

УДК 537.63, 537.84
DOI: 10.15372/PMTF202315406

РАСЧЕТ БЕЗУДАРНОГО СЖАТИЯ МЕТАЛЛОВ ДО 40 МБАР ПРИ МАГНИТНОЙ ИМПЛОЗИИ ЛАЙНЕРОВ

А. М. Буйко

Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Россия
E-mail: a.m.buyko@vniief.ru

Представлены результаты расчетов имплозии лайнеров без образования ударных волн под действием тока до 70 МА и индукции магнитного поля до 20 МГс (магнитного давления до 16 Мбар) в устройствах с дисковым взрывомагнитным генератором. Показано, что при глубокой имплозии двухслойных (Cu–W)- и (Cu–Ta)-лайнеров безударное давление в вольфраме и тантале может достигать 40 Мбар (гидродинамическая кумуляция). Внутренняя часть лайнера, масса которой составляет более 32 % его общей массы, может оставаться в твердотельном динамически упрочненном состоянии при температуре в его медном скин-слое до 38 эВ.

Ключевые слова: дисковый взрывомагнитный генератор, магнитная имплозия цилиндрических лайнеров, безударное сжатие металлов, одномерные магнитогидродинамические расчеты

Введение. При имплозии цилиндрических лайнеров под действием тока $16 \div 70$ МА и азимутальной индукции магнитного поля $10 \div 20$ МГс (магнитного давления $P_B = 10 \div 16$ Мбар) ударные волны могут не возникать, а безударное давление P в лайнерах может составлять $10 \div 40$ Мбар [1–5]. Используются однослойные лайнеры (Al, Cu), а также двухслойные лайнеры, к внутреннему слою которых — исследуемому образцу металла (Cu, Fe, Ta, W) — снаружи прилегает слой (Al, Cu) с током $I(t)$.

В процессе имплозии (рис. 1,а) на внешнюю поверхность радиусом $R_{out}(t)$ лайнера действует индукция магнитного поля $B_{out}(t)$, его диффузия приводит к образованию в скин-слое индукции магнитного поля $B(r, t)$ и магнитного давления $P_B(r, t)$:

$$B_{out}(t) = I(t)/(5R_{out}(t)); \quad (1)$$

$$P_B(r, t) = B^2(r, t)/(8\pi).$$

Во внутренней зоне лайнера могут формироваться безударные давления $P(r, t)$ в результате действия объемных сил, пропорциональных плотности тока $j(r, t)$ и магнитной индукции $\mathbf{B}(r, t)$. При глубокой имплозии лайнера давление $P(r, t)$ может превышать магнитное давление $P_B(r, t)$ (гидродинамическая кумуляция) (см. рис. 1,б).

В экспериментах [1] на Z-машине Сандийской национальной лаборатории (США) использовались Al-, (Al–Cu)- и (Al–Ta)-лайнеры. (Al–Cu)-лайнер имел следующие параметры: внешний и внутренний радиусы $R_l = 3,43$ мм и $R_{in0} = 1,9$ мм, толщина $\Delta_{Al+Cu} = 1,00 + 0,53$ мм. Под действием тока $I(t)$, увеличивающегося до 16 МА в течение

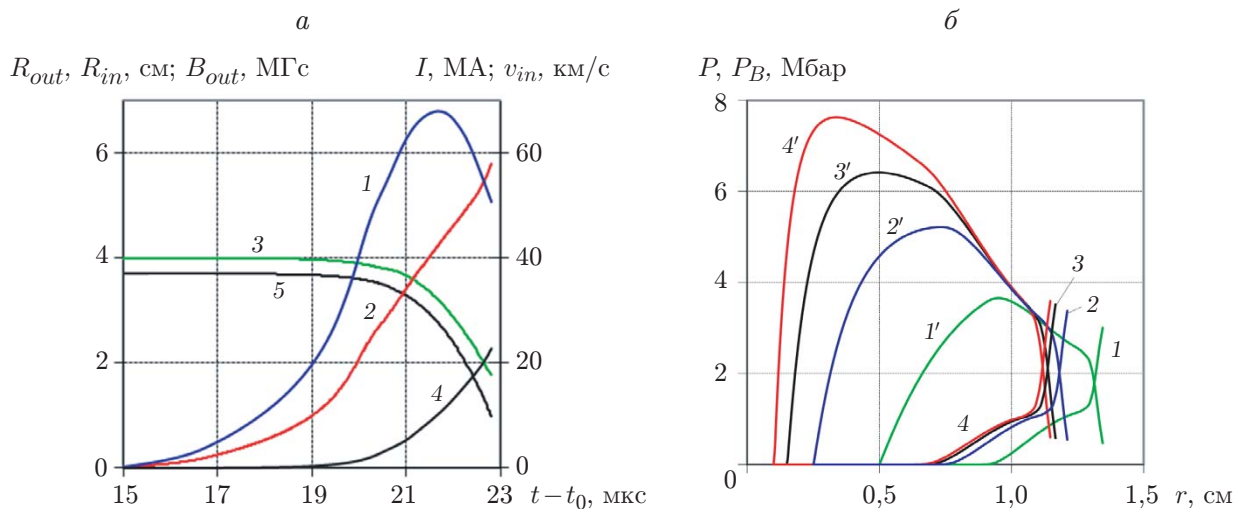


Рис. 1. Результаты одномерных магнитогидродинамических (МГД) расчетов имплозии Al-лайнера в устройстве ALT-3:

