

# Формирование волновых полей в металлическом расплаве под действием магнитно-импульсного нагружения и импульсов разрядного тока

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 15.01.2024

После доработки 16.05.2024

Принята к публикации 30.05.2024

На основе математического моделирования выполнено исследование волновых полей в расплаве алюминия, формируемых действием магнитно-импульсного, электроразрядного и комбинированного источников. Произведен сравнительный анализ их влияния на волновые поля в расплаве. Отмечено повышение интенсивности волновых полей под действием комбинированного способа нагружения расплава. Определено возникновение кавитации в расплаве под действием рассмотренных источников импульсов давления. Отмечены энергетические особенности действия полей давления на расплав. Показано влияние массы расплава на возникающие в нем поля давления.

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

УДК 537.528:621.3.017:534.21

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.3.42>

## 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]. 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, распространения акустических возмущений и их взаимодействия с преградами (стенки технологического реактора) и фазами объекта обработки (неоднородностями) для прогноза эффекта акустического воздействия.

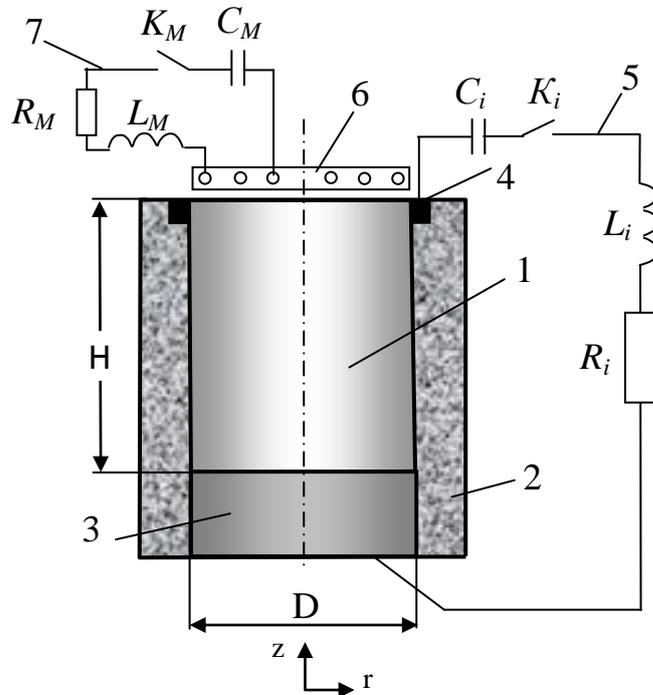
Изучение этой проблемы ограничивается в настоящее время решением частных задач [2–8] для исследования некоторых явлений на отдельных этапах ЭМАП. Расплав нагружают или индуктором [2–5], или пропускают ток непосредственно через расплав [6, 7]. Анализируют функциональные возможности ЭМАП без привязки к способу формирования магнитного давления в скин-слое [8–14], показывая только качественную формализованную картину физических механизмов ЭМАП.

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.

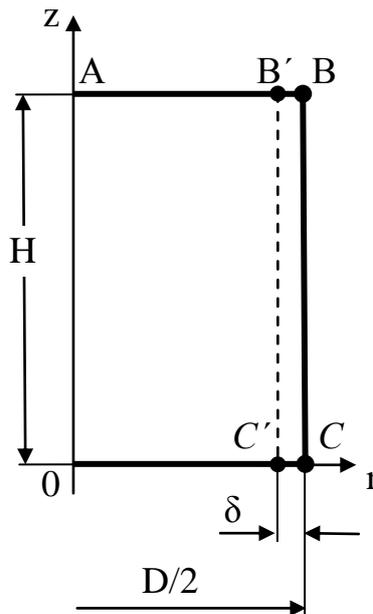
Цель данной работы – изучить особенности волновых полей, создаваемых магнитно-импульсным (МИ), электроразрядным (ЭР) и комбинированным способами в металлическом расплаве.

