

Влияние 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*

Поступила в редакцию 12.09.2024

После доработки 24.01.2025

Принята к публикации 27.01.2025

На основе математического моделирования выполнено исследование влияния параметров магнитно-импульсного, электроразрядного и комбинированного источников импульсного давления на волновые поля в расплаве алюминия. Отмечено повышение интенсивности волновых полей в расплаве при увеличении амплитуды, периода пульсации и времени затухания пульсаций давления, создаваемого импульсными источниками. Определено возникновение кавитации в расплаве под действием рассмотренных источников импульсов давления. Выявлено существенное влияние параметров импульсных источников давления на изменение плотности внутренней энергии расплава.

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.2025.61.1.073>

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 (δ) меньше размеров объекта обработки [1, 2]. 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 (стенки технологического реактора) и фазами объекта обработки (неоднородностями), для прогноза эффекта акустического воздействия.

Изучение этой проблемы ограничивается в настоящее время решением частных задач [3–9] для исследования некоторых явлений на

отдельных этапах ЭМАП. Расплав нагружают или индуктором [3–6], или пропуская ток непосредственно через расплав [7, 8]. Анализируют функциональные возможности ЭМАП без привязки к способу формирования магнитного давления в скин-слое [9–15], показывая только качественную формализованную картину физических механизмов ЭМАП. В работе [2] исследованы волновые поля в расплаве, создаваемые магнитно-импульсным (МИ), электроразрядным (ЭР) источниками и их комбинацией, но только при неизменных параметрах давления на расплав.

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, электроразрядным и комбинированным способами на волновые поля в металлическом расплаве.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

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

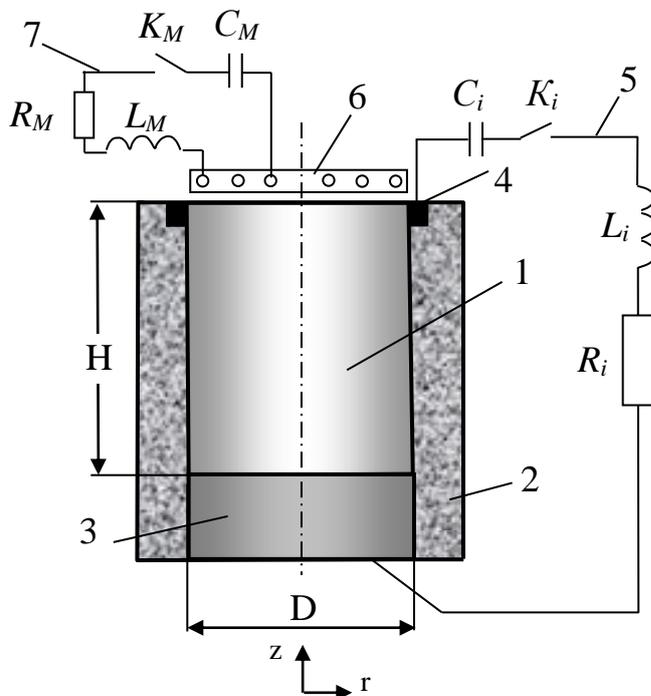


Рис. 1. Схема моделируемой системы: 1 – полость керамической формы, заполненная расплавом металла; 2 – керамический корпус формы; 3 – металлическое дно; 4 – кольцевой электрод; 5 – контур для разряда между электродами 3 и 4; 6 – индуктор; 7 – контур для разряда на индуктор; C_i – емкость конденсаторной 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.

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 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 (ЭР) конденсаторной батареи C_i в контуре 5, 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, используя математическую модель, описанную в работе [2]. Учитывая малые амплитуды давления на расплав [1, 2] 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 [2, 16], которое в цилиндрической системе координат имеет вид:

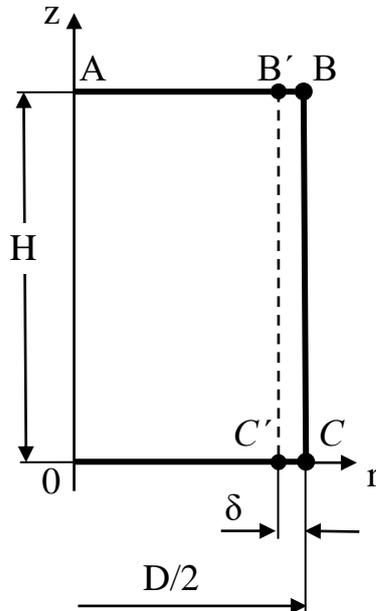


Рис. 2. Схема расчетной области.

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

где Ψ – потенциал скорости расплава, м²/с; c_f – скорость звука в расплаве, м/с; r, z – пространственные координаты, м; t – время, с.

Давление в расплаве определяли с помощью линейного интеграла Коши–Лагранжа [2, 16]:

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

где ρ_f – плотность расплава, кг/м³; 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 [2]. 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 [2]:

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

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 [2]:

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

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

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

где P_M – давление на границу расплава AB (рис. 2) от индуктора б (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 [2]:

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

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 [2]:

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

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 δ . Тогда условие (9) необходимо задавать на поверхности скин-слоя $B'C'$ (рис. 2) [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) [2]. Согласно [1] величины параметров T_M и T_i меньше 200 мкс, следовательно, в расплаве алюминиевого сплава толщина скин-слоя $\delta \ll 1$ мм.

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; τ_M , τ_i – время экспоненциального затухания амплитуды давления от магнитно-импульсного и электроразрядного 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 [2]:

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

В результате действия на расплав импульсного давления изменяется его внутренняя энергия, которая может как увеличиваться (если $W > 0$), так и уменьшаться (если $W < 0$). Ее изменение можно характеризовать изменением средней по объему расплава плотности внутренней энергии (ΔA_w):

$$\Delta A_w = \int_V \left(\int W \times dt \right) \times dV/V, \quad (13)$$

где V – объем расплава.

Средние по объему расплава увеличения (A_{wp}) и уменьшения (A_{wm}) плотности его внутренней энергии можно определить по формулам:

$$A_{wp} = \int_V \left(\int W \times dt \right) \times dV/V, \text{ если } W > 0, \quad (14)$$

$$A_{wm} = \int_V \left(\int W \times dt \right) \times dV/V, \text{ если } W < 0. \quad (15)$$

Величину ΔA_w также можно определить как алгебраическую сумму A_{wp} и A_{wm} .

Решение краевой задачи (1)–(11) выполняли с помощью численных методов. Непрерывную расчетную область (рис. 2) заменяли дискретной, используя прямоугольную сетку с пространственными шагами координат Δr и Δz и временным шагом Δt . 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 параметров магнитно-импульсного и электрического разряда на возникающие в нем волновые процессы.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование выполняли при условии, что масса расплава в полости 1 (рис. 1) равна 100 кг и $H=D$. Плотность расплава задавали равной $\rho_f = 2200 \text{ кг/м}^3$, а скорость звука в нем – $c_f = 4650 \text{ м/с}$, тогда при массе расплава 100 кг – $H = D = 387 \text{ мм}$. Величины параметров давления P_M и P_i , входящих в формулы (10) и (11), варьировали в пределах: $P_{Mm} \in [1; 10] \text{ МПа}$; $P_{im} \in [0,01; 1] \text{ МПа}$; $T_M \in [10; 40] \text{ мкс}$; $T_i \in [10; 40] \text{ мкс}$; $\tau_M \in [5; 80] \text{ мкс}$; $\tau_i \in [5; 80] \text{ мкс}$.

