разряда через расплав давление ( $P_i$ ) действует на границе BC.

Исследование волновых процессов в расплаве выполняли методом математического моделирования, используя математическую модель, описанную в работах [2, 3]. Учитывая малые амплитуды давления на расплав [1–3] и импульсное (кратковременное) его нагружение, позволяющее не учитывать вязкость расплава [17–20], его считали идеальной сжимаемой жидкостью с постоянной скоростью звука. В этом случае движение жидкости можно считать потенциальным и безвихревым.

Амплитуда давления импульсных источников на расплав не превышает 10 МПа, поэтому в расплаве генерируются волны акустической интенсивности [2, 3, 21]. Исследование волновых процессов в расплаве выполняли методом математического моделирования, описанного в работах [2, 3].

В работах [2, 3] отмечено, что волновые процессы в расплаве алюминия могут приводить к уменьшению в нем давления до уровня давления насыщенного пара ( $P_k$ ), при котором компоненты расплава начинают переходить в газообразное состояние [21], то есть происходит изменение фазового состояния расплава. В тех частях объема расплава, в которых давление

равно  $P_k$ , его однородность нарушается в результате появления пузырьков, заполненных парами компонентов расплава и растворенных в нем газов. Кратковременное появление газовой фазы в расплаве может влиять на его структуру и свойства, а также последующую кристаллизацию [1, 5, 6, 10, 11].

На основании проведенных ранее исследований [1] давления  $P_M$  и  $P_i$  можно аппроксимировать функциями:

$$P_M = P_{Mm} \times \exp(-t/\tau_M) \times \left| \sin\left(2 \times \pi \times t/T_M\right) \right|, \quad (1)$$

$$P_i = P_{im} \times \exp(-t/\tau_i) \times \left| \sin\left(2 \times \pi \times t/T_i\right) \right|, \quad (2)$$

где  $P_{Mm}$ ,  $P_{im}$  – амплитуды давления от магнитно-импульсного и электроразрядного нагружения расплава;  $T_M$ ,  $T_i$  – периоды изменения давления от магнитно-импульсного и электроразрядного нагружения расплава;  $\tau_M$ ,  $\tau_i$  – время экспоненциального затухания амплитуды давления от магнитно-импульсного и электроразрядного нагружения расплава;  $t$  – время, с.

Кроме поля давления в расплаве, представляет интерес изменение поля плотности внутренней акустической энергии ( $\Delta U(t, r, z)$ ), действующей на расплав в результате возникающих в нем волновых процессов [1], которое можно определить по формуле [21]:

$$\Delta U(t, r, z) = \frac{(p - p_0)^2}{2 \times \rho_0 \times c_f^2}, \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность невозмущенной жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $c_f$  – скорость звука в расплаве, м/с.

В среднем по объему расплава изменение плотности внутренней энергии определяли по формуле:

$$\Delta U_v(t) = \frac{1}{V} \int_V \Delta U(t, r, z) \times dV, \quad (4)$$

где  $V$  – объем расплава, м<sup>3</sup>.

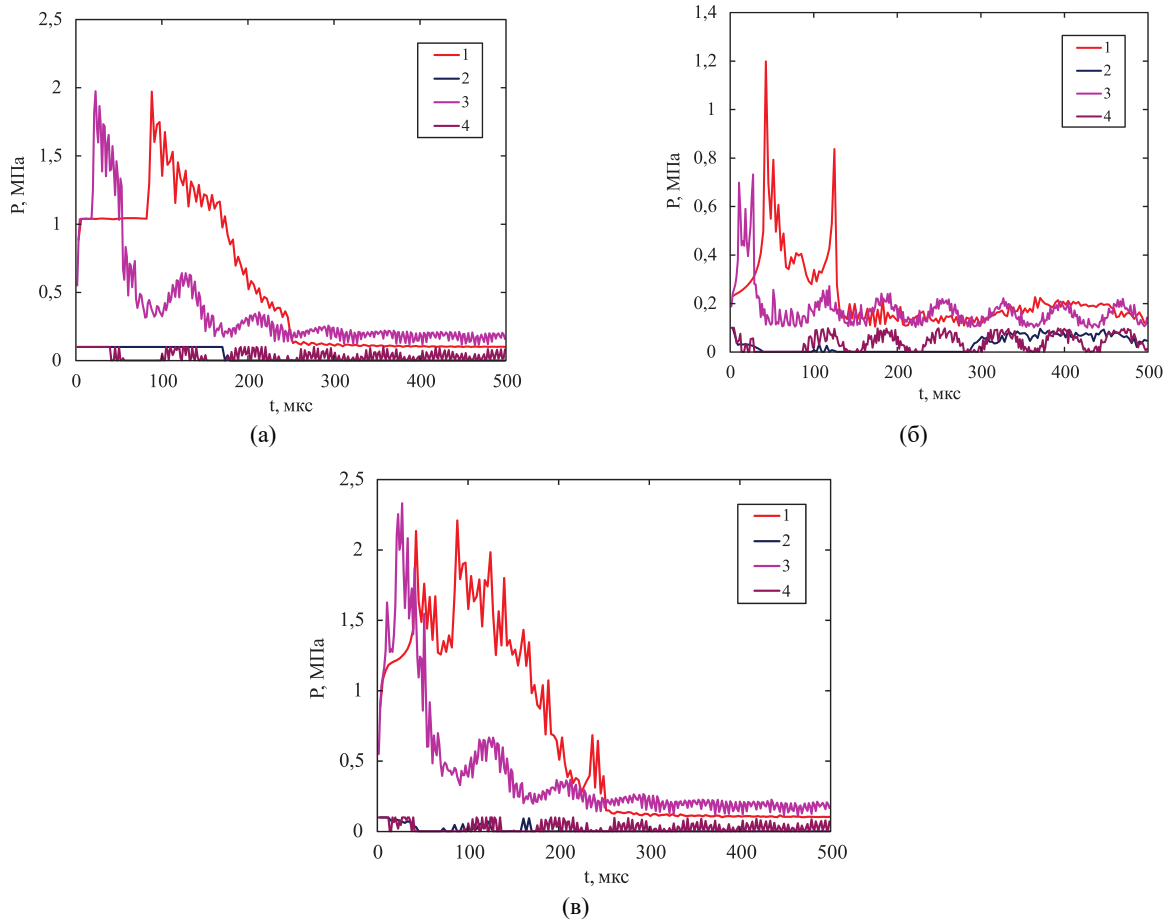
Изменение состояния вещества в акустических волнах происходит в адиабатическом процессе, поэтому вся внутренняя энергия расплава преобразуется в его тепловую энергию, плотность которой можно определить по формуле:

$$\Delta Q(t, r, z) = \rho_0 \times C \times \Delta T(t, r, z), \quad (5)$$

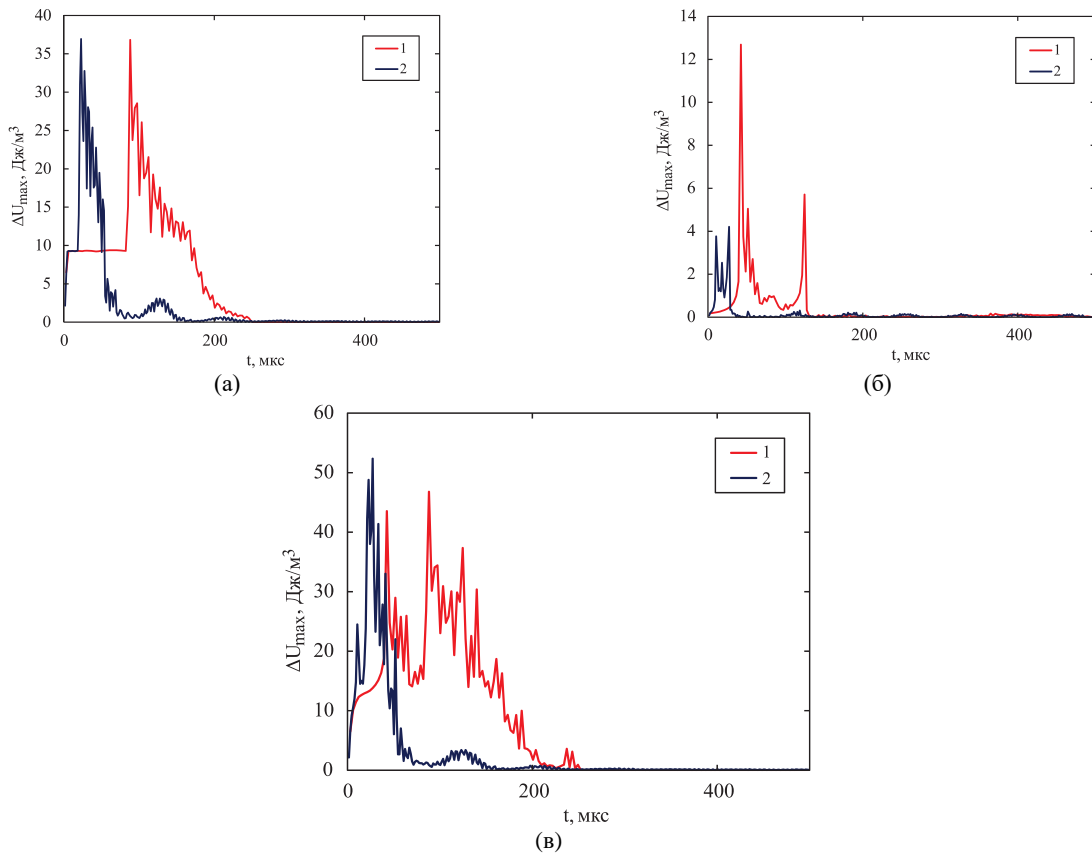
где  $C$  – удельная теплоемкость расплава, Дж/кг/К;  $\Delta T(t, r, z)$  – изменение температуры, К.

