

УДК 537.63, 537.84

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗГОНА ЛАЙНЕРА ДО 20 км/с

А. М. Буйко, С. Ф. Гаранин, А. М. Глыбин, Б. Е. Гриневич,
П. В. Дудай, А. А. Зименков, В. В. Змушко, Г. Г. Иванова,
А. В. Ивановский, А. И. Краев, В. И. Мамышев,
И. В. Морозова, А. Н. Скобелев, В. Б. Якубов

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия

E-mails: a.m.buyko@vniief.ru, sfgar@vniief.ru, glybin@elph.vniief.ru, bgr@elph.vniief.ru,
duday@elph.vniief.ru, zimenkov@elph.vniief.ru, vadimzm@vniief.ru, G.G.Ivanova@vniief.ru,
ivanovsky@elph.vniief.ru, krayev@elph.vniief.ru, V.I.Mamyshev@vniief.ru, iva_mor@mail.ru,
anskobelev@elph.vniief.ru, V.B.Yakubov@vniief.ru

Представлены результаты модельных экспериментов по отработке нового натурального лайнерного устройства на основе дискового взрывомагнитного генератора, уточненные характеристики натурального устройства и результаты уточненных двумерных магнито-гидродинамических расчетов имплозии лайнера.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, модельные эксперименты, имплозия лайнера, двумерные магнито-гидродинамические расчеты.

Введение. При проведении натурального эксперимента, аналогичного экспериментам [1], предполагается проверить эффективность магнитной имплозии лайнера и возможность выполнения высокоточных ударно-волновых измерений при скоростях лайнера ≈ 20 км/с и давлениях до 10^6 МПа [2–5]. При характерных токах до 70 МА и значениях магнитной индукции до 5 МГс основной проблемой является развитие неустойчивости лайнера, весьма опасное согласно имеющимся расчетным данным [6–8].

Натурное устройство (рис. 1) разрабатывается на основе 15-элементного дискового взрывомагнитного генератора (ДВМГ) диаметром 0,4 м с электровзрывным фольговым размыкателем тока (ФРТ). Спиральный ВМГ (СВМГ) с взрывным узлом отключения обеспечивает начальный ток ДВМГ I_0 к моменту времени t_0 (начало сжатия магнитного потока в ДВМГ и срабатывание узла отключения). Лайнерный пондеромоторный узел (ПУ) подключается взрывным замыкателем тока (ВЗТ), размещаемым в начале коаксиально-радиальной передающей линии между ФРТ и лайнером (t_{0l} , Ω_l — заданное время срабатывания и эффективное сопротивление ВЗТ). Основные узлы устройства и взрывчатое вещество в ВМГ разработаны авторами данной работы.

В [9] приведена информация о начале отработки дискового элемента, модуля ВЗТ, системы высоковольтной изоляции передающей линии и о подготовке эксперимента с двух-

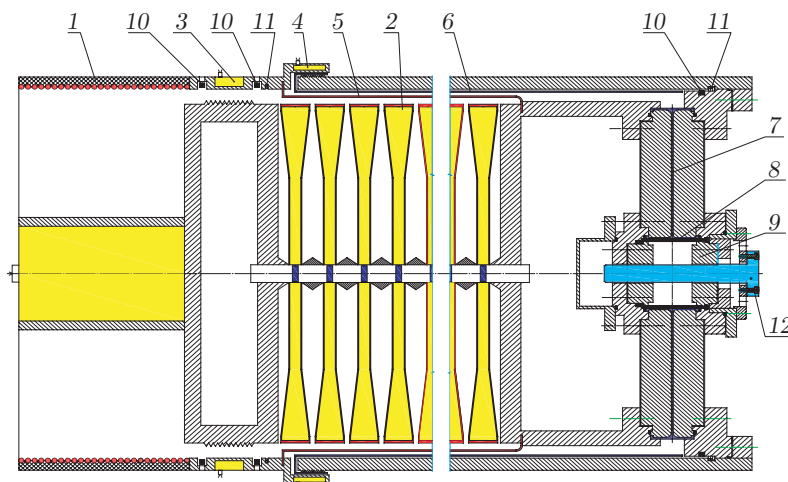


Рис. 1. Схема натурального экспериментального устройства:

1 — СВМГ, 2 — ДВМГ, 3 — взрывной узел отключения СВМГ от ДВМГ, 4 — ВЗТ нагрузки, 5 — электровзрывающаяся Cu-фольга (ФРТ), 6, 7 — коаксиально-радиальная передающая линия, 8, 9 — ПУ с Al-лайнером, 10, 11 — датчики для измерения токов и их производных (фарадеевские и индуктивные), 12 — центральный измерительный блок (ЦИБ)