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Волновые процессы в расплаве металла исследовали, используя схему, приведенную на рис. 1. Полость 1 цилиндрической керамической формы 2 с металлическим дном 3 заполнена расплавом алюминиевого сплава. В верхней части формы 2 установлен кольцевой электрод 4. К электроду 4 и дну 3 подключены кабели разрядного контура 5, который характеризуется



**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.

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 контуру 7, содержащему конденсаторную батарею  $C_M$  и коммутатор  $K_M$ . Его 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 конденсаторной батареи  $C_i$  в контуре 5

(ЭР), разрядом конденсаторной батареи  $C_M$  в контуре 7 на индуктор 6 (МИ) или одновременным 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 на расплав происходит по границе  $AB$ , а от разряда через расплав – по границе  $BC$ .

Исследование волновых процессов в расплаве выполняли методом математического моделирования. Учитывая малые амплитуды давления на расплав [1] и импульсное (кратковременное) его нагружение, позволяющее не учитывать вязкость расплава, его считали идеальной сжимаемой жидкостью с постоянной скоростью звука. В этом случае движение жидкости можно считать потенциальным и безвихревым. Волновые процессы в такой жидкости с большой достоверностью описываются волновым уравнением [15], которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = c_f^2 \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right], \quad (1)$$

где  $\psi$  – потенциал скорости расплава, м<sup>2</sup>/с;  $c_f$  – скорость звука в расплаве, м/с;  $r, z$  – пространственные координаты, м.

Давление в расплаве определяли с помощью линейного интеграла Коши–Лагранжа [15]:

$$P = P_0 - \rho_f \frac{\partial \psi}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $\rho_f$  – плотность расплава, кг/м<sup>3</sup>;  $P_0$  – начальное давление в расплаве, Па.

Если давление в расплаве становилось меньше давления насыщенного пара ( $P_k$ ), тогда принимали  $P = P_k$ . В этом случае расплав находился в состоянии кавитации. Величину  $P_k$  задавали равной 1 кПа.

Составляющие вектора скорости жидкости определяли по градиенту потенциала:

$$V_r = \frac{\partial \psi}{\partial r}, \quad (3)$$

$$V_z = \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (4)$$

Граница  $OC$  (рис. 2) непроницаемая, поэтому на ней задавали условие:

$$V_z = 0. \quad (5)$$

Условие на границе  $AB$  (рис. 2) зависит от способа нагружения расплава. При электрическом разряде конденсаторной батареи  $C_i$  в контуре 5 между электродами 3 и 4 (рис. 1), на границу  $AB$  (рис. 2) действует только атмосферное давление  $P_0$ , тогда:

$$P = P_0. \quad (6)$$

Когда происходит разряд конденсаторной батареи  $C_M$  в контуре 7 на индуктор 6 (рис. 1), тогда на границе  $AB$  (рис. 2):

$$P = P_M + P_0, \quad (7)$$

где  $P_M$  – давление на границу расплава  $AB$  (рис. 2) от индуктора 6 (рис. 1).

Условие (7) остается справедливым при одновременном разряде конденсаторных батарей  $C_i$  и  $C_M$  в контурах 5 и 7 (рис. 1) соответственно.

Граница  $BC$  (рис. 2) непроницаема, поэтому при любых способах нагружения расплава на ней выполняется условие

$$V_r = 0. \quad (8)$$

При разряде конденсаторной батареи  $C_i$  в контуре 5 (рис. 1) необходимо учесть, что на границе  $BC$  (рис. 2) давление, создаваемое при протекании тока через расплав ( $P_i$ ), является добавкой к давлению ( $P_f$ ), создаваемому в скин-слое расплава другими источниками в момент времени  $t$ , тогда необходимо задать условие:

$$P = P_i + P_f. \quad (9)$$

Однако на одной границе  $BC$  условия (8) и (9) несовместимы. Для разрешения этого противоречия приняли во внимание, что давление на расплав в этом случае действует с поверхности скин-слоя  $B'C'$  (рис. 2), отстоящего от стенки  $BC$  на его толщину  $\delta$ . Тогда условие (9) необходимо задавать на поверхности скин-слоя  $B'C'$  (рис. 2).