Учитывая равенство  $\Delta Q(t, r, z) = \Delta U(t, r, z)$ , изменение температуры расплава определяли по формуле:

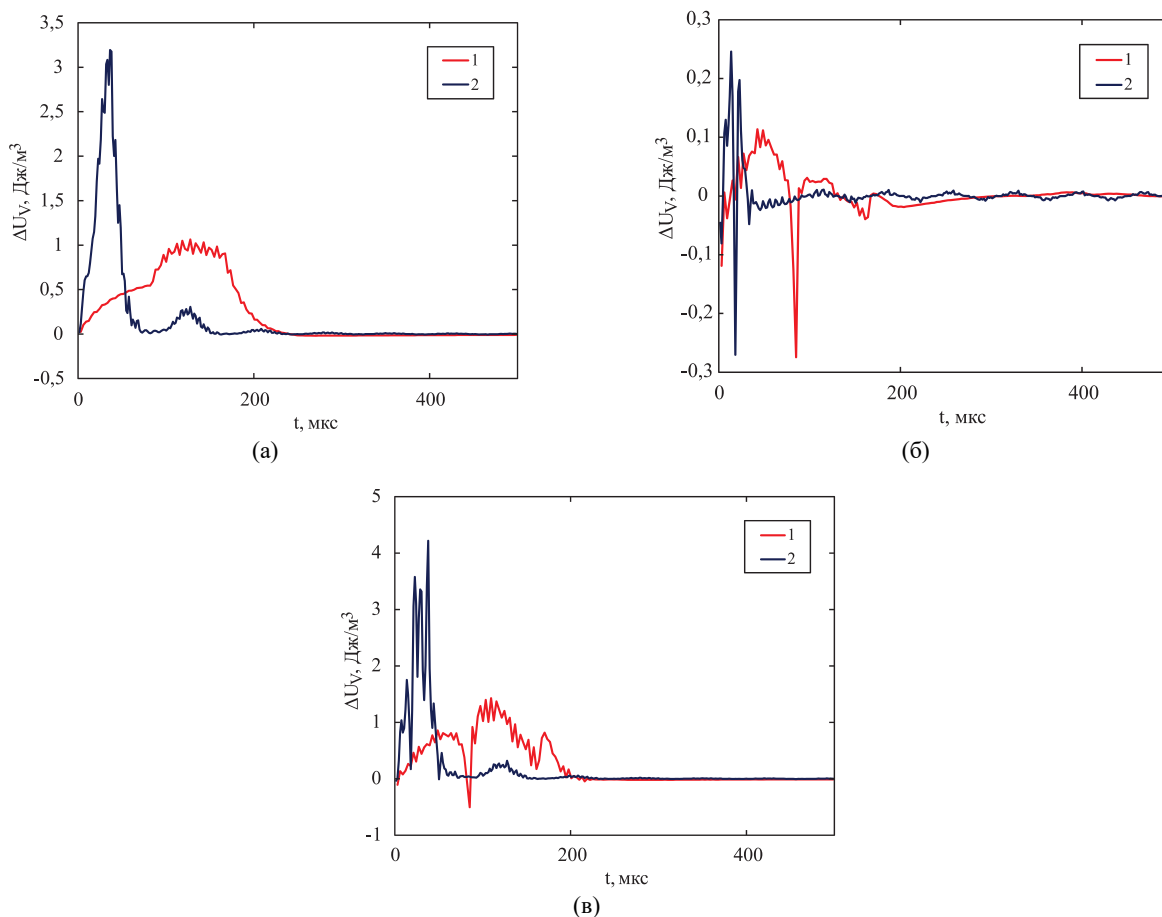
$$\Delta T(t, r, z) = \Delta U(t, r, z) / (\rho_0 \times C). \quad (6)$$



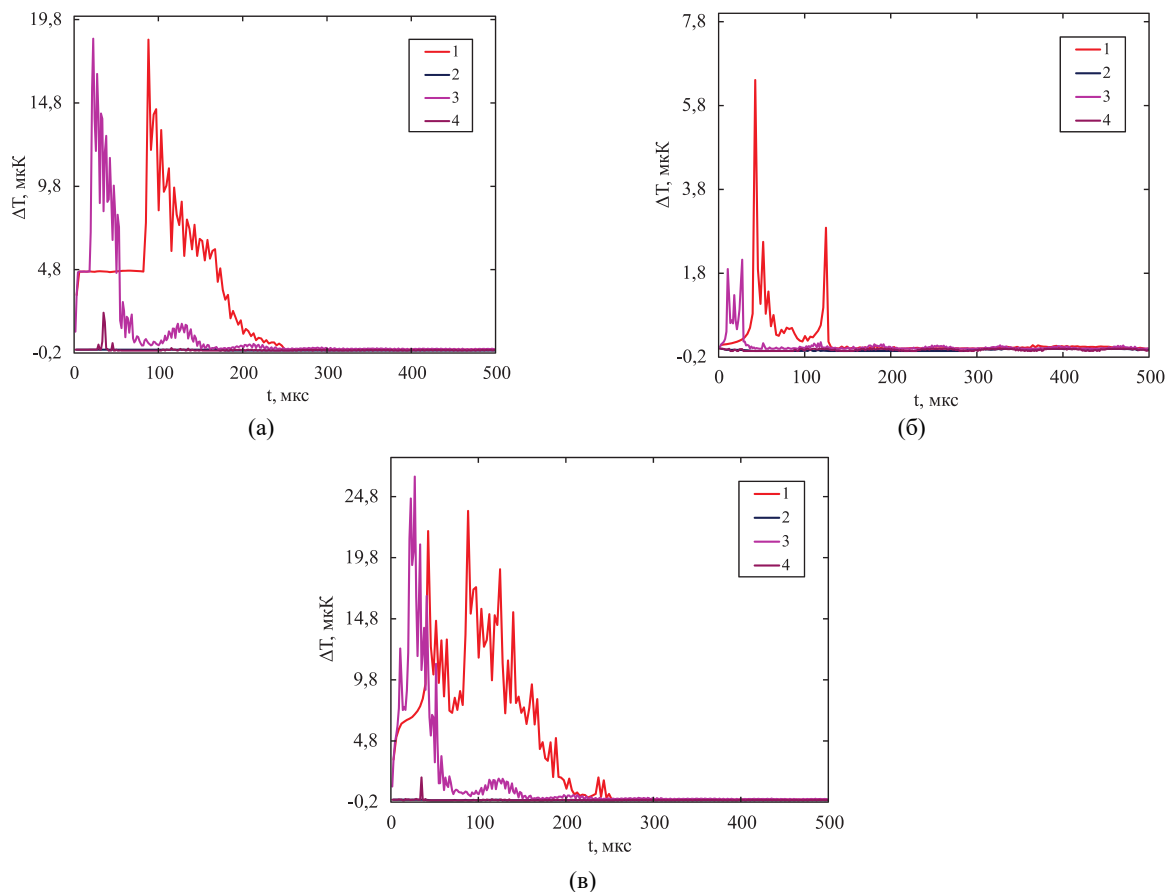
**Рис. 3.** Максимумы (1, 3) и минимумы (2, 4) давления в расплаве массой 100 кг (1, 2) и 1 кг (3, 4): (а) – МИ; (б) – ЭР; (в) – МИ и ЭР. МИ ( $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс).