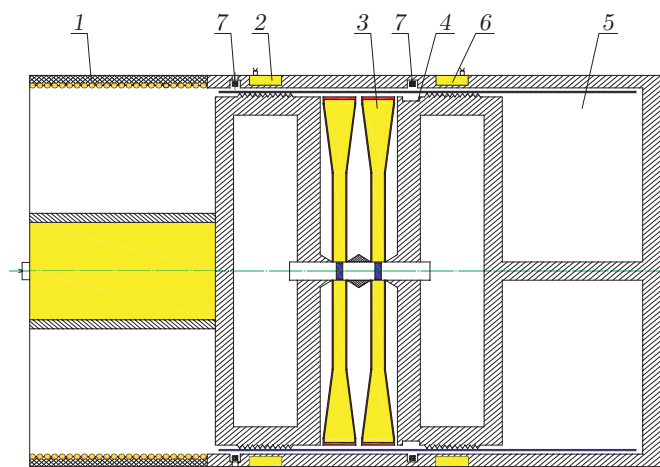


Рис. 2. Схема модельного экспериментального устройства:

1 — СВМГ, 2 — узел отключения СВМГ, 3 — ДВМГ, 4 — эквивалентная нагрузка, 5 — дополнительная нагрузка, 6 — взрывной узел отключения дополнительной нагрузки, 7 — индуктивные датчики для измерения производных токов СВМГ и ДВМГ

элементным ДВМГ (рис. 2), а также о геометрии ПУ, выбранной по результатам двумерных магнитогидродинамических (МГД) расчетов лайнерной имплозии [10].

В настоящей работе представлены результаты модельных экспериментов, уточненные характеристики натурального лайнерного устройства и результаты уточненных двумерных МГД-расчетов имплозии лайнера.

1. Результаты модельных экспериментов. В модельных экспериментах подтверждена высокая эффективность предложенной в [9] конструкции модуля ВЗТ, который обеспечивает стабильный электроконтакт в течение 20 мкс при токе 1,33 МА и омическом сопротивлении $\approx 0,5$ мОм. Натурный ВЗТ, состоящий из таких модулей, должен иметь пренебрежимо малое омическое сопротивление $\Omega_l \approx 0,01$ мОм.

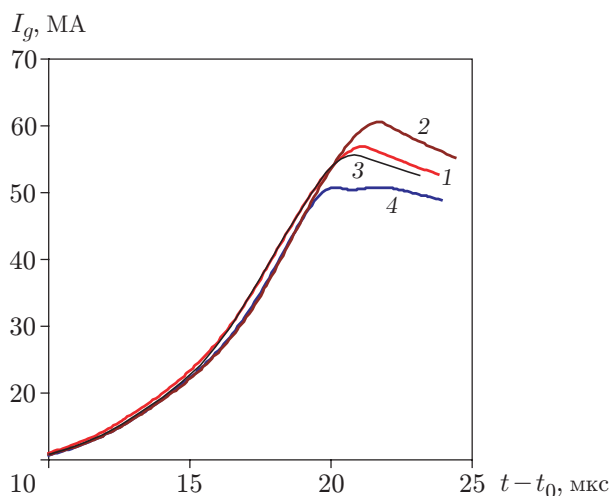


Рис. 3. Зависимость тока ДВМГ от времени в модельном устройстве:

1 — результаты предварительного расчета, 2 — результаты уточненного расчета, 3 — результаты расчета с искусственным увеличением потерь на начальной стадии работы ДВМГ, 4 — экспериментальные данные

В комплексном модельном эксперименте (см. рис. 2) использовались такие же СВМГ, узел его отключения и дисковые элементы, как и в разрабатываемом натурном устройстве (см. рис. 1). Ток в экспериментальном СВМГ незначительно отличается от тока, рассчитанного при индуктивности нагрузки 188 нГн и ее эффективном омическом сопротивлении $0,65$ мОм: максимум тока ≈ 7 МА (начальный ток ДВМГ I_0), интеграл действия тока ≈ 1000 МА²·мкс. Максимальное значение тока в экспериментальном ДВМГ ≈ 51 МА ближе к максимальному значению тока, полученному в предварительном расчете 1, чем к максимальному значению тока, полученному в уточненном расчете 2 (≈ 57 и ≈ 61 МА соответственно (рис. 3)). В расчете 2 учтены начальные индуктивности ДВМГ и его нагрузки: $24,00$ и $1,67$ нГн. В расчете 1 эти значения составляли $23,28$ и $1,86$ нГн соответственно. Искусственное увеличение потерь на начальной стадии работы ДВМГ позволяет получить результаты (кривая 3 на рис. 3), близкие к экспериментальным данным, лишь при $t < 14$ мкс, при $t > 14$ мкс они так же отличаются от экспериментальных данных, как и результаты расчета 1. Очевидно, в эксперименте в конце периода работы ДВМГ ($t > 19$ мкс) также имели место дополнительные потери магнитного потока, превышавшие расчетные потери вследствие диффузии магнитного поля.