Волновые поля в расплаве, создаваемые каждым из источников (МИ или ЭР), имеют существенные особенности. Волны, генерируемые МИ-воздействием, имеют плоский фронт и распространяются вдоль оси OZ цилиндрической полости 1 (рис. 1) от поверхности AB до OC (рис. 2) за 83 мкс (рис. 3). 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 от начала МИ-воздействия, приводит к формированию волн разрежения, распространяющихся от AB к OC (рис. 3) 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 практически до давления насыщенного пара (P_k). Такие изменения давления в расплаве вызывают большие изменения плотности внутренней энергии в нем (рис. 4) и могут приводить к существенному изменению его термодинамического состояния, тем самым создавая 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 распростра-

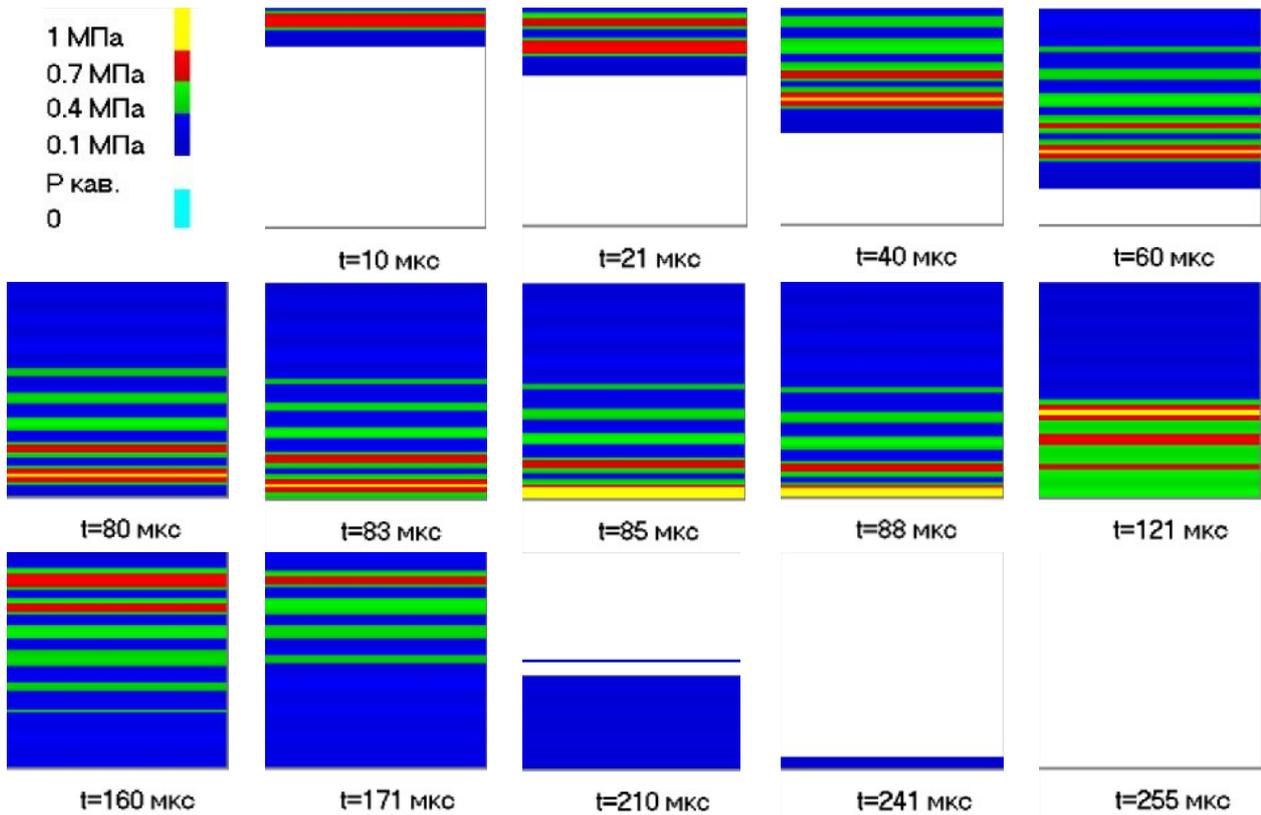


Рис. 3. Поле давления в расплаве в различные моменты времени МИ-нагрева ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс).

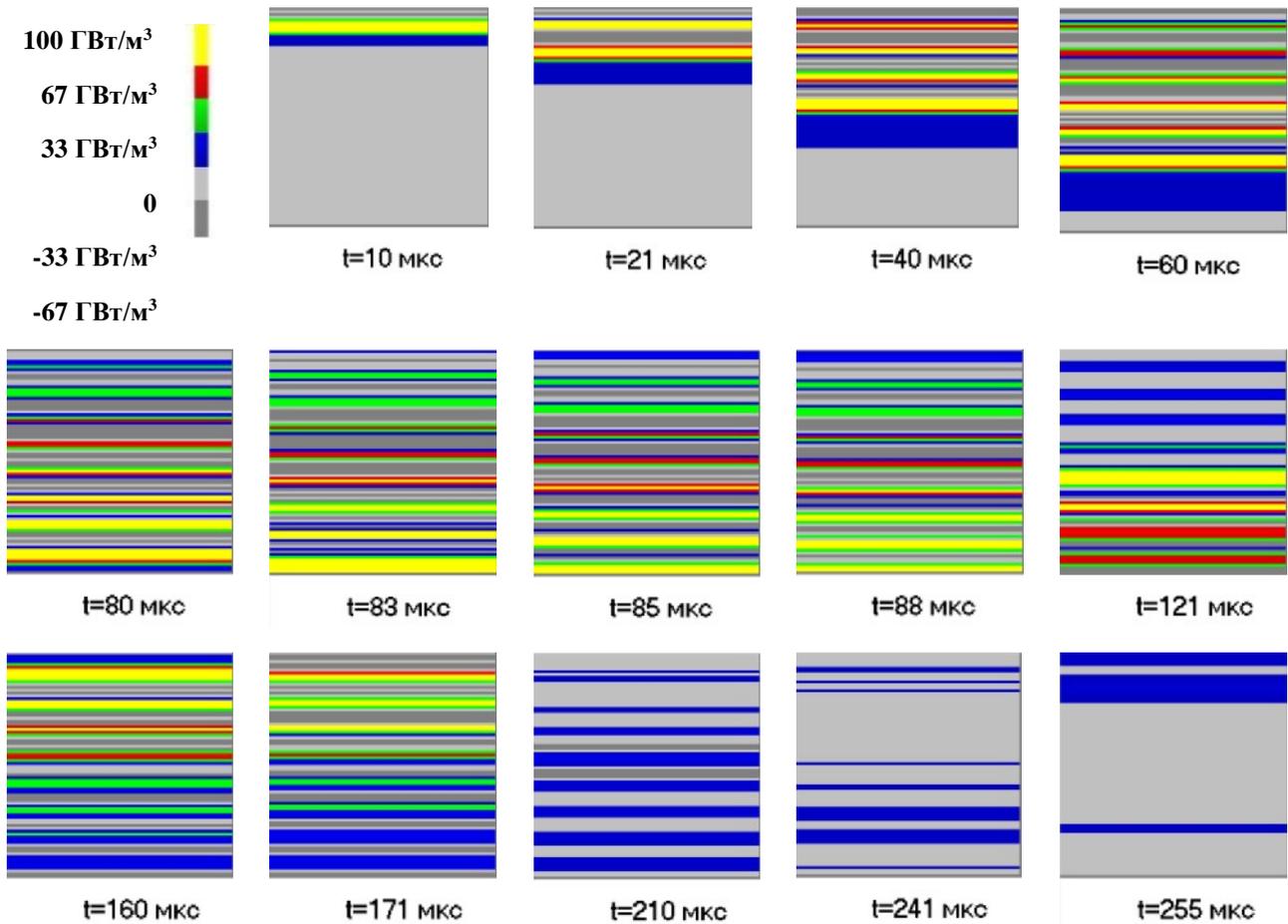


Рис. 4. Поле мощности изменения плотности внутренней энергии в расплаве в различные моменты времени МИ-нагрева ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс).