**Рис. 4.** Максимумы изменения плотности внутренней энергии в объеме расплава массой 100 кг (1) и 1 кг (2) под действием одного импульса давления: (а) – МИ; (б) – ЭР; (в) – МИ и ЭР. МИ ( $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс).



**Рис. 5.** Изменение средней плотности внутренней энергии в объеме расплава массой 100 кг (1) и 1 кг (2): (а) – МИ; (б) – ЭР; (в) – МИ и ЭР. МИ ( $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс).



**Рис. 6.** Максимумы (1, 3) и минимумы (2, 4) изменения температуры расплава массой 100 кг (1, 2) и 1 кг (3, 4): (а) – МИ; (б) – ЭР; (в) – МИ и ЭР. МИ ( $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс).

Поле мощности изменения плотности внутренней энергии ( $W$ ) вычисляли по формуле:

$$W(t, r, z) = \frac{d\Delta U(t, r, z)}{dt}. \quad (7)$$

Основная задача данной работы состояла в определении влияния массы расплава и параметров магнитно-импульсного и электрического разряда на возникающие в расплаве волновые процессы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

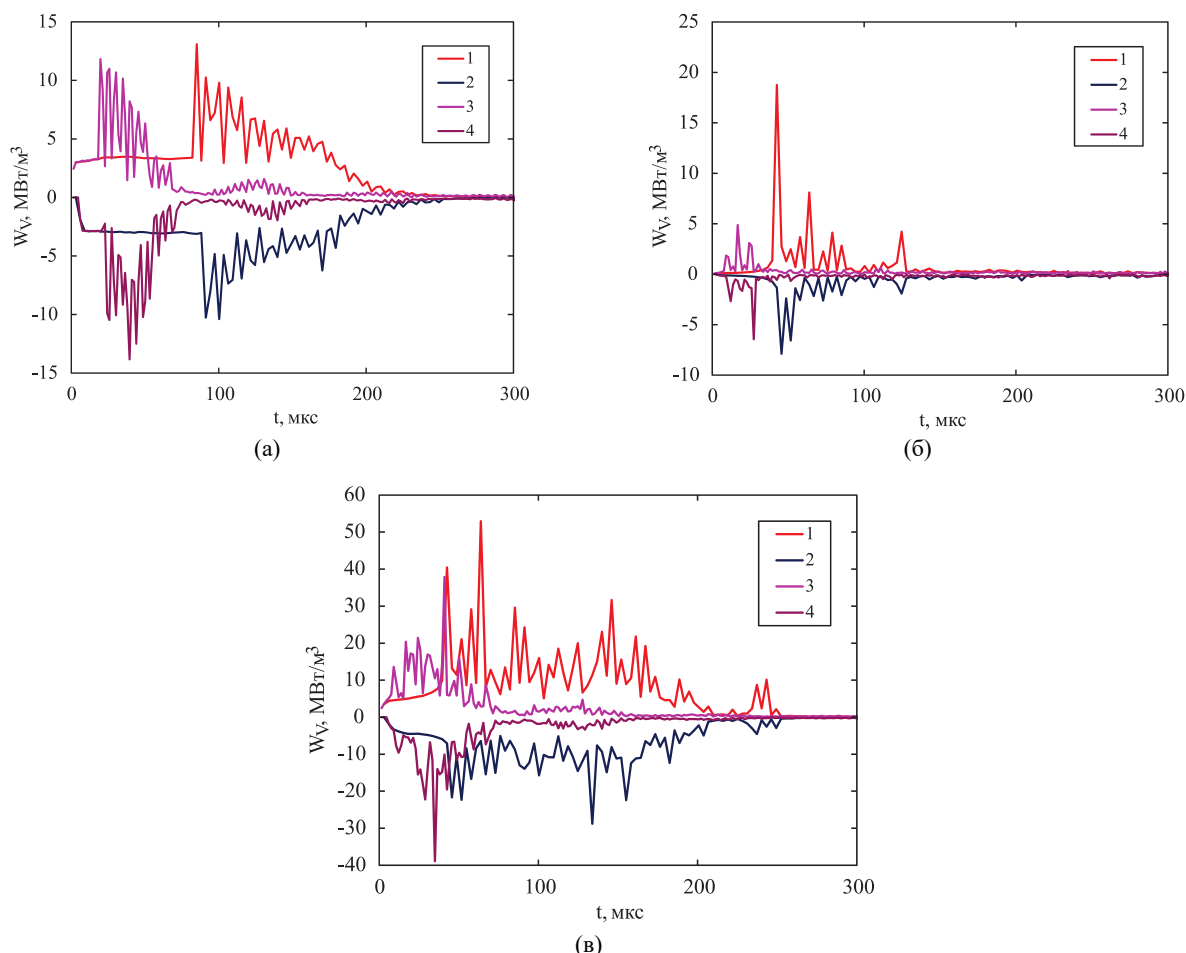
Исследование формирования волновых полей в полости  $I$  (рис. 1) выполняли при условии, что  $H=D$ . Для оценки влияния объема полости  $I$  (рис. 1) на поле давления в расплаве использовали два варианта массы расплава 1 кг и 100 кг. Плотность расплава полагали равной  $\rho_f = 2200$  кг/м<sup>3</sup>, а скорость звука в нем –  $c_f = 4650$  м/с, тогда при массе расплава 1 кг размеры полости  $I$  (рис. 1) составляли  $H = D = 83$  мм, при массе расплава 100 кг –  $H = D = 387$  мм. Величины параметров давления  $P_m$  и  $P_i$ , входящих в формулы (1) и (2), варьировали в пределах:  $P_{Mm} \in [0, 1; 1]$  МПа;  $P_{im} \in [0, 01; 0, 1]$  МПа;  $T_M \in [10; 40]$  мкс;  $T_i \in [10; 40]$  мкс;  $\tau_M \in [5; 80]$  мкс;  $\tau_i \in [5; 80]$  мкс.