При одновременном разряде конденсаторных батарей  $C_i$  и  $C_M$  в контурах 5 и 7 (рис. 1) на границе  $B'C'$  (рис. 2) также необходимо задавать условие (9).

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

$$P_M = P_{Mm} \times \exp(-t / \tau_M) \times \left| \sin(2 \times \pi \times t / T_M) \right|, \quad (10)$$

$$P_i = P_{im} \times \exp(-t / \tau_i) \times \left| \sin(2 \times \pi \times t / T_i) \right|, \quad (11)$$

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 электро-разрядного нагружения расплава.

Кроме поля давления в расплаве, представляет интерес поле плотности мощности энергии ( $W$ ), действующей на расплав в результате возникающих в нем волновых процессов [1]. Поле  $W$  можно определить по полю давления, используя формулу:

$$W = \frac{\partial P}{\partial t}. \quad (12)$$

Согласно [1] величины параметров давления  $P_M$  и  $P_i$  лежат в пределах:  $P_{Mm}$  от 1 до 10 МПа;  $P_{im}$  от 0,01 до 0,1 МПа;  $T_M$  от 10 до 200 мкс;  $T_i$  от 10 до 60 мкс;  $\tau_M \approx T_M/2$ ;  $\tau_i \approx T_i/2$ . При таких условиях, в расплаве алюминийевого сплава толщина скин-слоя  $\delta \ll 1$  мм.

Решение краевой задачи (1)–(11) выполняли с помощью численных методов. Непрерывную расчетную область (рис. 2) заменяли дискретной, используя прямоугольную сетку с пространственными шагами  $\Delta r$  и  $\Delta z$  и временным шагом  $\Delta t$ . Уравнение (1) дискретизировали, используя явную, трехслойную по времени, конечно-разностную схему второго порядка точности по пространству и времени. Поле давления в расплаве, полученное в результате решения краевой задачи (1)–(11), сглаживали для устранения дисперсионной погрешности численного решения, характерной для схемы второго порядка точности в пределах пятиточечного шаблона по пространству и трехточечного по времени. Тестирование полученной математической модели (1)–(11) выполняли на основе известных решений задач распространения, дифракции и интерференции волн в ограниченных объемах сжимаемой жидкости.

Основная задача данной работы состоит в определении влияния магнитно-импульсного и электрического разряда на возникающие в нем волновые процессы. Также представляет интерес оценка влияния объема полости  $I$  (рис. 1), заполненной расплавом, на характеристики полей  $P$  и  $W$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование волновых процессов 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

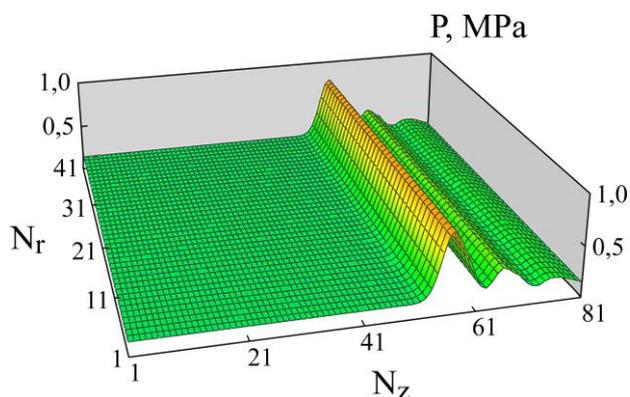
давления  $P_M$  и  $P_i$  принимали равными:  $P_{Mm} = 1$  МПа;  $P_{im} = 0,1$  МПа;  $T_M = T_i = 20$  мкс;  $\tau_M = \tau_i = T_i/2$ .