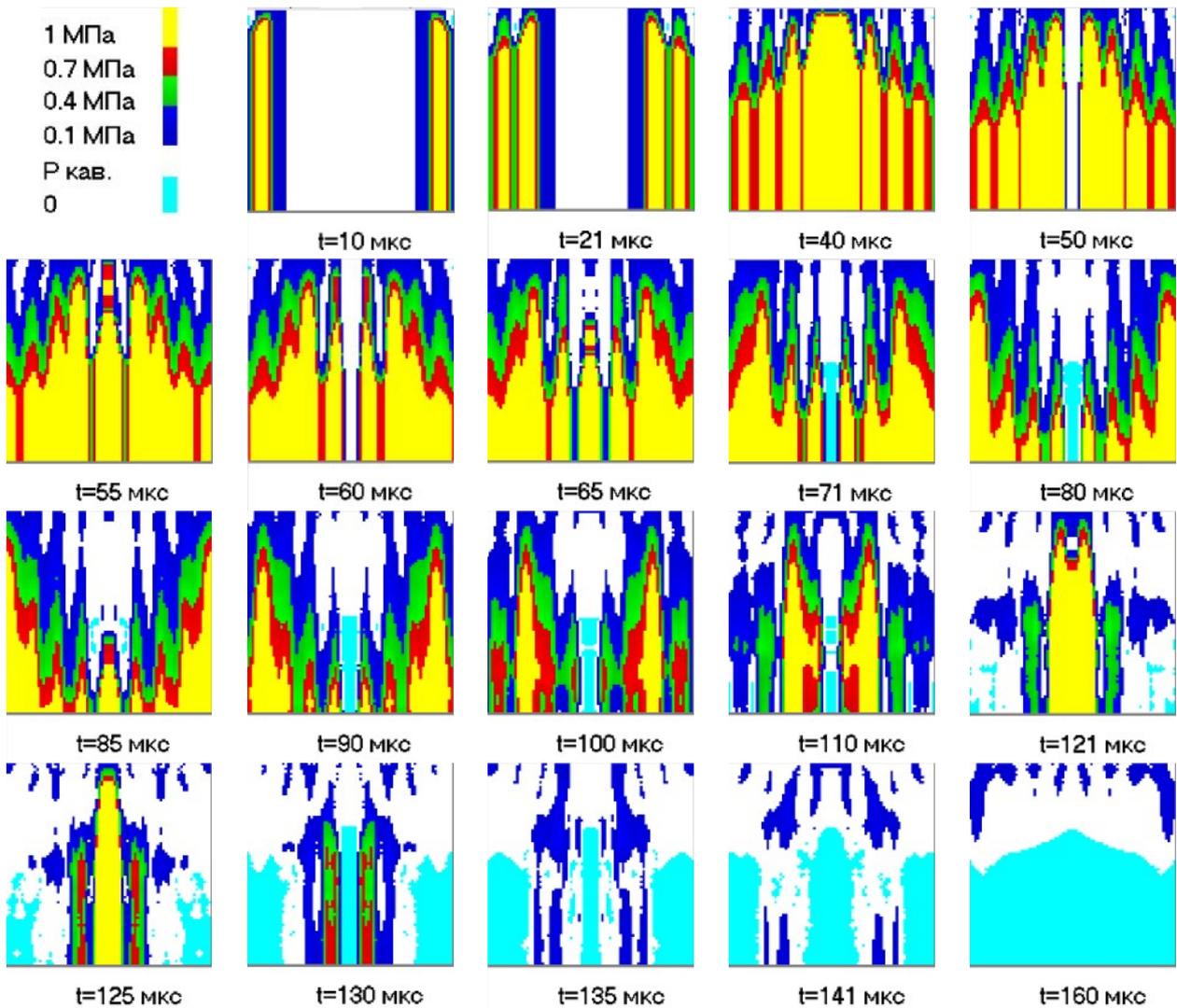


Рис. 5. Поле давления в расплаве в различные моменты времени ЭР-нагружения ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс).

няющиеся 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. 5). Через 41 мкс от начала электрического разряда волны достигают оси OA , на которой происходит их дифракция, приводящая к увеличению давления на порядок (рис. 5) 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 волнами, генерируемыми электрическим разрядом, увеличивая неоднородность распределения давления в полости I (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. 5), 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. 5). Такие волновые процессы происходят вблизи поверхности OC в течение 83 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 (рис. 5). В процессе движения волны разрежения 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). Поле мощности изменения плотности внутренней энергии в расплаве имеет более неоднородную структуру, чем при МИ-воздействии на него (рис. 6), что может повышать эффективность обработки расплава, особенно в сочетании с его кавитацией.