В процессе экспериментальных исследований [1] параметры импульсного нагружения расплава близки к следующим величинам:  $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс;  $P_{im} = 0, 1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс.

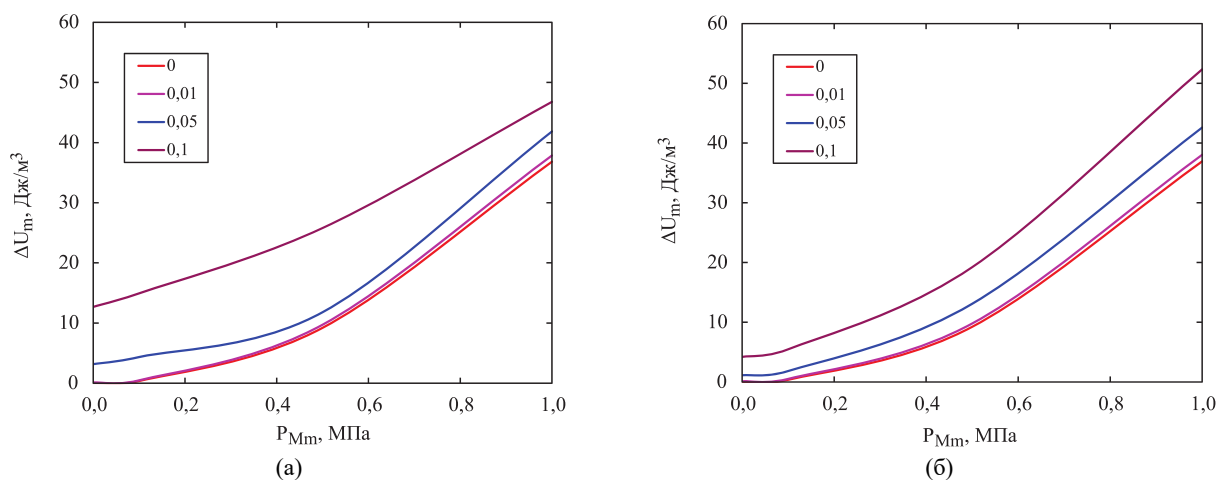
Волновые поля в расплаве, создаваемые каждым из источников (МИ или ЭР), обладают существенными особенностями. Волны давления, генерируемые МИ-воздействием, имеют плоский фронт и распространяются вдоль оси  $OZ$  цилиндрической полости  $I$  (рис. 1) от поверхности  $AB$  до  $OC$  (рис. 2) за 83 мкс в объеме расплава массой 100 кг (рис. 3а, линия 1) и в объеме расплава массой 1 кг (рис. 3а, линия 3) за 18 мкс. В результате дифракции волн на абсолютно жесткой поверхности  $OC$  их амплитуда увеличивается в 2 раза, и отраженная волна движется в обратном направлении к поверхности  $AB$ . При этом происходит интерференция генерируемых и отраженных волн, приводящая к существенному изменению поля давления в расплаве. Дифракция отраженных волн на поверхности  $AB$  после 166 мкс в объеме расплава массой 100 кг (рис. 3а, линия 1) и в объеме расплава массой 1 кг (рис. 3а, линия 3) после 36 мкс от начала МИ-воздействия приводит к формированию волн разрежения, распространяющихся от  $AB$  к  $OC$