a — сила тока $I(t)$ в лайнере (1) и индукция магнитного поля $B_{out}(t)$ (2) на его внешней поверхности радиусом $R_{out}(t)$ (3), а также скорость $v_{in}(t)$ (4) внутренней поверхности радиусом $R_{in}(t)$ (5); *б* — профили магнитного P_B (1–4) и гидродинамического P (1'–4') давлений в лайнере радиусом $R_l = 30$ мм и массой 20 г/см при различных значениях R_{in} (1, 1' — $R_{in} = 5$ мм, 2, 2' — $R_{in} = 2,5$ мм, 3, 3' — $R_{in} = 1,5$ мм, 4, 4' — $R_{in} = 1$ мм)

0,6 мкс (индукция магнитного поля B увеличивается до 16 МГс, магнитное давление P_B — до 10 Мбар), в конце процесса имплозии безударное давление в алюминии, меди и тантале достигало 10 Мбар. Фотонно-доплеровская велосиметрия (PDV) позволила точно определить скорость $v_{in}(t)$ внутренней поверхности $R_{in}(t)$ лайнеров в диапазоне $v_{in} = 0 \div 20$ км/с. С использованием полученных данных была апробирована новая методика определения уравнений состояния (УРС) металлов, которая позволяет получить непрерывную зависимость изоэнтропического давления от плотности $P(\rho)$ с погрешностью 5,7 % по давлению и 1,8 % по плотности. Равенство достигаемых гидродинамического и магнитного давлений обусловлено неглубокой имплозией лайнеров ($R_{in0}/R_{PDV} = 5,4$, $R_{PDV} = 0,35$ мм — приемный радиус).

В работах [2–5] рассчитывалась имплозия (Al–Cu)-, (Al–W)-, Cu- и (Cu–W)-лайнера в устройствах с дисковым взрывомагнитным генератором (ДВМГ), в которых электро-взрывные фольговые размыкатели тока (ФРТ) формировали в лайнерах ток $I(t)$ за эффективное время 1 ÷ 2 мкс. Расчеты [3] проводились по коду [6], а расчеты [2, 4, 5] аналогов устройств ALT-3 [7] и ALT-1,2 [8] — по коду 1D(МГД)_n [9, 10]. Как показала практика, расчеты устройств с ДВМГ по этим кодам, например расчеты [4, 7] устройств ALT-1,2 по коду 1D(МГД)_n, могут давать результаты, близкие к экспериментальным. Основным отличием устройств ALT-1,2 от ALT-3 является использование 10-модульного ДВМГ и Al-лайнера толщиной 2 мм, разгоняемого до скорости 12 км/с током до 32 МА ($B \approx 2,5$ МГс, $P_B \approx 0,25$ Мбар). Согласно результатам расчетов [4] устройства ALT-3 при имплозии в нем (Cu–W)-лайнера с параметрами $R_l = 20$ мм, $\Delta_{Cu+W} = 1,75 + 0,25$ мм, $R_{PDV} = 1,0 \div 0,7$ мм ($R_{in0}/R_{PDV} = 18 \div 26$) под действием тока до 55 МА ($B \approx 10$ МГс, $P_B \approx 4$ Мбар) давление в вольфраме может достигать 16 ÷ 20 Мбар при $R_{PDV} = 1,0 \div 0,7$ мм.

В данной работе приводятся результаты уточненных по сравнению с [4, 5] расчетов устройства ALT-3 и его аналога ALT-3 с 25-модульным ДВМГ и (Cu–W)-, (Cu–Ta)-, Cu-лайнерами с параметрами [4, 5]:

$$\begin{aligned} R_l &= 20 \text{ мм}, & \Delta_{\text{Cu+W}} &= \Delta_{\text{Cu+Ta}} = 1,75 + 0,25 \text{ мм}, \\ \Delta_{\text{Cu}} &= 2,25 \text{ мм}, & R_{\text{PDV}} &= 0,70 \div 0,35 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2)$$

В расчетах имплозии лайнеров учитываются упругопластическое деформирование, перенос излучения и электронная теплопроводность; исследуемые металлы описываются УРС Ми — Грюнайзена и, для сравнения, УРС с учетом ионизации [11].