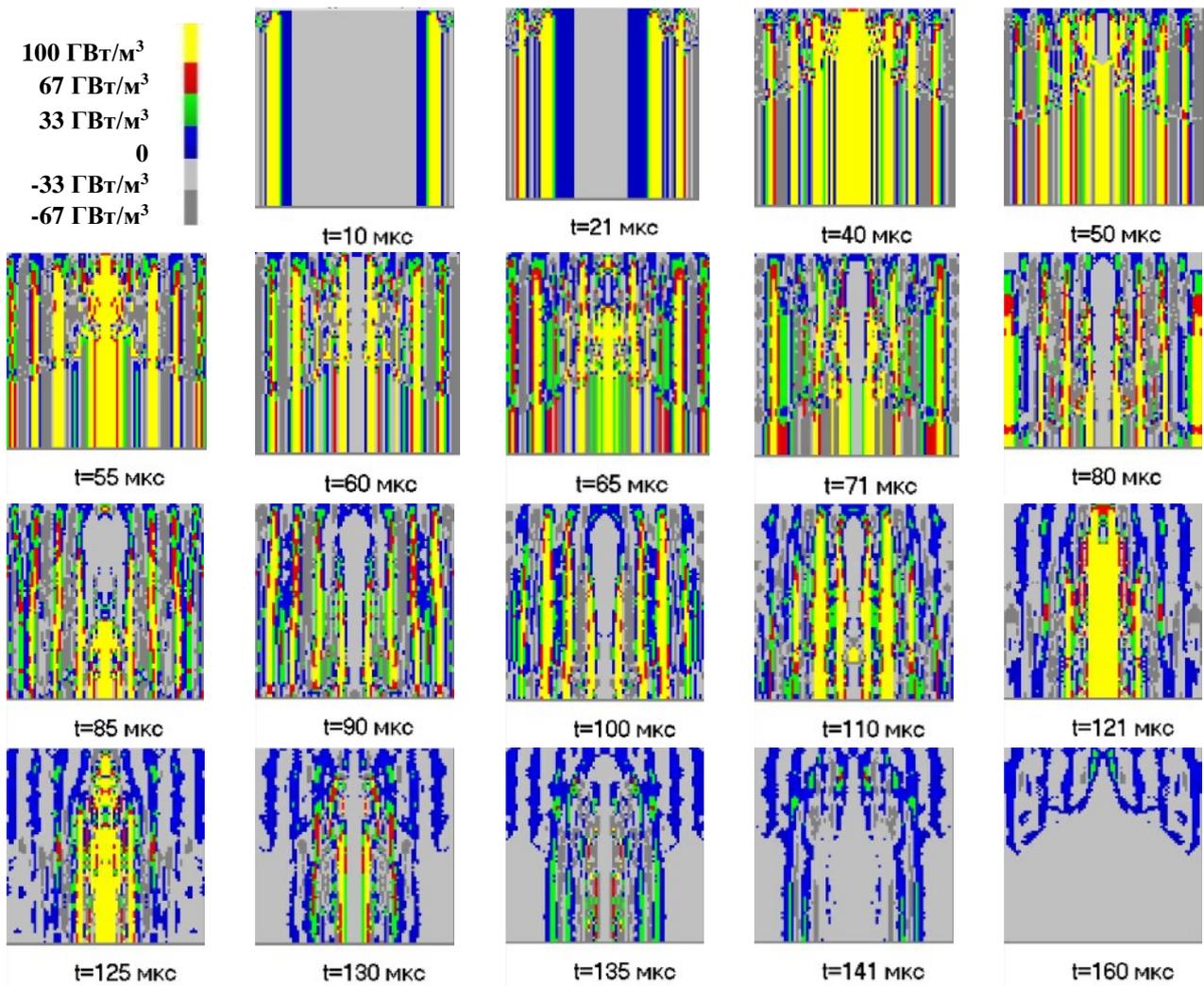
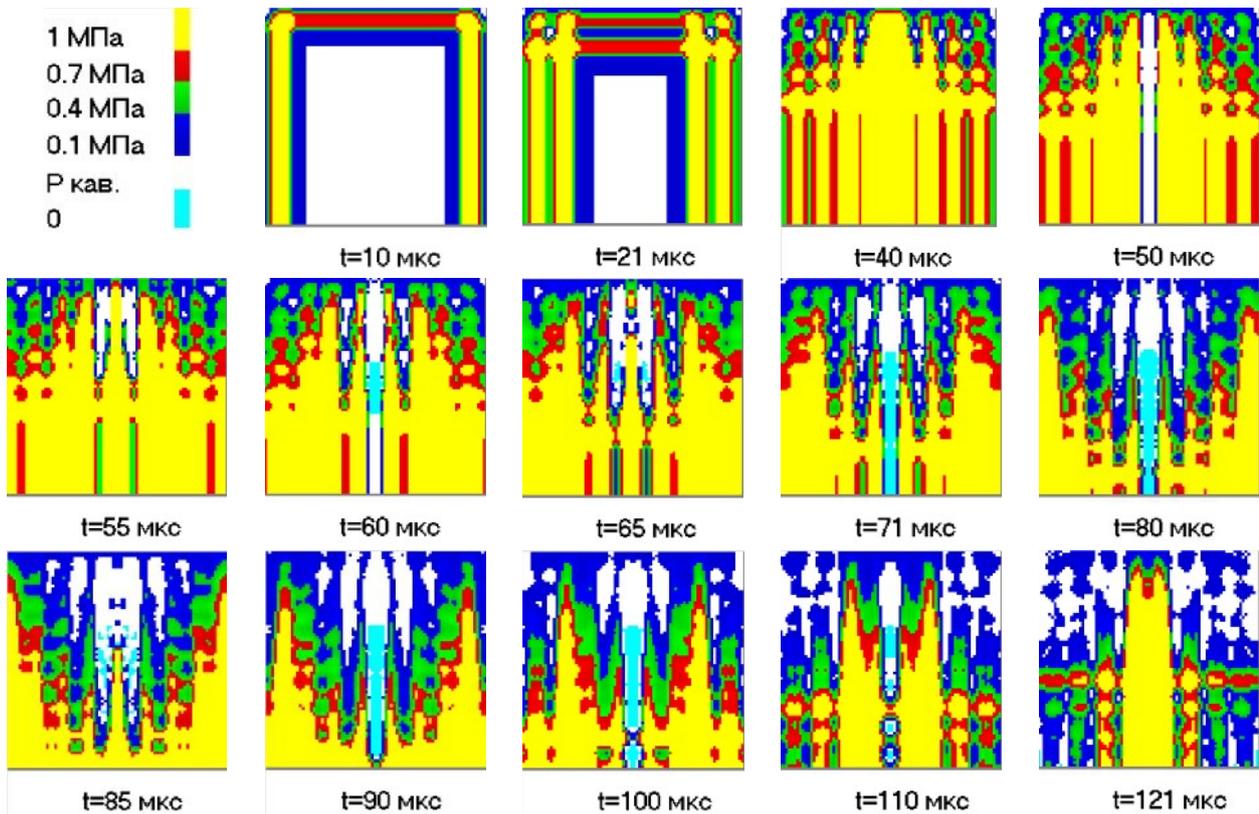


Рис. 6. Поле мощности изменения плотности внутренней энергии в расплаве в различные моменты времени ЭР-нагружения ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс).



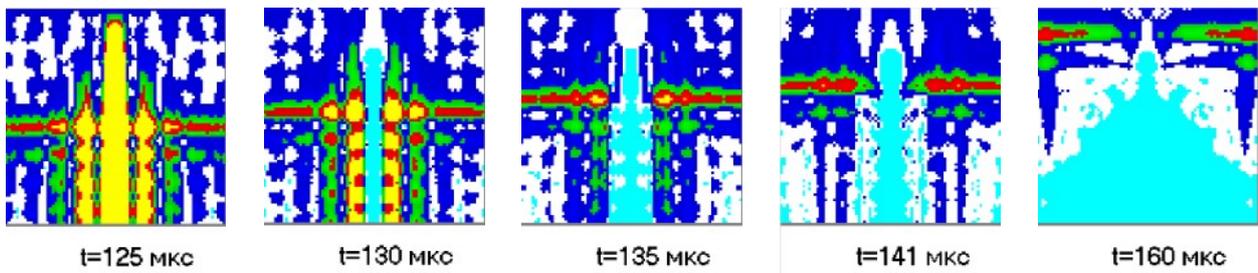


Рис. 7. Поле давления в расплаве в различные моменты времени комбинированного МИ- и ЭР-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс; $P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс).