Следует отметить, что полученный ток ДВМГ для модельного устройства существенно меньше расчетного тока ДВМГ для натурного устройства. Это обусловлено такими отличиями модельного устройства от натурного, как большая индуктивность нагрузки на один модуль и увеличение потерь магнитного потока в начале и конце работы.

2. Уточненные характеристики натурного устройства. Результаты конструкторской и расчетной разработки натурного устройства и результаты модельных экспериментов позволили уточнить такие его параметры, как сопротивление ВЗТ, индуктивность нагрузки и время ее подключения: $\Omega_l = 0,01$ мОм (в [5] $\Omega_l = 0,2$ мОм), $L_{0l} = 6$ нГн (в [5] $L_{0l} = 6 \div 7$ нГн), $t_{0l} - t_0 = 14,8 \div 17,0$ мкс при толщине Си-фольги $\Delta_f = 0,12 \div 0,15$ мм соответственно. Указанные времена выбирались таким образом, чтобы напряжение на ВЗТ не превышало 10 кВ.

Расчеты устройства с уточненными параметрами были проведены с использованием кода $1D(MHD)_n$ [11], обеспечивающего, как показала практика [1, 12], высокоточное чис-

Результаты расчетов параметров устройства при различных значениях Δ_f, I_0, t_{0l}

Номер расчета	Δ_f , мм	I_0 , МА	t_{0l} , мкс	U_{fm} , кВ	I_{gm} , МА	I_{lm} , МА	v_{imp} , км/с	$t_{imp} - t_0$, мкс
1	0,12	7,0	14,8	227	71,2	64,1	21,3	22,9
2	0,12	6,0	14,8	249	67,2	61,2	19,6	23,5
3	0,15	7,0	17,0	298	79,3	69,0	22,3	23,3
4	0,15	6,0	17,0	306	73,9	64,1	20,2	23,9
5	0,15	7,0	17,0	307	78,9	66,1	20,8	23,3
6	0,15	6,0	18,0	329	73,3	61,7	18,5	23,9
7	0,12	7,0	15,3	233	73,0	65,4	21,7	22,8
8	0,12	6,0	16,7	237	68,5	62,4	19,9	23,3

Примечание. U_{fm}, I_{gm}, I_{lm} — пики напряжения на фольге, тока ДВМГ и тока в ПУ; v_{imp}, t_{imp} — скорость и время соударения лайнера с ЦИБ.

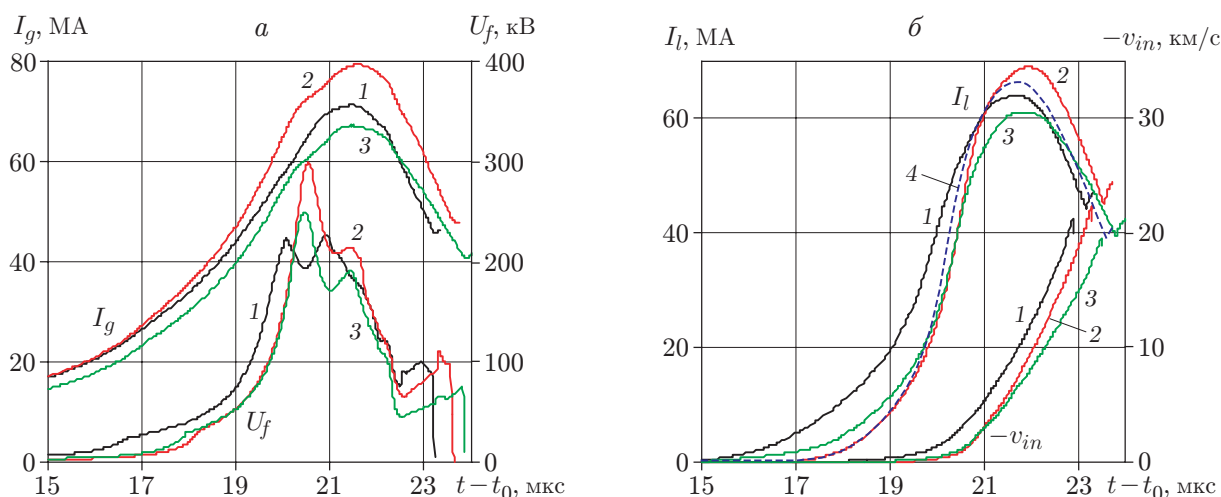


Рис. 4. Расчетные зависимости тока I_g в ДВМГ и напряжения U_f на ФРТ (а), тока в лайнерной нагрузке I_l и скорости внутренней границы лайнера v_{in} (б) от величины $t - t_0$:

1-3 — результаты расчетов 1-3, 4 — результат расчета 5

ленное моделирование реальных устройств. Поэтому результаты расчетов 1-4 (см. таблицу и рис. 4) можно рассматривать как ожидаемые в экспериментах при начальных токах ДВМГ $I_0 = 6 \div 7$ МА. Заметим также, что результаты расчетов 1-4 достаточно близки к результатам предварительных расчетов 5, 6, проведенных в 2010 г., и расчетов 7, 8, выполненных в работе [5].