(рис. 3а, линии 2 и 4) и интерферирующих с генерируемыми и отраженными волнами. Поверхность  $AB$ , оставаясь плоской, начинает перемещаться в направлении оси  $OZ$ . При этом объем расплава увеличивается, приводя к понижению давления в большей его части до уровня давления насыщенного пара ( $P_k$ ). Такие изменения давления в расплаве вызывают большие изменения плотности внутренней энергии в нем (рис. 4а), которые зависят от квадрата изменения давления (3). Поэтому после дифракции волны давления на поверхности  $OC$  (рис. 2) величина  $\Delta U$  возрастает в 4 раза, но затем быстро уменьшается в результате интерференции отраженных волн с генерируемыми. В условиях МИ-воздействия на расплав амплитуды  $\Delta U$  практически не зависят от объема расплава (рис. 4а), а отличаются только продолжительностью изменения  $\Delta U$ , которая в расплаве массой 1 кг меньше в 4 раза по сравнению с расплавом массой 100 кг. При этом изменение средней по объему плотности внутренней энергии ( $\Delta U_v$ ) в объеме расплава массой 1 кг в 11 раз меньше, а в расплаве массой 100 кг меньше в 37 раз, чем максимальные изменения  $\Delta U$  (рис. 4а и рис. 5а). Изменение температуры расплава пропорционально  $\Delta U$  и не превышает 20 мкК (рис. 6а). Большая частота изменения давления в расплаве обеспечивает большую мощность ( $W$ ) изменения  $\Delta U$ , максимальная величина которой мало зависит от объема расплава и превышает 10 МВт (рис. 7а). Отмеченные изменения термодинамического состояния расплава могут создавать благоприятные условия для получения качественной структуры отливки.

ЭР-воздействие на расплав формирует в нем волновое поле, радикально отличающееся от МИ-воздействия. В начале импульсного электрического разряда на поверхности скин-слоя  $B'C'$  (рис. 2) формируются волны давления, имеющие цилиндрический фронт и распространяющиеся к оси  $OA$  (рис. 2) полости  $I$  (рис. 1). В процессе движения волн в направлении оси  $OA$  (рис. 2) происходит их фокусирование, приводящее к увеличению амплитуды давления в них (рис. 3б). Через 41 мкс от начала электрического разряда в расплаве массой 100 кг и через 9 мкс в расплаве массой 1 кг волны достигают оси  $OA$ , на которой происходит их дифракция (фокусировка), приводящая к увеличению давления в сплаве массой 100 кг в 6 раз, а в сплаве массой 1 кг – в 3,5 раза (рис. 3б) по сравнению с амплитудой давления на поверхности скин-слоя  $B'C'$  (рис. 2). Волны, отраженные от оси  $OA$ , распространяются к поверхности  $B'C'$  (рис. 2). Их амплитуда уменьшается. Они интерферируют с



**Рис. 7.** Максимумы (1, 3) и минимумы (2, 4) мощности изменения плотности внутренней энергии расплава массой 100 кг (1, 2) и 1 кг (3, 4): (а) – МИ; (б) – ЭР; (в) – МИ и ЭР. МИ ( $P_{Mm} = 1$  МПа;  $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс).



**Рис. 8.** Наибольшие из максимумов (максимумы максимумов) изменения плотности внутренней энергии в объеме расплава массой 100 кг (а) и 1 кг (б) под действием одного импульса давления МИ ( $T_M = 20$  мкс;  $\tau_M = 80$  мкс), ЭР ( $T_i = 14$  мкс;  $\tau_i = 40$  мкс) и их совместного действия. Линии на рисунке обозначены величинами параметра  $P_{im}$  в МПа.

волнами, генерируемыми электрическим разрядом, увеличивая неоднородность распределения давления в полости 1 (рис. 1). При отражении волн от оси  $OA$  их скорость вблизи оси  $OA$  изменяет направление на противоположное. В результате этого на оси  $OA$  формируются волны разрежения с периодичностью  $T_i/2$  (рис. 3б), давление в которых вблизи оси  $OA$  достигает давления насыщенного пара  $P_k$ , и в

расплаве периодически возникает кавитация. Волны, отраженные от оси  $OA$ , достигая жесткой поверхности  $BC$  (рис. 2), испытывают на ней дифракцию. Давление в них удваивается, и они изменяют свое направление от поверхности  $BC$  к оси  $OA$  (рис. 3б). Такие волновые процессы происходят вблизи поверхности  $OC$  в течение 83 мкс в объеме расплава массой 100 кг (рис. 3б, линия 1) и в объеме расплава массой 1 кг