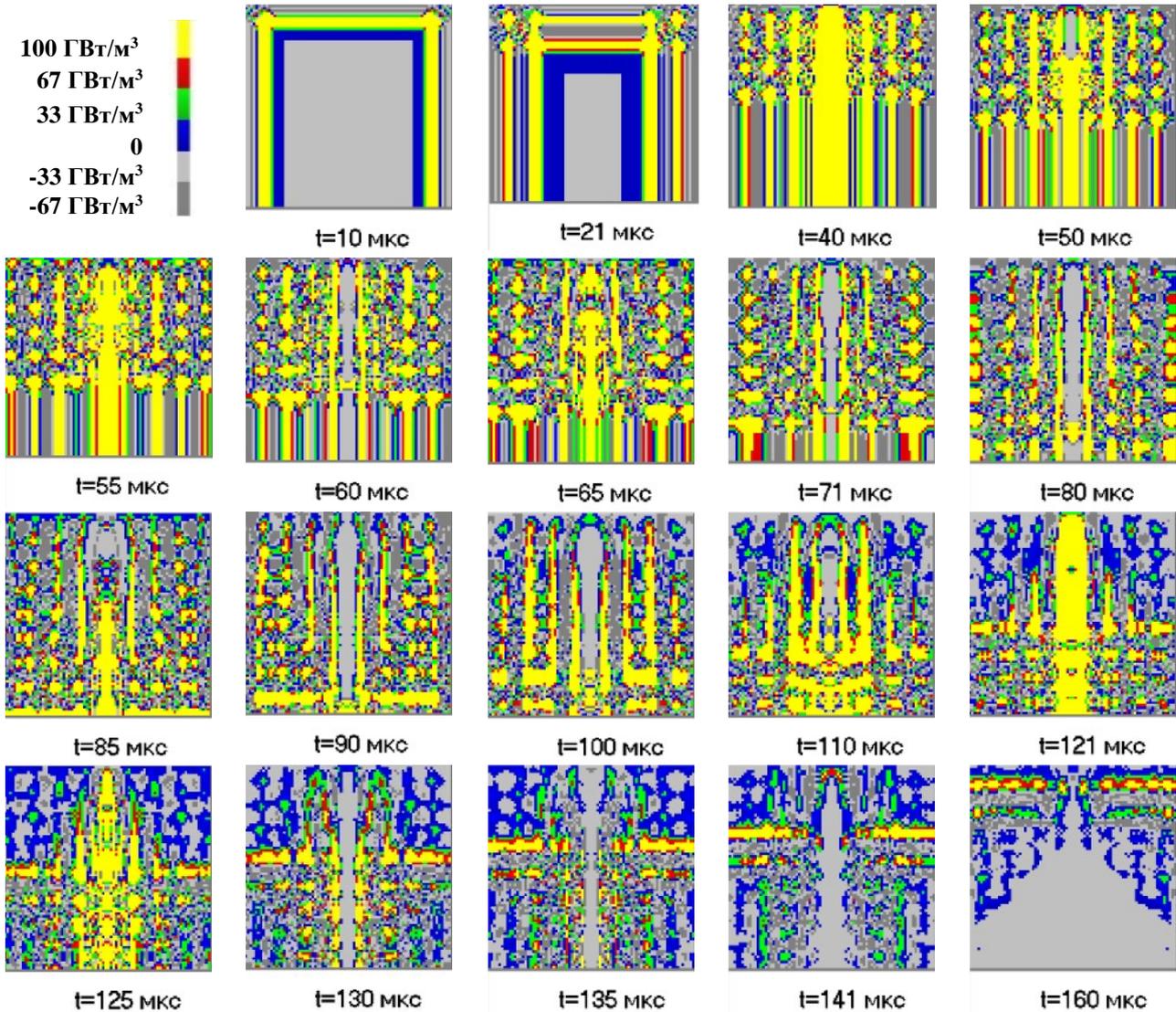


Рис. 8. Поле мощности изменения плотности внутренней энергии в расплаве в различные моменты времени комбинированного МИ- и ЭР-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс; $P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс).

В результате одновременного включения МИ- и ЭР-источников давления возникает суперпозиция их действия на расплав, пока не появляется в нем кавитация, которая, как нелинейная составляющая рассматриваемой задачи, суперпозицию их действия нарушает (рис. 7). Комбинированное МИ- и ЭР-воздействие на расплав существенно увеличивает неоднородность поля давления и его амплитуду, а также приводит к большей мощности изменения плотности внутренней энергии (рис. 8) по сравнению с действием одного из источников давления.

Изменение формы поверхности расплава AB (рис. 2) и ее перемещение (dz) существенно зависит от способа нагружения расплава (рис. 9–12). Под действием МИ-нагружения поверхность AB остается плоской. Ее перемещение достигает максимума через 520 мкс, а затем колеблется с малой амплитудой (приблизительно 10% от максимального перемещения поверхности AB) и периодом приблизительно 230 мкс под действием атмосферного давления P_0 (рис. 9). До прихода отраженной волны к поверхности расплава (до 168 мкс) перемещение

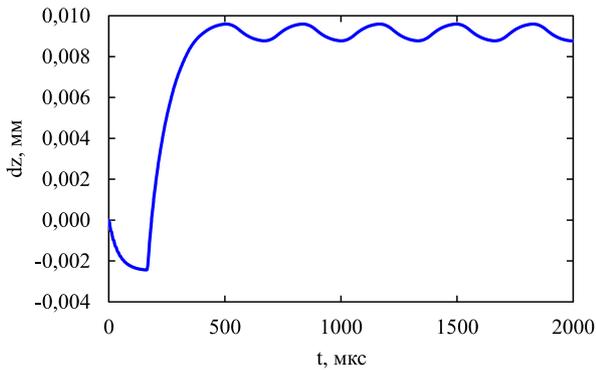


Рис. 9. Перемещение поверхности расплава в процессе МИ-нагрузки ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс).

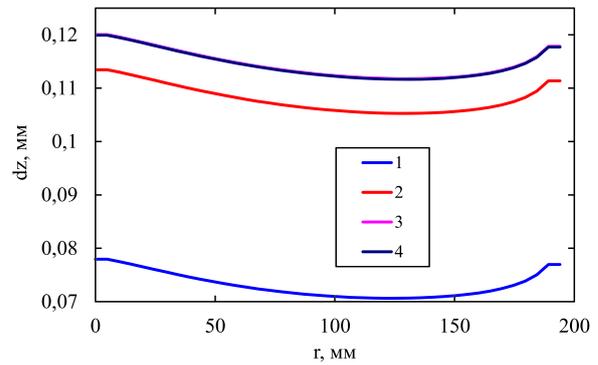


Рис. 10. Изменение формы поверхности расплава в процессе ЭР-нагрузки ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс). 1 – 500 мкс; 2 – 1000 мкс; 3 – 1500 мкс; 4 – 2000 мкс.

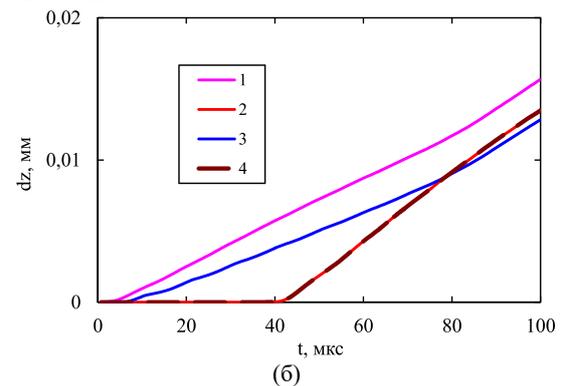
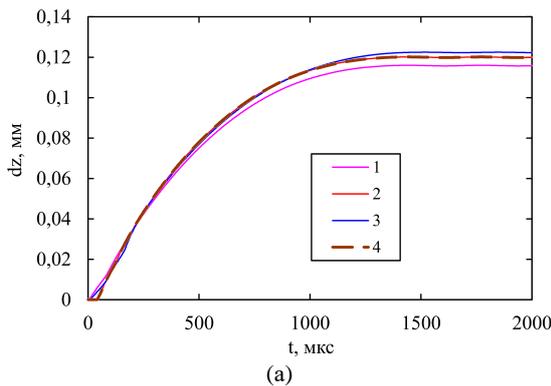


Рис. 11. Перемещение поверхности расплава в процессе ЭР-нагрузки ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс) и сравнение его с комбинированным нагружением: (а) – перемещение поверхности до максимума; (б) – начальный этап перемещения поверхности расплава. 1, 2 – ЭР-нагрузка; 3, 4 – комбинированное нагружение; 1, 3 – перемещение поверхности расплава возле цилиндрической стенки полости 1 (рис. 1); 2, 4 – перемещение поверхности расплава в центре полости 1 (рис. 1).

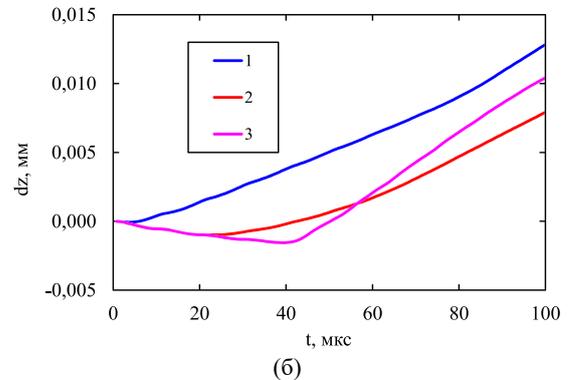
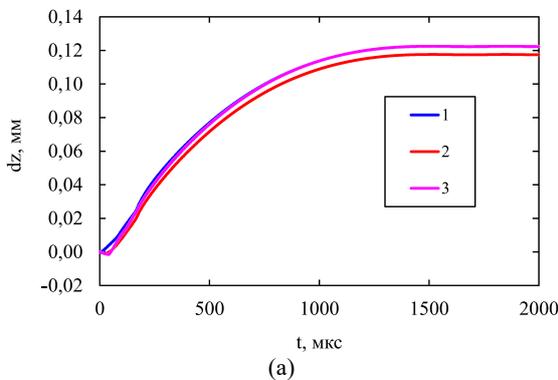


Рис. 12. Перемещение поверхности расплава в процессе комбинированного МИ- и ЭР-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс; $P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс): (а) – перемещение поверхности до максимума; (б) – начальный этап перемещения поверхности расплава. 1 – перемещение поверхности расплава возле цилиндрической стенки полости 1 (рис. 1); 2 – перемещение поверхности расплава на расстоянии $D/4$ от центра полости 1 (рис. 1); 3 – перемещение поверхности расплава в центре полости 1 (рис. 1).

dz отрицательное в результате сжатия расплава МИ-нагрузением.