В расплаве массой 1 кг длина волн нагружения от МИ- и ЭР-воздействий сравнима с размерами полости  $I$  (рис. 1), следовательно, интерференция волн наступает за короткое время и различить волны от разных источников давления сложно. Поэтому на рис. 3–5 приведены поля давления в расплаве массой 100 кг в момент времени 30 мкс, когда волны от МИ- и ЭР-нагружения различимы, так как их длина намного меньше, чем размеры полости  $I$  (рис. 1). Как и следовало ожидать, поля давления в расплаве при МИ-, ЭР- и комбинированном нагружении существенно отличаются (рис. 3–5). В процессе МИ-нагружения вдоль оси  $z$  распространяется волна давления с постоянной амплитудой (рис. 3). В процессе ЭР-нагружения волна давления распространяется от цилиндрической поверхности полости к ее оси с возрастанием амплитуды (рис. 4). Комбинированное нагружение расплава сопровождается интерференцией волн от МИ- и ЭР-воздействия (рис. 5).

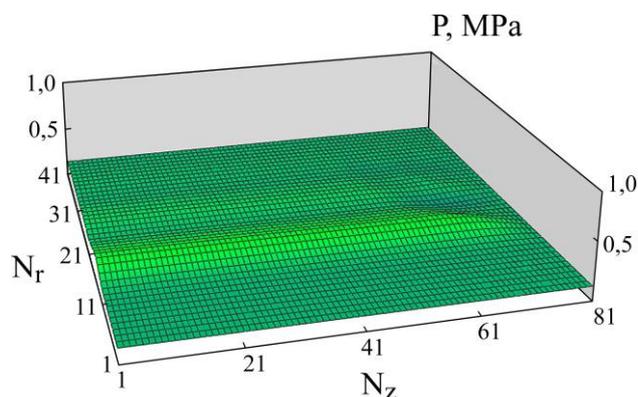
Наибольшее давление в расплаве от МИ-нагружения возникает вблизи дна  $3$  полости  $I$  (рис. 1), где оно удваивается, а от ЭР-нагружения достигает максимума вблизи оси симметрии, увеличиваясь на порядок, по сравнению с наибольшим давлением в скин-слое. После отражения волн от свободной поверхности расплава и оси симметрии полости  $I$  (рис. 1) в расплаве возникает кавитация.

В расплаве массой 1 кг в процессе МИ-нагружения (рис. 6) максимальные давления в течение 20 мкс находятся на уровне 0,7 МПа, а после 20 мкс достигают 1,4 МПа после отражения волн от дна  $3$  полости  $I$  (рис. 1). Через 40 мкс от начала МИ-нагружения волна давления достигает свободной поверхности расплава  $AB$  (рис. 2), которая генерирует волны разрежения, поэтому максимальное давление быстро уменьшается до  $P_0$ . Минимальное давление остается на уровне  $P_0$  до 40 мкс, а затем под действием волн разрежения в расплаве возникает кавитация и давление уменьшается до  $P_k$  (рис. 6).

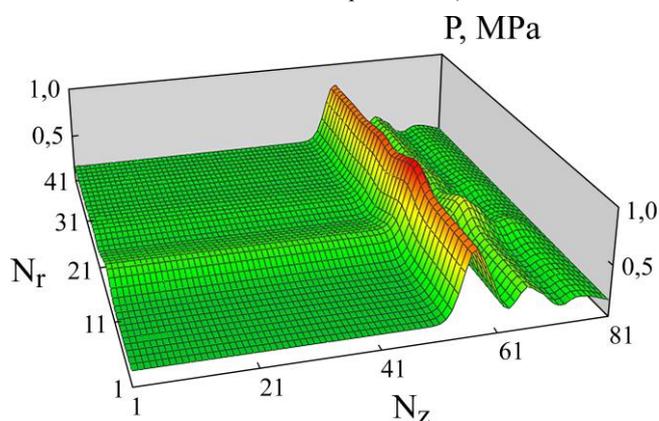
В процессе ЭР-нагружения волна давления в расплаве достигает оси симметрии полости  $I$  (рис. 1) приблизительно через 8,9 мкс с максимальным давлением 0,45 МПа (рис. 6). К моменту времени 28 мкс максимальное давление уменьшается до уровня  $P_0$ . После 16 мкс от начала ЭР-нагружения минимальное давление в расплаве понижается до  $P_k$  и в нем возникает кавитация, существующая с небольшими перерывами до 60 мкс (рис. 6).