Согласно приводимым ниже результатам расчетов устройства ALT-3 и имплозии в нем (Cu–W)-лайнера с параметрами (2) давление в вольфраме достигает $17 \div 25$ Мбар. Расчеты аналога устройства ALT-3 с 25-модульным ДВМГ и (Cu–W)-лайнера с параметрами (2) дают при наиболее глубокой имплозии значение безударного давления $P = 44$ Мбар в слое W при скорости лайнера 37 км/с. При этом температура в скин-слое равна 38 эВ, что определяется переносом излучения. Однако слой W и прилегающая к нему часть слоя Cu, масса которых составляет 32 % общей массы лайнера, остаются твердотельными динамически упрочненными.

Использование указанных выше результатов позволит решить одну из проблем глубокой имплозии лайнера — удерживание на приемлемом уровне развития его неустойчивостей. Существуют также другие проблемы, в том числе обеспечение продольной и угловой симметрии лайнера. Для поиска решений этих проблем необходимо проведение двумерных МГД-расчетов требуемой глубокой имплозии лайнера с учетом его неустойчивостей и взаимодействия с торцевой стенкой (например, подбор формы и материала стенки, аналогично тому как это сделано для лайнера ALT-3 [6]). Необходимы также высокоточное изготовление лайнера и торцевых стенок и разработка PDV-оборудования для аналогичных [1] прецизионных PDV-измерений более высоких (до 40 км/с) скоростей лайнера. В экспериментах целесообразно использовать аналогичные [3] более технологичные ДВМГ с плоскими зарядами взрывчатого вещества (ВВ).

1. Результаты расчетов устройств ALT-1, -2, -3. Используемый код 1D(МГД) $_n$ [4, 9, 10, 12] разработан на базе программы [13] для решения одномерных задач гидродинамики с учетом упругопластического деформирования и предназначен для совместного решения произвольного количества n одномерных МГД-задач, моделирующих токонесящие узлы устройств и связанных между собой граничными условиями (1) для магнитной диффузии. В этих задачах могут учитываться упругопластическое деформирование, перенос излучения, электронная теплопроводность и использоваться системы УРС, описывающие поведение лайнера в широком диапазоне состояний от твердотельного до состояния испарения для меди [14] и от твердотельного до плазменного состояния для алюминия и меди [15, 16]. Для устройства ALT-3 (рис. 2) $n = 13$ [4]. Пять одномерных МГД-задач моделируют стенки полостей ДВМГ и токопроводы от них до Cu-фольги, а также цепь ДВМГ — фольговый размыкатель тока (ФРТ) с током $I_g(t)$. При этом учитывается двумерное воздействие ВВ на стенки полостей ДВМГ, сжимающие магнитный поток. Восемь задач моделируют лайнерную нагрузку от Cu-фольги ФРТ до Al-лайнера с индуктивностью $L(t)$ и цепь ФРТ — лайнер с током $I(t)$.

Токи $I_g(t)$ и $I(t)$ находятся из уравнений баланса магнитного потока в цепях ДВМГ — ФРТ и ФРТ — лайнер. Такое уравнение баланса для тока $I(t)$ имеет вид

$$\frac{d(L(t)I(t))}{dt} = U_f(t) - U_-(t), \quad t > t_{0l}, \quad I(t_{0l}) = 0. \quad (3)$$

Здесь $U_f(t)$ — напряжение на Cu-фольге; $U_-(t)$ — суммарная скорость потерь магнитного потока в стенки коаксиально-радиальной ПЛ $U_u(t)$ и в лайнер $U_l(t)$. Параметры

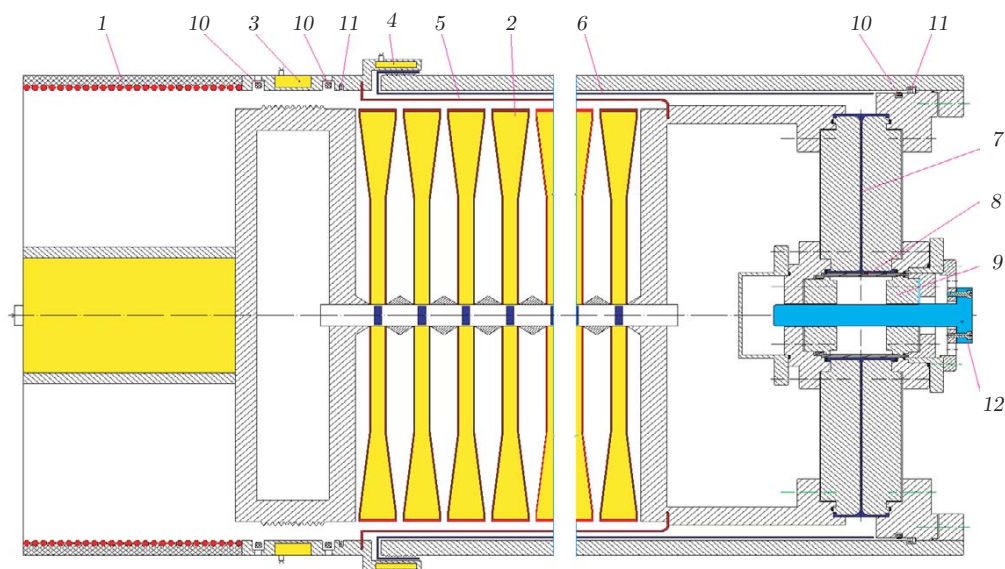


Рис. 2. Схема устройства ALT-3 [7]:

1 — спиральный взрывомагнитный генератор, 2 — 15-модульный ДВМГ ($I_0 = 7$ МА, $t = t_0$), 3, 4 — взрывные замыкатели тока, 5 — Si-фольга толщиной $\Delta_f = 0,12 \div 0,15$ мм и высотой $H_f = 92$ см; 6, 7 — передающая линия (ПЛ) от Si-фольги до лайнера с индуктивностью $L_{ol} = 6$ нГн ($t = t_{ol}$); 8 — цилиндрический Al-лайнер ($R_l = 40$ мм, $\Delta_l = 3$ мм), 9 — торцевые стенки; 10, 11 — датчики для измерений тока; 12 — измерительный блок радиусом $R_{imp} = 10$ мм для проведения PDV-измерений в образцах металлов

уравнения (3) вычисляются по результатам соответствующих одномерных МГД-расчетов: $U_i(t)$ — по напряженностям электрического поля $E_i(t)$, возникающим при магнитной диффузии на поверхностях фольги, ПЛ и лайнера; $L(t)$ — по смещениям указанных поверхностей (с учетом начального значения $L(t_{ol}) = L_{ol}$).

В расчетах [4] устройств ALT-1, -2, -3 были уточнены потери магнитного потока в токонесущих узлах лайнерных нагрузок (добавлено два одномерных МГД-расчета и на порядок (до 1 мкм) улучшено разрешение расчетных сеток. Результаты уточненных и проведенных ранее расчетов устройств ALT-1, -2 практически совпадают. Аналогичные расчеты устройства ALT-3 различаются: в уточненном расчете потери магнитного потока в нагрузке значительно больше (рис. 3), а ток в лайнере на 2,2 % меньше, что важно при проведении высокоточных исследований, аналогичных проведенным в [1].

2. Результаты уточненных расчетов аналогов устройства ALT-3 и имплозии в них лайнеров. В отличие от [4] в данной работе рассматриваются устройства с 15-модульным ДВМГ (см. рис. 2) и с 25-модульным ДВМГ ($I_0 = 7$; 6 МА, $H_f = 150$ см, $L_{ol} = 7$ нГн) с (Cu-W)-, (Cu-Ta)- и Cu-лайнерами с параметрами (2). Увеличение числа модулей ДВМГ с 15 до 25 приводит к наиболее существенному увеличению основных характеристик устройств и имплозии в них (Cu-W)-лайнера (ср. результаты расчетов 1W и 2W на рис. 4–6 и в таблице). Ток и индукция магнитного поля в лайнере увеличиваются с 56 до 68 МА и с 13 до 19 МГс соответственно (магнитное давление — с 6 до 14 Мбар). В конце имплозии ($R_{PDV} = 0,35$ мм) температура в скин-слое увеличивается с 30 до 38 эВ, давление P_{out} на внешнюю поверхность W-слоя радиусом R_{out} — с 21 до 38 Мбар, скорость v_{in} его внутренней поверхности радиусом R_{in} — с 31 до 37 км/с, давление в вольфраме — с 25 до 44 Мбар. Следует отметить, что величины P_{out} и v_{in} с уменьшением радиусов поверхностей R_{out} и R_{in} W-слоя (см. рис. 6) растут на послед-