ЭР- и комбинированное нагружения расплава искажают плоскую форму поверхности АВ в результате неравномерного давления на нее (рис. 10–12). Наибольшее перемещение АВ происходит в центре и возле цилиндрической поверхности полости 1 (рис. 1), а в остальной ее части перемещение меньше приблизительно до 10% (рис. 10). Наибольшее перемещение АВ (0,12 мм) достигается через 1300 мкс от начала ЭР-нагружения (рис. 11а). Вблизи оси полости 1 (рис. 1) поверхность АВ начинает перемещаться

через 41 мкс после прихода к ней волны давления от ЭР-источника (рис. 11б).

Перемещение АВ от комбинированного нагружения расплава мало отличается от его нагружения ЭР-источником (рис. 11 и 12), кроме начального этапа, когда под действием МИ-нагрузки поверхность АВ вблизи оси полости 1 (рис. 1) получает небольшие отрицательные перемещения от МИ-источника давления (рис. 12б).

Малое перемещение поверхности АВ расплава (рис. 9–12) при параметрах нагружения: $P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс;

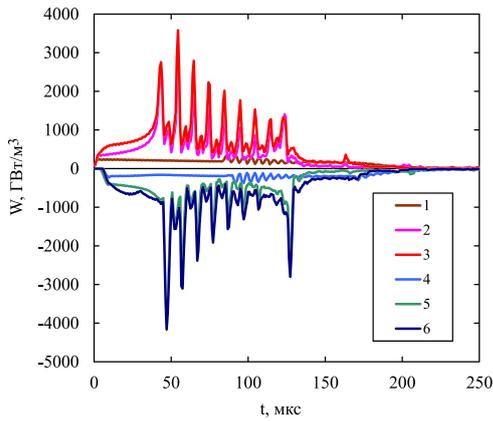


Рис. 13. Максимальная (1–3) и минимальная (4–6) мощности изменения плотности внутренней энергии расплава в процессе: 1, 4 – МИ-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс); 2, 5 – ЭР-нагружения ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс); 3, 6 – комбинированного МИ- и ЭР-нагружения.

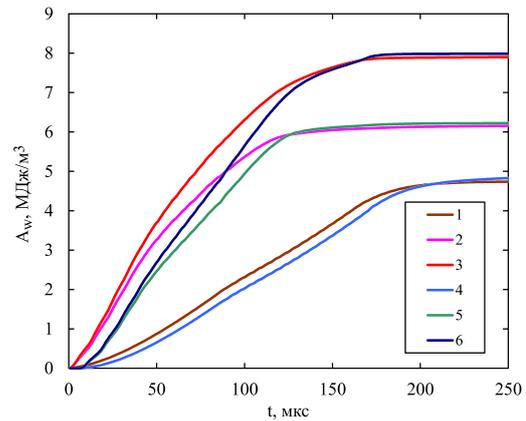


Рис. 14. Изменение средней плотности внутренней энергии в объеме расплава в процессе: 1, 4 – МИ-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс); 2, 5 – ЭР-нагружения ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс); 3, 6 – комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. 1–3 – A_w вычислена в элементарных объемах расплава с положительной мощностью W , а 4–6 – с отрицательной мощностью W (приведена с обратным знаком).

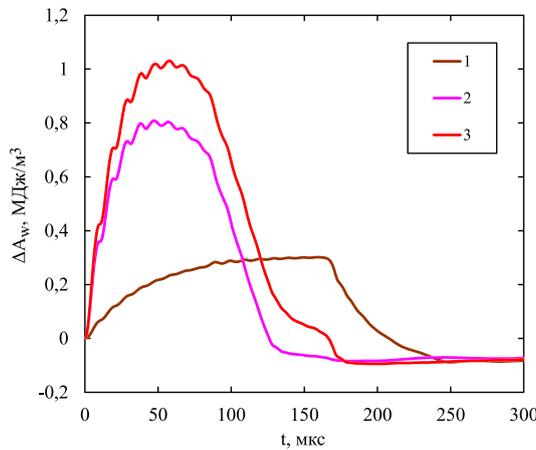


Рис. 15. Изменение средней плотности внутренней энергии в объеме расплава в процессе: 1 – МИ-нагружения ($P_{Mm} = 1$ МПа; $T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс); 2 – ЭР-нагружения ($P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс); 3 – комбинированного МИ- и ЭР-нагружения.

$P_{im} = 1$ МПа; $T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс не создает проблем для размещения индуктора б (рис. 1) на малом расстоянии от поверхности расплава АВ и не угрожает выбросу расплава из полости I (рис. 1) при рассмотренных способах его нагружения.

Эффективность воздействия на расплав импульсных источников давления определяется мощностью изменения плотности внутренней энергии в расплаве (W), которая зависит от скорости изменения давления в нем (12). Рассмотренные источники давления обеспечивают его пульсацию в расплаве, которая еще возрастает в результате дифракции и интерференции волн, что приводит к увеличению и уменьшению плотности внутренней энергии за счет изменения знака мощности (рис. 13). Средние по объему расплава увеличения (A_{wp}) и уменьшения (A_{wm}) плотности его внутренней энергии (A_w) (рис. 14) сравнимы по модулю, но отрицательная составляющая A_{wm} запаздывает по времени, поэтому средняя

плотность внутренней энергии (ΔA_w), определяемая как разность A_{wp} и модуля A_{wm} , вначале возрастает (рис. 15), достигая максимальных величин (ΔA_m). Амплитуды ΔA_m на порядок меньше, чем наибольшие величины (A_{mp}) возрастания плотности внутренней энергии (A_{wp}).

Величины A_{mp} и ΔA_m практически линейно увеличиваются под действием МИ-источника давления при повышении амплитуды P_{Mm} ($P_{im} = 0$) и под действием ЭР-источника давления при повышении амплитуды P_{im} ($P_{Mm} = 0$) независимо от остальных параметров этих источников (рис. 16–22), но увеличение A_{mp} и ΔA_m зависит от периода пульсации давления (T_M , T_i) и постоянной затухания пульсаций (τ_M , τ_i), возрастая пропорционально увеличению этих параметров.