(рис. 3б, линия 3) после 18 мкс, пока к ней не приходят волны от поверхности  $AB$ , давление на которой равно атмосферному давлению  $P_0$ . Вблизи поверхности  $AB$  волны, генерируемые электрическим разрядом, уже в начале распространения от  $B'C'$  к  $OA$  (рис. 2) испытывают дифракцию на поверхности  $AB$ , которая приводит к формированию волн разрежения, перемещающихся от  $AB$  к  $OC$  за 83 мкс в расплаве массой 100 кг (рис. 3б, линия 2) и за 18 мкс в расплаве массой 1 кг (рис. 3б, линия 4). В процессе движения волн разрежения они интерферируют с волнами, генерируемыми электрическим разрядом в скин-слое расплава, еще более усложняя волновое поле и приводя к кавитации расплава практически во всем объеме полости  $I$  (рис. 1). В отличие от МИ-воздействия, максимальные величины изменения  $\Delta U$  зависят от объема расплава (рис. 4б), как и давление в нем (рис. 3б), в соответствии с формулой (3). При этом амплитуды давления в большом объеме расплава выше в 1,7 раза, чем в малом (рис. 3б), а  $\Delta U$  – в 2,9 раза (рис. 4б). Средняя плотность изменения внутренней энергии по объему расплава ( $\Delta U_V$ ) меньше, чем максимальная (рис. 4б), в малом объеме в 16 раз, а в большом – в 120 раз (рис. 5б). Максимальное изменение температуры расплава ( $\Delta T$ ) в малом объеме в 3 раза меньше, чем в большом (рис. 6б). В малом объеме расплава  $\Delta T$  меньше в 10 раз, а в большом – в 3 раза (рис. 6б) по сравнению с МИ-обработкой. Максимальная мощность изменения внутренней энергии расплава ( $W_V$ ) в малом объеме в 4 раза меньше, чем в большом (рис. 7б). При этом МИ-обработка расплава в большом объеме создает максимальную мощность в 1,5 раза меньшую (рис. 7а), чем при ЭР-обработке (рис. 7б).

Поле мощности изменения плотности внутренней энергии в расплаве имеет более неоднородную структуру, чем при МИ-воздействии на него [3], что может повышать эффективность обработки расплава, особенно в сочетании с его кавитацией.

В результате одновременного включения МИ- и ЭР-источников давления происходит суперпозиция их действия на расплав, пока не возникает в нем кавитация, которая как нелинейная составляющая рассматриваемой задачи суперпозицию их действия нарушает [3]. Комбинированное МИ- и ЭР-воздействие на расплав существенно увеличивает неоднородность поля давления и его амплитуду, которая на 15% больше, чем при МИ-обработке (рис. 3в). По сравнению с МИ-обработкой в 1,4 раза увеличивается максимальное изменение  $\Delta U$

(рис. 4в), в 1,3 раза повышается  $\Delta U_V$  (рис. 5в), а изменение  $\Delta T$  возрастает в 1,4 раза (рис. 6в). При этом в 4 раза увеличиваются максимальные величины  $W_V$  (рис. 7в). В то же время объем расплава в малой степени влияет на максимальные величины отмеченных характеристик, за исключением  $\Delta U_V$  (рис. 5в).

Параметры давления на расплав, входящих в формулы (1) и (2), существенно влияют на изменение плотности его внутренней энергии  $\Delta U$  (рис. 8). Максимальная величина  $\Delta U$  в малой степени зависит от объема расплава, если его нагружают МИ-источником. Зависимость  $\Delta U$  от  $P_{Mm}$  близка к полиному второй степени (рис. 8). Изменение  $\Delta U$  расплава при воздействии на него ЭР-источника в большой степени зависит от его массы. При одинаковых параметрах функции ЭР-давления на расплав (2) изменение  $\Delta U$  в расплаве массой 100 кг в 3 раза больше, чем при его массе 1 кг. Совместное действие МИ- и ЭР-источников существенно повышает  $\Delta U$  (рис. 8), но в расплаве массой 100 кг увеличение  $P_{Mm}$  при  $P_{im} = \text{Const}$  приводит к уменьшению влияния ЭР-источника на  $\Delta U$  (рис. 8а), а в расплаве массой 1 кг его влияние при этом возрастает (рис. 8б).

## ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что рассмотренные виды нагружения алюминиевого расплава создают в нем интенсивные волновые процессы, приводящие не только к быстрому изменению в нем давления, но и к изменению его фазового состояния в процессе кавитации, а также обеспечивают интенсивное энергетическое воздействие на него. Несмотря на малую амплитуду давления, создаваемого ЭР-нагружением, фокусировка волн, генерируемых ЭР, на оси симметрии цилиндрической полости увеличивает их амплитуду на порядок, а также повышает в 2 раза частоту изменения давления в расплаве. В комбинации МИ- с ЭР-нагружением обеспечивается наибольший эффект волнового и энергетического воздействия на расплав. Увеличение массы расплава приводит к возрастанию длительности и амплитуды волнового и энергетического воздействия на него МИ- и ЭР-источников давления без изменения их параметров.

В объеме расплава массой 100 кг ЭР-источник давления в 3 раза увеличивает максимальное изменение плотности внутренней энергии расплава по сравнению с расплавом массой 1 кг.

Максимальное изменение плотности внутренней энергии расплава под действием МИ-нагружения практически не зависит от массы расплава.

Совместное действие МИ- и ЭР-источников существенно повышает  $\Delta U$  при увеличении  $P_{Mm}$ , но в расплаве массой 100 кг увеличение  $P_{Mm}$  при  $P_{im} = \text{Const}$  приводит к уменьшению влияния ЭР-источника на  $\Delta U$ , а в расплаве массой 1 кг его влияние при этом возрастает.

Из полученных результатов следует, что в экспериментальных исследованиях при действии ЭР-источника на расплав массой 1 кг максимальное изменение  $\Delta U$  в нем может быть в 3 раза меньше, чем в расплаве массой 100 кг.

### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Цуркин, В.Н., Иванов, А.В., Функциональные возможности электромагнитно-акустических преобразований в токовом режиме в металлическом расплаве, *ЭОМ*, 2021, т. 57, № 6, с. 60.  
<https://doi.org/10.52577/eom.2021.57.6.60>
2. Косенков, В.М., Иванов, А.В., Формирование волновых полей в металлическом расплаве под действием магнитно-импульсного, нагружения и импульсов разрядного тока, *ЭОМ*, 2024, т. 60, № 3, с. 42.  
<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.42>
3. Косенков, В.М., Иванов, А.В., Влияние параметров источников импульсного давления на волновые поля в металлическом расплаве, *ЭОМ*, 2025, т. 61, № 1, с. 73.  
<https://doi.org/10.52577/eom.2025.61.1.073>
4. Pericleous, K., Vojarevics, V., Djambazov, G., Dybalska, A., et al., Contactless ultrasonic cavitation in alloy melts, *Materials*, 2019, vol. 12, art. ID 3610.  
<https://doi.org/10.3390/ma12213610>
5. Timoshkin, I.Yu., Nikitin, K.V., Nikitin, V.I., and Deev, V.B., Influence of melt processing with electromagnetic acoustic fields on the structure and properties of Al-Si system alloys, *Proc. Non-Ferr. Metall.*, 2016, vol. 3, p. 28.
6. Глушечков, В.А., Никитин, В.И., Черников, Д.Г., Никитин, К.В., О воздействии импульсных магнитных полей на расплавы, *Металлургия машиностроения*, 2012, № 4, с. 47.
7. Иванов, А.В., Череповский, С.С., Особенности преобразования энергии в системе «Индуктор-расплав» при магнитно-импульсной обработке расплавов, *Вестник НТУ «ХПИ»*, 2015, № 48, с. 13.
8. Зарембо, В.И., Киселёва, О.Л., Колесников, А.А., Подгородская, Е.С., и др., Влияние импульсов тока на процессы плавления и кристаллизации металлов, *Металлургия машиностроения*, 2005, № 1, с. 11.
9. Зарембо, В.И., Подгородская, Е.С., Колесников, А.А., Изменение ликвации жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта при кристаллизации в слабых электромагнитных полях в токовом режиме, *Химическая промышленность*, 2003, т. 80, № 9, с. 31.
10. Киселёва, О.Л., Колесников, А.А., Зарембо, В.И., Увеличение скоростей гетерогенных физико-химических превращений в режиме резонансного электромагнитно-акустического преобразования, *Химическая промышленность*, 2003, т. 80, № 5, с. 12.
11. Бибииков, А.М., Халтурин, И.П., Зарембо, В.И., Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием, *Литейное производство*, 2007, № 5, с. 12.
12. Коровин, В.И., Импульс давления в жидком проводнике цилиндрической формы, вызываемый импульсом тока, *Журнал технической физики*, 2005, т. 75, № 7, с. 1.
13. Каганов, М.И., Васильев, А.Н., Электромагнитно-акустическое преобразование – результат действия поверхностной силы, *Успехи физических наук*, 1993, т. 163, № 10, с. 67.
14. Васильев, А.Н., Каганов, М.И., Маллави, Ф.Н., Термоупругие напряжения – один из механизмов электромагнитно-акустического преобразования, *Успехи физических наук*, 1993, т. 163, № 10, с. 81.
15. Ivanov, A.V., and Tsurkin, V.N., Peculiarities of distribution of electromagnetic current treatment of melts in different modes, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2018, vol. 55, no. 1, p. 53.  
<https://doi.org/10.3103/S1068375519010101>
16. Гитис, М.Б., Михайлов, И.Г., Распространение звука в жидких металлах. Обзор, *Акустический журнал*, 1966, т. 12, № 2, с. 145.
17. Dinsdale, A.T., and Quedstedt, P.N. The viscosity of aluminium and its alloys-A review of data and models. *J. Mater. Sci.*, 2004, vol. 39, 7221.  
<https://doi:10.1023/B:JMASC.0000048735.50256.96>
18. Меньшикова, С. Г., Вязкость и затвердевание расплавов  $Al_{100-x}Cu_x$  ( $x=5, 10, 17, 25$  ат.%), *Химическая физика и мезоскопия*, 2022, т. 24, № 3, с. 377.  
<https://doi.org/10.15350/17270529.2022.3.31>
19. Хуснутдинов, Р. М., Мокшин, А. В., Меньшикова, С.Г., Бельтюков, А. Л., et al., Вязкостные и акустические свойства расплавов  $AlCu$ , *ЖЭТФ*, 2016, т. 149, вып. 5, стр. 994.
20. Ладьянов, В.И., Бельтюков, А.Л., Меньшикова, С.Г., Маслов, В.В., et al., О вязкости стеклообразующих расплавов  $Al_{86}(Ni, Co)_8Gd_4(Y/Tb)_2$ , *Металлофиз. новейшие технол.*, 2005, т. 27, № 5, с. 687.
21. Лайтхилл, Дж., *Волны в жидкостях*, М.: Мир, 1981, 603 с.

### Summary

Using mathematical modeling, the influence of the magnetic-pulse, electric-discharge, and combined pulsed

pressure sources on the wave fields in aluminum melts of varying masses was studied. An increase in the intensity of the wave fields generated by an electric-discharge source was observed with increasing melt mass. Melt mass was found to have a little effect on the wave fields generated by the magnetic-pulse pressure source. The amplitude of the pulsed pressure sources and the mass of

the melt were found to significantly influence changes in its internal energy density.

*Keywords:* electric discharge, melt, acoustic wave processes, magnetic pulse loading, pulse pressure parameters