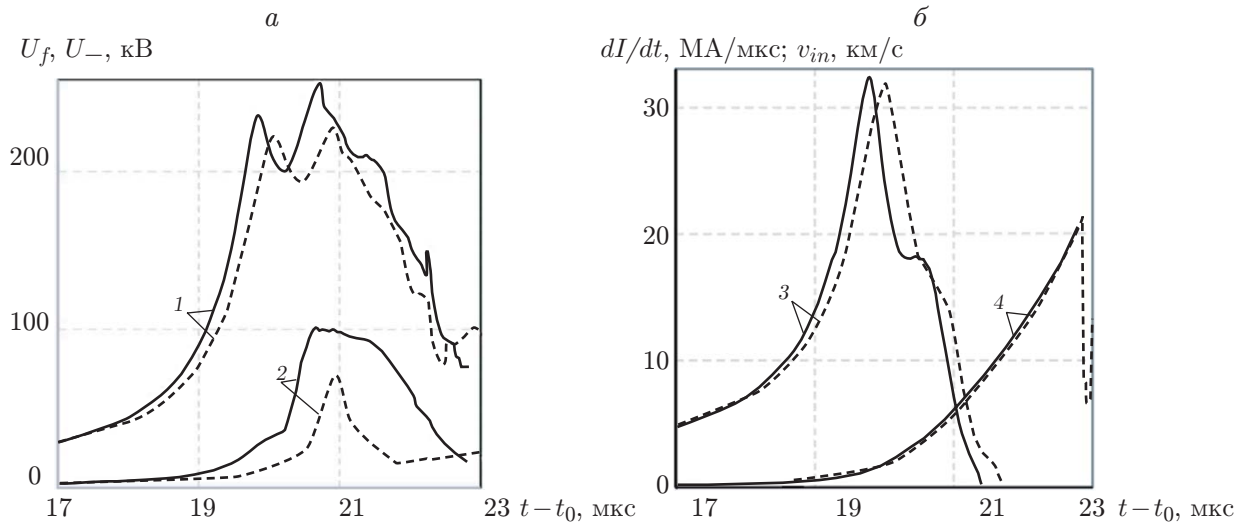


Рис. 3. Результаты уточненного (сплошные линии) и проведенного ранее (штриховые линии) расчетов устройства ALT-3:

a — напряжение на ФРТ $U_f(t)$ (1) и суммарная скорость потерь магнитного потока в нагрузке $U_-(t)$ (2); *б* — производная тока $dI/dt(t)$ в лайнере (3) и скорость внутренней границы $v_{in}(t)$ лайнера (4)

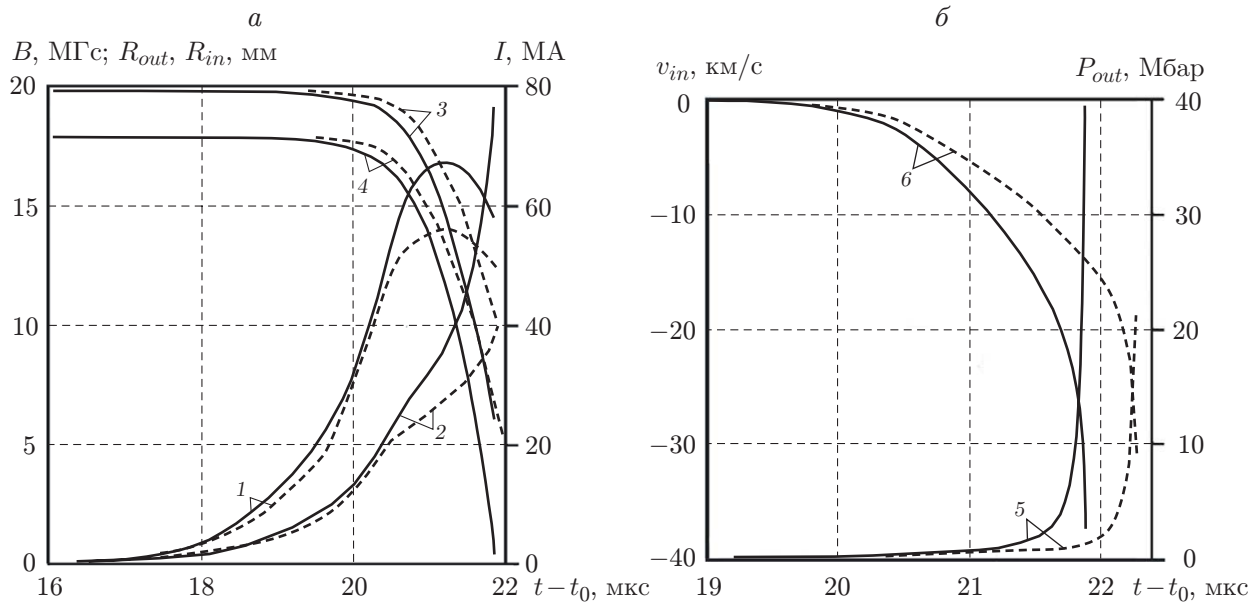


Рис. 4. Характеристики имплозии (Cu-W)-лайнера в расчетах 1W (сплошные линии) и 2W (штриховые линии):

a — ток $I(t)$ в Cu-слое (1) и индукция магнитного поля $B(t)$ (2) на его внешней поверхности радиусом $R_{out}(t)$ (3), а также радиус внутренней поверхности W-слоя $R_{in}(t)$ (4); *б* — давление $P_{out}(t)$ на внешней поверхности W-слоя (5) и скорость $v_{in}(t)$ внутренней поверхности этого слоя (6)