Комбинированное нагружение расплава при условии, что параметры $\tau_M = \tau_i$ в 2 раза меньше, чем $T_M = T_i$, приводит к увеличению A_{mp} и ΔA_m практически пропорционально возрастанию P_{Mm} ($P_{im} = 0$), также как при МИ-нагружении, если

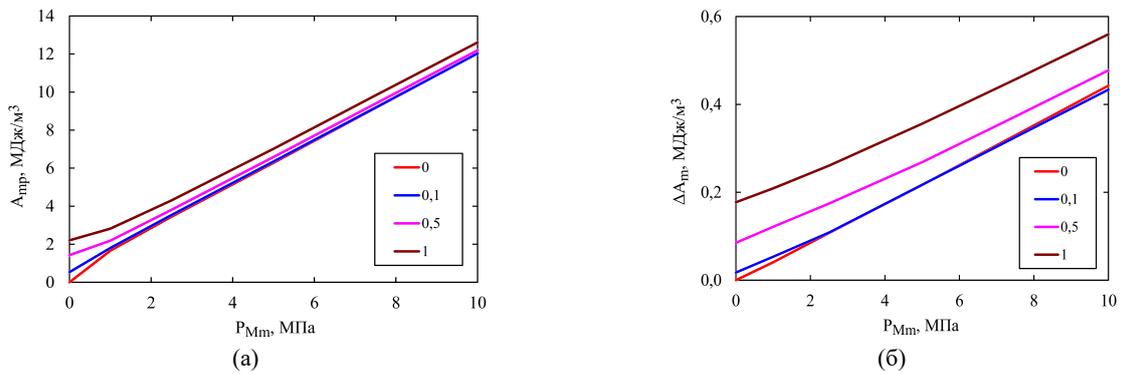


Рис. 16. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 10$ мкс; $\tau_M = 5$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 10$ мкс; $\tau_i = 5$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

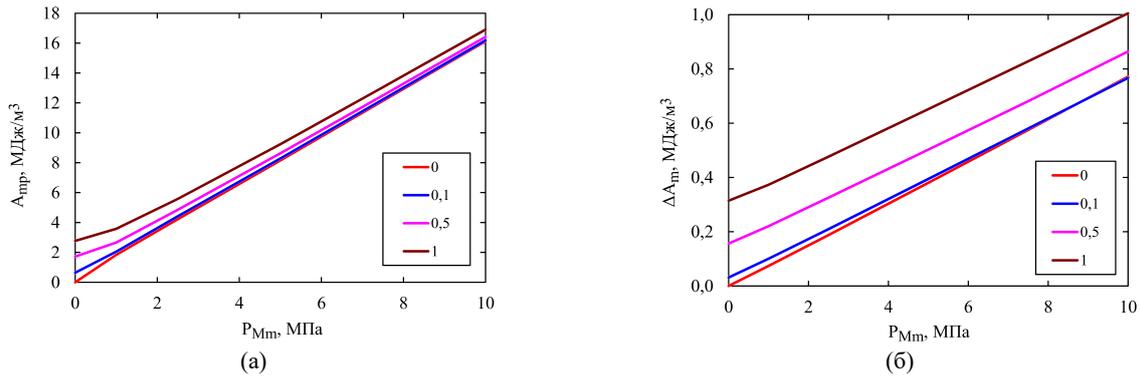


Рис. 17. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 10$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 10$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

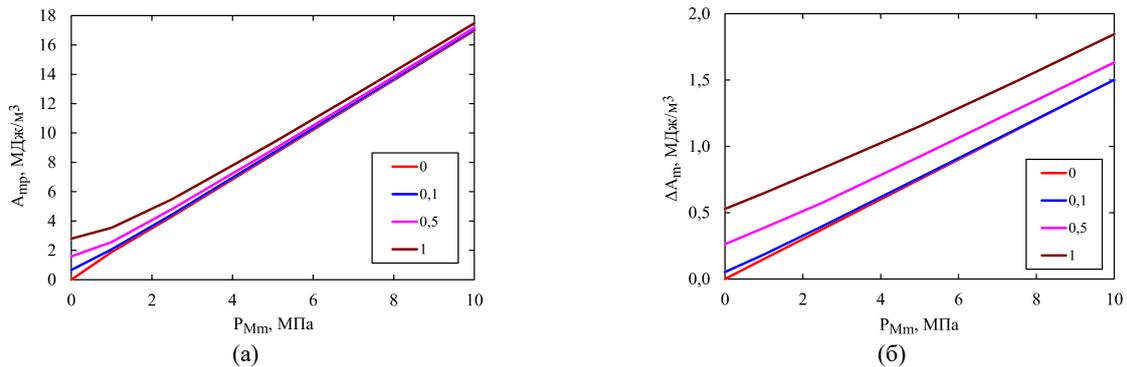


Рис. 18. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 40$ мкс; $\tau_M = 20$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 40$ мкс; $\tau_i = 20$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

$P_{Mm} > 2 \times P_{im}$ (рис. 16–18). Если $P_{Mm} < 2 \times P_{im}$, тогда P_{im} существенно влияет на A_{mp} , но в малой степени на ΔA_m . Величина ΔA_m возрастает практически пропорционально увеличению $T_M = T_i$, когда параметры $\tau_M = \tau_i = T_M/2$, а A_{mp} при этом увеличивается на порядок меньше.

Увеличение параметров τ_M и τ_i влияет на A_{mp} в еще большей степени, чем увеличение T_M и T_i . Когда параметры $T_M = T_i = \tau_M = \tau_i$, тогда A_{mp} увеличивается в 1,5 раза, а влияние ЭР-источника на повышение ΔA_m уменьшается с ростом P_{Mm} , но при этом величина ΔA_m возрастает приблизительно в 2 раза (рис. 19). В 2 раза увеличивается A_{mp} , когда параметры $\tau_M = \tau_i$ в 2 раза больше, чем $T_M = T_i = 40$ мкс (рис. 20), а влияние ЭР-источника на величину ΔA_m положительное, когда $P_{Mm} < 8 \times P_{im}$, иначе его

использование только уменьшает эффект от действия МИ-источника давления.

На величину A_{mp} влияют не столько параметры T_M и T_i , сколько соотношение между ними и параметрами τ_M и τ_i . Когда $T_M = T_i = 20$ мкс, а $\tau_M = \tau_i$ в 2 раза больше, тогда A_{mp} остается практически таким же (рис. 21), как при $T_M = T_i = 40$ мкс (рис. 20), но при этом существенно возрастает эффективность использования ЭР-источника на повышение ΔA_m (рис. 21б). Уменьшение периода пульсации давления от ЭР-источника в 2 раза по сравнению с МИ-источником практически не влияет на A_{mp} , но еще больше уменьшает интервал изменения P_{Mm} (до $P_{Mm} < 4 \times P_{im}$), когда применение ЭР-источника совместно с МИ-источником эффективно (рис. 22).

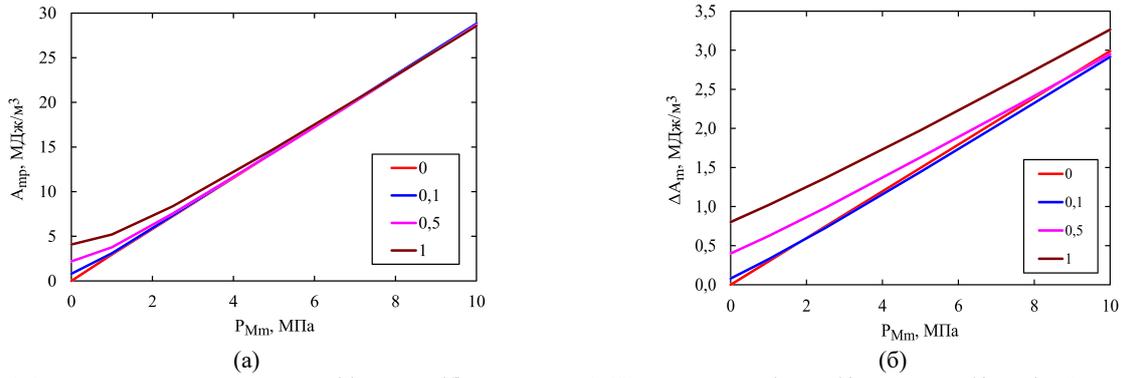


Рис. 19. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 40$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 40$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