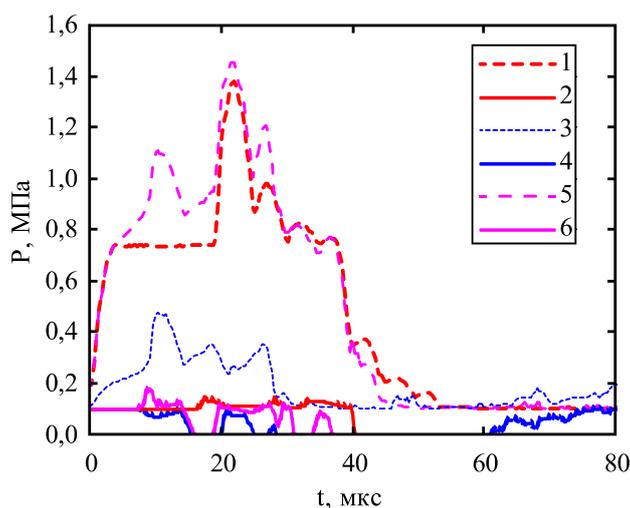
**Рис. 3.** Поле давления в расплаве массой 100 кг в момент времени 30 мкс от МИ-нагружения.  $N_r$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $r$  (узел  $N_r = 1$  находится на оси симметрии);  $N_z$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $z$  (узел  $N_z = 1$  находится на дне формы, заполненной расплавом).



**Рис. 4.** Поле давления в расплаве массой 100 кг в момент времени 30 мкс от ЭР-нагружения.  $N_r$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $r$  (узел  $N_r = 1$  находится на оси симметрии);  $N_z$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $z$  (узел  $N_z = 1$  находится на дне формы, заполненной расплавом).



**Рис. 5.** Поле давления в расплаве массой 100 кг в момент времени 30 мкс от комбинированного МИ- и ЭР-нагружения.  $N_r$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $r$  (узел  $N_r = 1$  находится на оси симметрии);  $N_z$  – номера узлов дискретной расчетной области (рис. 2) в направлении оси  $z$  (узел  $N_z = 1$  находится на дне формы, заполненной расплавом).



**Рис. 6.** Максимумы (1, 3, 5) и минимумы (2, 4, 6) давления в расплаве массой 1 кг: 1 и 2 – МИ, 3 и 4 – ЭР, 5 и 6 – МИ+ЭР.

Максимальное давление в расплаве в процессе комбинированного нагружения относительно мало отличается от суммы максимальных давлений при МИ- и ЭР-нагружениях, а минимальное давление близко к минимальному давлению при ЭР-нагружении (рис. 6). Благодаря ЭР-составляющей комбинированного

нагружения максимальное давление в расплаве имеет большее количество локальных максимумов, что может благоприятно влиять на улучшение качества расплава [1, 5, 6].

Линейные размеры полости 1 (рис. 1), заполненной расплавом массой 100 кг, в 4,66 раза больше, чем у расплава массой 1 кг. Приблиз-

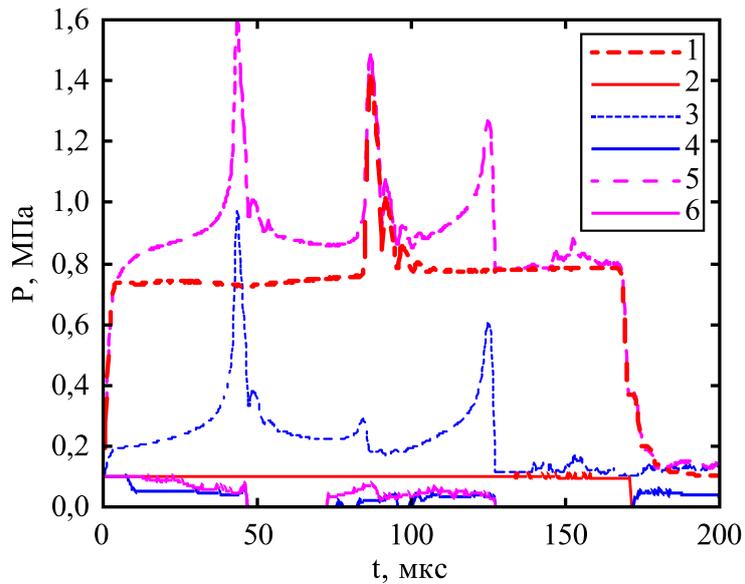


Рис. 7. Максимумы (1, 3, 5) и минимумы (2, 4, 6) давления в расплаве массой 100 кг: 1 и 2 – МИ, 3 и 4 – ЭР, 5 и 6 – МИ+ЭР.