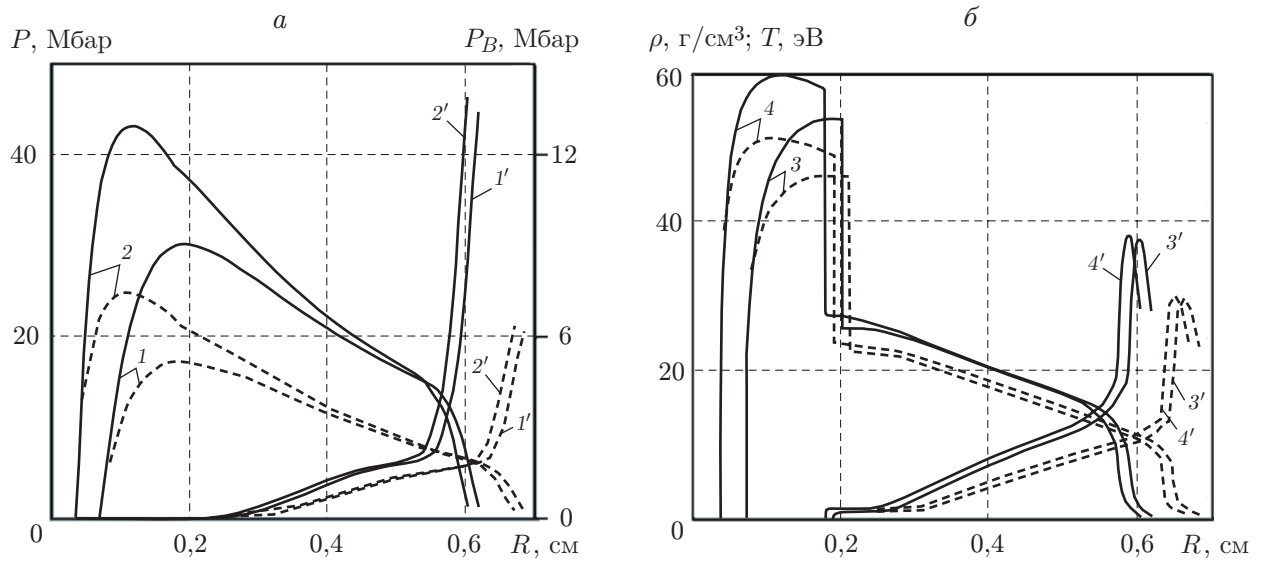


Рис. 5. МГД-характеристики (Cu-W)-лайнера в конце имплозии, полученные в расчетах 1W (штриховые линии) и 2W (сплошные линии):

a — гидродинамическое $P(R)$ (1, 2) и магнитное $P_B(R)$ (1', 2') давления; b — плотность $\rho(R)$ (3, 4) и температура $T(R)$ (3', 4'); 1, 1', 3, 3' — $R_{PDV} = 0,7$ мм, 2, 2', 4, 4' — $R_{PDV} = 0,35$ мм

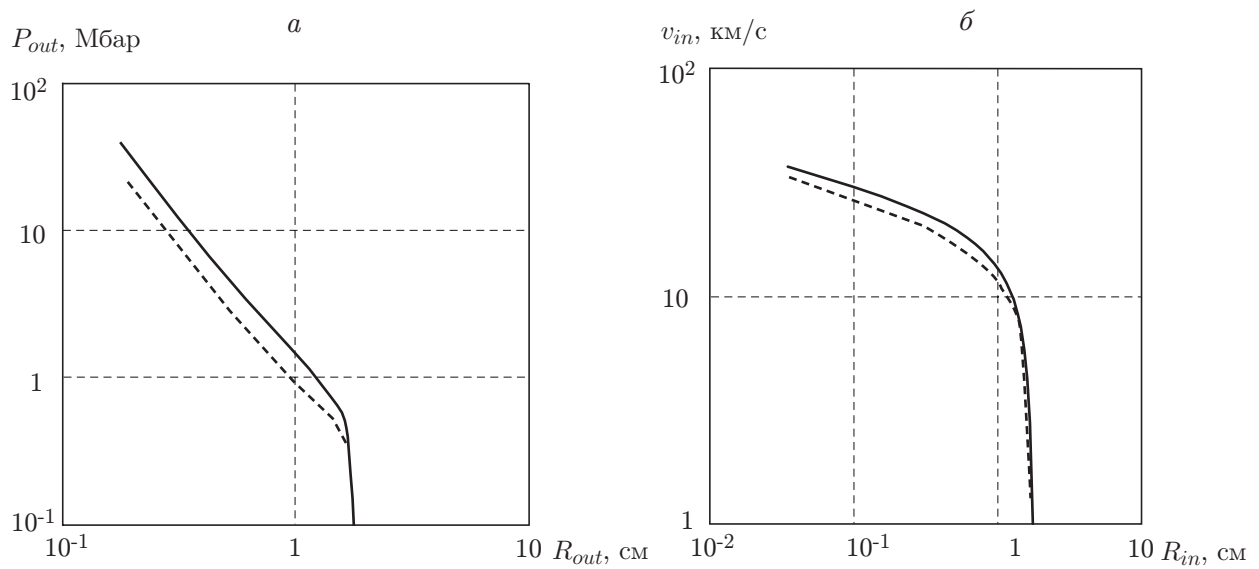


Рис. 6. Зависимости $P_{out}(R_{out})$ (a) и $v_{in}(R_{in})$ (б) для W-слоя (Cu-W)-лайнера, полученные в расчетах 1W (штриховые линии) и 2W (сплошные линии)