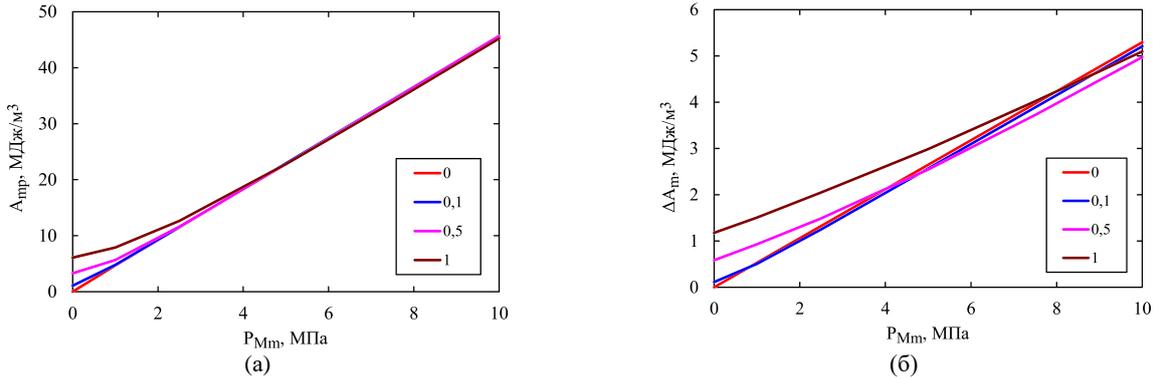


Рис. 20. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) процессе МИ-нагружения ($T_M = 40$ мкс; $\tau_M = 80$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 40$ мкс; $\tau_i = 80$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

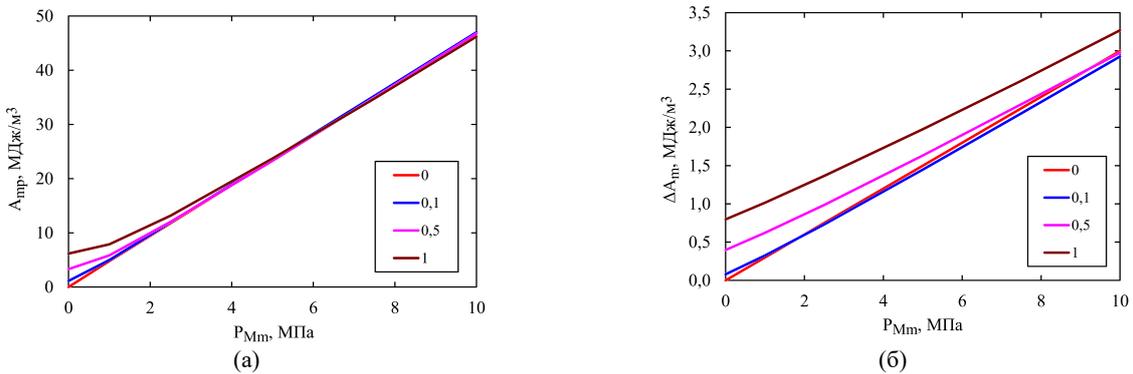


Рис. 21. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 20$ мкс; $\tau_M = 40$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

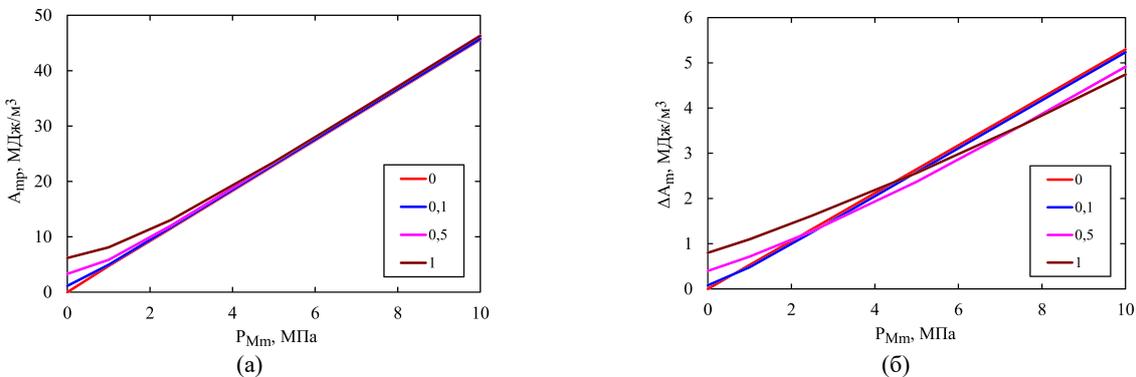


Рис. 22. Максимальное изменение A_{mp} (а) и ΔA_m (б) в процессе МИ-нагружения ($T_M = 40$ мкс; $\tau_M = 80$ мкс), ЭР-нагружения ($T_i = 20$ мкс; $\tau_i = 40$ мкс) и комбинированного МИ- и ЭР-нагружения. Линии на рисунке обозначены амплитудами P_{im} в МПа.

Причина этого явления заключается в том, что уменьшение периода пульсации давления, создаваемого ЭР-источником, по сравнению с генерируемым МИ-источником приводит к

уменьшению времени запаздывания появления отрицательной составляющей изменения плотности внутренней энергии в расплаве A_w . Величины положительной и отрицательной

составляющих A_W по модулю отличаются меньше, и поэтому их алгебраическая сумма ΔA_W и, как следствие, ΔA_m также уменьшается (рис. 14).

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

ВЫВОДЫ

Из проведенного исследования следует, что параметры источников нагружения алюминиевого расплава существенно влияют на возникающие в нем волновые процессы, приводящие не только к быстрому изменению в нем давления, но и к трансформации его фазового состояния в процессе кавитации, а также обеспечивают интенсивное энергетическое воздействие на него. Увеличение периодов пульсации давления МИ- и ЭР-источников благоприятно влияет на изменение плотности внутренней энергии расплава, как и увеличение постоянных затухания этих пульсаций. При комбинированном нагружении расплава МИ- и ЭР-источниками необходимо, чтобы амплитуда давления ЭР-источника не превышала амплитуду давления МИ-источника, тогда существенно увеличивается изменение плотности внутренней энергии расплава по сравнению с воздействием на него одного из рассмотренных импульсных источников.

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. 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>
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Бибииков, А.М., Халтурин, И.П., Зарембо, В.И., Управление структурообразованием и свойствами литых материалов слабым акустическим воздействием, *Литейное производство*, 2007, № 5, с. 12.
11. Коровин, В.И., Импульс давления в жидком проводнике цилиндрической формы, вызываемый импульсом тока, *Журнал технической физики*, 2005, т. 75, № 7, с. 1.
12. Каганов, М.И., Васильев, А.Н., Электромагнитно-акустическое преобразование – результат действия поверхностной силы, *Успехи физических наук*, 1993, т. 163, № 10, с. 67.
13. 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.
14. 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.
15. Гитис, М.Б., Михайлов, И.Г., Распространение звука в жидких металлах. Обзор, *Акустический журнал*, 1966, т. 12, № 2, с. 145.

16. Kosenkov V.M., Bychkov V.M., Influence of Some Axially Symmetric Stepped Forms of Discharge Chambers on the Efficiency of Electrohydraulic Forming, *Surf. Eng. Appl. Electrochem.*, 2019, vol. 55, no. 1, p. 89.

<https://doi.org/10.3103/S1068375519010113>

Summary

Based on mathematical modeling, the influence of the magnetic-pulse, the electric-discharge and the combined sources of the pulsed pressure on wave fields in aluminum melt was studied. An increase in the intensity

of the wave fields in the melt with an increase in the amplitude, the pulsation period and the attenuation time of pressure pulsations created by pulsed sources was observed. The occurrence of cavitation in the melt under the action of the considered sources of pressure pulses was determined. A significant influence of the parameters of pulsed pressure sources on the change in the density of the internal energy of the melt was noted.

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