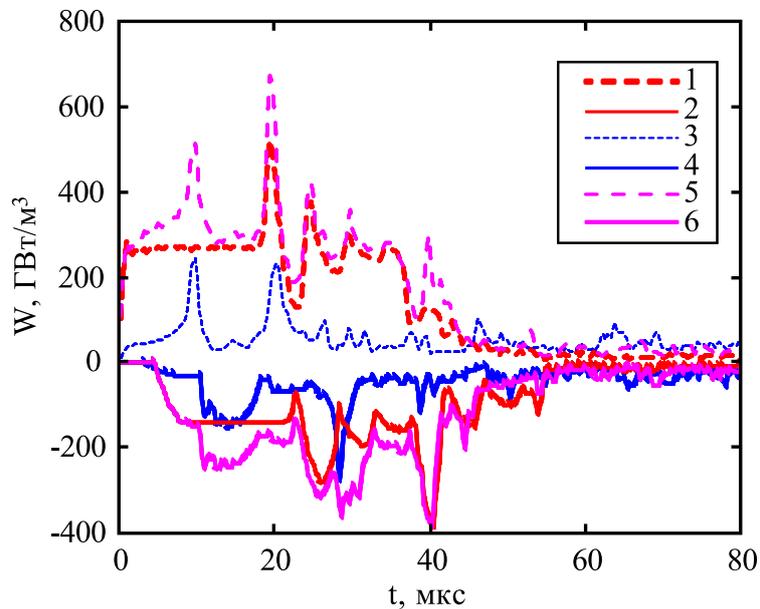


Рис. 8. Максимумы (1, 3, 5) и минимумы (2, 4, 6) плотности мощности энергетического воздействия на расплав массой 1 кг: 1 и 2 – МИ; 3 и 4 – ЭР; 5 и 6 – МИ+ЭР.

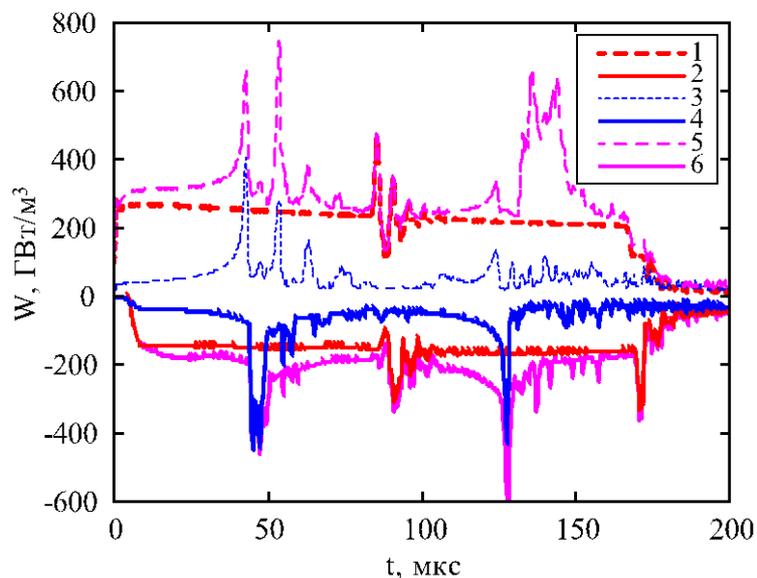


Рис. 9. Максимумы (1, 3, 5) и минимумы (2, 4, 6) плотности мощности энергетического воздействия на расплав массой 100 кг: 1 и 2 – МИ; 3 и 4 – ЭР; 5 и 6 – МИ+ЭР.