Результаты расчетов устройства ALT-3 с (Cu–W)-лайнером (1W) и аналога устройства ALT-3 с 25-модульным ДВМГ и (Cu–W)-, (Cu–Ta)-, Cu-лайнерами с параметрами (2) (2W, 3W, 3Ta, 3Cu)

| Номер расчета | I_0 , МА | I_g , МА | U_f , кВ | I , МА | m_s/m , % | v_{in} , км/с | P_{out} , Мбар | P , Мбар | $-\Delta P/P$, % |
|---------------|------------|------------|------------|----------|-------------|-----------------|------------------|-------------|-------------------|
| 1W | 7 | 75 | 351 | 55,6 | 38 | 31 | 21 | 17,2 ÷ 24,8 | 2,5 ÷ 6,5 |
| 2W | 7 | 88 | 513 | 67,6 | 32 | 37 | 38 | 30,5 ÷ 43,6 | 2,0 ÷ 8,5 |
| 3W | 6 | 84 | 504 | 66,2 | 32 | 36 | 34 | 26,6 ÷ 38,4 | 2,3 ÷ 8,3 |
| 3Ta | 6 | 84 | 505 | 66,0 | 31 | 35 | 35 | 26,4 ÷ 37,0 | 0 ÷ 3,8 |
| 3Cu | 6 | 84 | 505 | 66,1 | 32 | 41 | 20 | 17,5 ÷ 24,9 | 3,4 ÷ 15,0 |

Примечание. I_0 , I_g — начальный и максимальный токи в ДВМГ; U_f , I — максимальные значения напряжения на ФРТ и тока в лайнере; m_s/m , v_{in} , P_{out} — доля массы лайнера в твердом состоянии, максимальная скорость исследуемого слоя и давление на него при $R_{PDV} = 0,35$ мм; P , $\Delta P/P$ — максимальное давление в исследуемом металле при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм в расчетах с использованием УРС Ми — Грюнайзена и величина его уменьшения в расчетах с использованием УРС [11].

ней стадии имплозии по законам $P_{out} \sim (R_{out})^{-2,2}$ и $v_{in} \sim (R_{in})^{-0,2}$ (гидродинамическая кумуляция). Однако при этом максимальное напряжение на ФРТ увеличивается с 351 до 513 кВ, доля массы твердотельной динамически упрочненной внутренней области лайнера уменьшается с 38 до 32 % массы лайнера.

Уменьшение начального тока ДВМГ с 7 до 6 МА (расчеты 2W и 3W в таблице) приводит к существенному уменьшению основных характеристик устройства и достигаемых при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм давлений в W-слое лайнера до 26,6 ÷ 38,4 Мбар (на 13–12 %). При замене в этом устройстве (Cu–W)-лайнера на (Cu–Ta)- или Cu-лайнер (расчеты 3Ta и 3Cu в таблице) основные характеристики устройства не меняются, но давление, достигаемое в исследуемых металлах, уменьшается: в тантале — до 26,4 ÷ 37,0 Мбар (на 1–4 %), в меди — до 17,5 ÷ 24,9 Мбар (на 34–35 %) при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм.

Замена УРС Ми — Грюнайзена исследуемых металлов на их УРС с учетом ионизации [11] приводит к уменьшению в расчетах (см. таблицу) давления в этих металлах при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм: в вольфраме — на 2,5–6,5; 2,0–8,5; 2,3–8,3 % (расчеты 1W, 2W, 3W); в тантале — на 0–3,8 % (расчет 3Ta), в меди — на 3,4–15,0 % (расчет 3Cu). Эти результаты указывают на важность выбора УРС металлов при проведении высокоточных исследований, аналогичных выполненным в [1].

Закключение. В работе приводятся результаты расчетов аналогов взрывоманнитного лайнерного устройства ALT-3, близких к условиям экспериментов с ALT-1, -2. Представлены результаты расчетов устройств с 15- и 25-модульными ДВМГ и имплозии в них (Cu–W)-, (Cu–Ta)- и Cu-лайнеров.

В устройствах с 15- и 25-модульными ДВМГ при наиболее глубокой имплозии в них (Cu–W)-лайнера ($R_l = 20$ мм, $\Delta_{Cu+W} = 1,75 + 0,25$ мм, $R_{PDV} = 0,35$ мм) под действием токов 56 ÷ 68 МА и индукции магнитных полей 13 ÷ 19 МГс (магнитных давлений 6 ÷ 14 Мбар) при температуре в скин-слое 30 ÷ 38 эВ безударное давление в W-слое может достигать 25 ÷ 44 Мбар, скорость его внутренней поверхности — 31 ÷ 37 км/с, доля массы лайнера в его внутренней области, остающейся твердотельной и динамически упрочненной, — 38–32 %.

Уменьшение начального тока 25-модульного ДВМГ с 7 до 6 МА приводит к понижению давления в W-слое лайнера при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм на 13–12 %; замена W-слоя на Ta- и Cu-слои близкой массы вызывает уменьшение давления: в тантале — на 1–4 %, в меди — на 34–35 %.

в меди — на 34–35 %; замена УРС Ми — Грюнайзена на УРС для этих металлов приводит к уменьшению давления: в вольфраме — на 2–8 %, в тантале — на 0–4 %, в меди — на 3–15 % при $R_{PDV} = 0,70 \div 0,35$ мм.

Полученные результаты могут быть использованы при проведении экспериментов с ДВМГ по безударному сжатию металлов до давления 40 Мбар при имплозии лайнеров.

Автор выражает благодарность И. В. Морозовой за проведение расчетов и С. Ф. Гаранину, Г. Г. Ивановой, С. Д. Кузнецову за полезные обсуждения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lemke R. W., Dolan D. H., Dalton D. G., et al.** Probing off-Hugoniot states in Ta, Cu, and Al to 1000 GPa compression with magnetically driven liner implosions // *J. Appl. Phys.* 2016. V. 119. 015904.
2. **Буйко А. М.** Некоторые возможности магнитной имплозии высокоскоростных конденсированных лайнеров в устройстве ALT-3 // Тр. Междунар. конф. “19-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров (Россия), 17–21 апр. 2017 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2017. С. 143–152.
3. **Базанов А. А., Баранов В. К., Буйко А. М. и др.** Возможности взрывомагнитных генераторов для прецизионных исследований уравнений состояния при изэнтропическом сжатии // Тр. Междунар. конф. “20-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров (Россия), 17–20 апр. 2018 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2018. С. 158–161.
4. **Buyko A. M., Ivanova G. G., Morozova I. V.** Simulations of ALT-like explosive magnetic devices for ramp compression of materials by magnetically imploded liners // *Matter Radiat. Extremes*. 2020. V. 5. 047402. DOI: 10.1063/1.5140621.
5. **Буйко А. М.** Возможности безударного сжатия металлов до 40 Мбар при имплозии лайнеров от дисковых взрывомагнитных генераторов // Забабахинские науч. чтения: Сб. материалов 15-й Междунар. конф., Снежинск (Россия), 27 сент. — 1 окт. 2021 г. Снежинск: Всерос. науч.-исслед. ин-т техн. физики, 2021. С. 112–113.
6. **Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И., Якубов В. Б.** Методика численного моделирования дисковых взрывомагнитных генераторов с электровзрывным обострителем тока и лайнерной нагрузкой // *Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов*. 1995. Вып. 4. С. 12–17.
7. **Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Глыбин А. М. и др.** Уточнение параметров устройства для разгона лайнера до 20 км/с // *ПМТФ*. 2015. Т. 56, № 1. С. 116–124.
8. **Buyko A. M., Gorbachev Yu. N., Zmushko V. V. et al.** Simulation of Atlas parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // *Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics*, Moscow — St. Petersburg (Russia), July 7–14, 2002. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 747–751.
9. **Buyko A. M.** Disc explosive magnetic generator and quasi-spherical liner simulations with a 1D code // *Proc. of the Intern. conf. megagauss magnetic field generation related topics*, Santa Fe (USA), Nov. 5–10, 2006. S. l.: IEEE, Inc., 2007. P. 287–292.
10. **Буйко А. М.** Электровзрывные размыкатели сильноточных взрывомагнитных генераторов // *ПМТФ*. 2015. Т. 56, № 1. С. 137–149.
11. **Гордеев Д. Г., Гударенко Л. Ф., Каякин А. А., Куделькин В. Г.** Модель уравнения состояния металлов с эффективным учетом ионизации. Уравнения состояния Ta, W, Al, Be // *Физика горения и взрыва*. 2013. Т. 49, № 1. С. 106–120.

12. **Buiko A. M., Ivanova G. G., Morozova I. V., et al.** On feasibility to use electrically exploded opening switch on capacitor bank ATLAS // Proc. of the 9th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Moscow — St. Petersburg (Russia), July 7–14, 2002. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 414–419.
13. **Гаврилов Н. Ф., Иванова Г. Г., Селин В. И., Софронов В. Н.** Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одномерном комплексе // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач мат. физики. 1982. Вып. 3. С. 11–14.
14. **Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В.** Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников // Журн. техн. физики. 1976. Т. 46, вып. 9. С. 1963–1969.
15. **Buiko A. M., Garanin S. F., Demidov V. A., et al.** Investigation of the dynamics of a cylindrical exploding liner accelerated by a magnetic field in the megagauss range // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics “Megagauss fields and pulsed power systems”, Novosibirsk (Russia), July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 743–748.
16. **Гаранин С. Ф., Мамышев В. И.** Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // ПМТФ. 1990. № 1. С. 30–37.

*Поступила в редакцию 10/X 2023 г.,
после доработки — 18/I 2024 г.
Принята к публикации 29/I 2024 г.*