тельно во столько же раз увеличивается время нагружения расплава волнами давления, генерируемыми МИ-, ЭР- и комбинированным способами (рис. 7).

В процессе МИ-нагружения расплава массой 100 кг максимальное давление в нем мало отличается от давления в расплаве массой 1 кг, но действует приблизительно в 4,5 раза дольше (рис. 7). Подобным образом отличается и минимальное давление.

ЭР-нагружение расплава массой 100 кг не только увеличивает длительность максимального давления в нем по сравнению с расплавом массой 1 кг, но и приблизительно в 2 раза увеличивает его амплитуду (рис. 7). Минимальное давление также понижается до кавитации.

Максимальное давление при комбинированном нагружении расплава массой 100 кг представляет собой суперпозицию максимальных давлений, создаваемых МИ- и ЭР-нагружениями (рис. 7).

Максимальная и минимальная плотность мощности ( $W$ ) энергетического воздействия на расплав массой 1 кг в процессе МИ-нагружения отличается от МИ-воздействия на расплав массой 100 кг в основном длительностью (рис. 8, 9).

ЭР-нагружение расплава массой 100 кг создает максимальную и минимальную плотность мощности ( $W$ ), приблизительно в 2 раза большую, чем при ЭР-нагружении расплава массой 1 кг, и действует на расплав в 4,5 раза дольше (рис. 8, 9).

Комбинированное нагружение расплава массой 100 кг увеличивает максимальную и минимальную плотность мощности ( $W$ ) до 30% по сравнению с расплавом массой 1 кг (рис. 8, 9).

Комбинированное нагружение расплава увеличивает частоту изменения  $W$ . Основной вклад в повышение частоты изменения  $W$  вносит ЭР-нагружение расплава. Максимальные и минимальные величины  $W$  сравнимы по амплитуде. Из полученных результатов следует, что в процессе волнового воздействия на расплав происходит быстрый подвод и отвод энергии от него, способствующий интенсификации в нем неравновесных процессов [6, 13]. Это должно благоприятно влиять на подготовку расплава к последующей его кристаллизации [1, 5, 6, 13].

## 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 трансформации

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 два 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 увеличению длительности и амплитуды волнового и энергетического воздействия на него МИ- и ЭР-источников давления без изменения их параметров.

## КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт 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. Pericleous, K., Bojarevics, 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>
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Зарембо, В.И., Подгородская, Е.С., Колесников, А.А., Изменение ликвиции жаропрочных сплавов на основе никеля и кобальта при кристаллизации в слабых электромагнитных полях в токовом режиме, *Химическая промышленность*, 2003, т. 80, № 9, с. 31.

8. 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.
9. Бибииков, А.М., Халтурин, И.П., Зарембо, В.И., Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием, *Литейное производство*, 2007, № 5, с. 12.
10. Коровин, В.И., Импульс давления в жидком проводнике цилиндрической формы, вызываемый импульсом тока, *Журнал технической физики*, 2005, т. 75, № 7, с. 1.
11. Каганов, М.И., Васильев, А.Н., Электромагнитно-акустическое преобразование – результат действия поверхностной силы, *Успехи физических наук*, 1993, т. 163, № 10, с. 67.
12. 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.
13. 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.
14. Гитис, М.Б., Михайлов, И.Г., Распространение звука в жидких металлах. Обзор, *Акустический журнал*, 1966, т. 12, № 2, с. 145.
15. Kosenkov V.M. and Bychkov V.M., *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 89. <https://doi.org/10.3103/S1068375519010113>

### Summary

Based on mathematical modeling, a study of the wave fields in molten aluminum formed by the action of a pulse, electric discharge and combined sources was carried out. A comparative analysis of their influence on the wave fields in the melt was performed. An increase in the intensity of the wave fields under the influence of a combined method of loading the melt was registered. The occurrence of cavitation in the melt under the influence of the considered sources of pressure pulses has been determined. The energy features of the action of pressure fields on the melt are noted. The influence of the mass of the melt on the pressure fields arising in it is shown.

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