На рис. 4 показаны зависимости тока в ДВМГ и напряжения на ФРТ, тока в ПУ и скорости внутренней границы лайнера от времени, соответствующие расчетам 1, 2, 3 (см. таблицу). Сравнение результатов расчетов 1 и 3, 1 и 2, представленных на рис. 4 и в таблице, показывает, что толщина фольги и начальный ток ДВМГ оказывают влияние на характеристики устройства. Токи в ПУ, полученные в расчетах 1-3, достаточно близки к значению тока в ПУ, полученному в расчете 5 (кривая 4 на рис. 4,б). Полученная в расчете 5 кривая тока (обозначенная ранее $I_4(t)$) используется в двумерных МГД-расчетах лайнерной имплозии в работах [6-8, 10] и в расчетах, результаты которых приведены ниже.

3. Уточненное двумерное МГД-моделирование имплозии лайнера. Моделирование лайнерной имплозии под действием тока $I_4(t)$, как и в [6, 8, 10], проводилось с использованием методики “Мимоза” [13].

В работе [10] при выборе геометрии ПУ расчеты проводились без учета начальных возмущений лайнера, в отличие от расчетов, моделирующих развитие неустойчивости лайнера типа неустойчивости Рэля — Тейлора [6–8]. Поэтому в расчетах [10] получена нижняя оценка для максимальной разновременности T_{imp} соударения рабочего участка лайнера (ударника высотой $2Z_{imp}$) с ЦИБ: $T_{imp} = A_{imp}/v_{imp}$, где A_{imp} , v_{imp} — максимальные амплитуда возмущений и скорость внутренней поверхности ударника. Незначительные различия выбранной геометрии поверхностей скольжения ПУ (при $R > 3$ см) слабо влияют на характеристики ударника высотой $2Z_{imp} = 2,6$ см: при разрешении сеток $h = 50, 33, 20$ мкм в предварительной серии расчетов получены значения $T_{imp} = 1,7; 1,1; 0,8$ нс, в уточненной — $T_{imp} = 1,2; 0,6; 0,6$ нс соответственно. Сходимость этих результатов с уменьшением разрешения сетки h делает их методически более достоверными. Результаты расчетов взаимодействия лайнера со стенками в процессе имплозии приведены на рис. 5. Согласно расчетным данным вблизи торцевого электрода в конце процесса имплозии возникает небольшая струя, отстающая от ударника на 0,1 нс (см. рис. 5, *слева*). В действительности струя может опередить ударник, что приведет к искажению результатов измерений. Для получения более достоверных данных в соответствии с [10] в конструкцию ПУ был добавлен противоструйный “барьер”, эффективность которого подтвердили расчеты (см. рис. 5, *справа*).

В работе [8] показано, что форму внутренней поверхности лайнера-ударника и максимальную амплитуду возмущений A_{imp} этой поверхности определяет неустойчивость лайнера, возникающая вследствие его начальных возмущений, а не вследствие возмущений, вызванных взаимодействием лайнера с боковыми электродами. Так, для электродов различной формы (со “ступенькой” [8] или “зубом” (см. рис. 5)) вблизи лайнера ($R > 3$ см) при одних и тех же случайных возмущениях внешней поверхности лайнера с амплитудой $a_0 \approx 0,17$ мкм в результате расчетов на сетке с шагом $h = 33$ мкм получены близкие значения амплитуды возмущения ($A_{imp} = 0,33$ мм и $A_{imp} = 0,38$ мм) в центральной зоне лайнера $2Z_{imp} < 3$ см. В случае электрода со ступенькой увеличение начальной амплитуды a_0 в три раза приводит к увеличению значения A_{imp} с 0,33 до 0,38 мм.

Форма начальных возмущений и разрешение сеток h существенно влияют на результаты расчетов [6]. Так, при $h = 50, 33, 25$ мкм в расчетах для центральной зоны лайнера $2Z_{imp} = 2$ см получены значения $A_{imp} = 0,15; 0,22; 0,48$ мм (при амплитуде случайных начальных возмущений $a_0 \approx 0,17$ мкм).

Аналогичные расчеты были проведены при двух других уточненных значениях начальных возмущений внешней поверхности лайнера [14], возможных при ее прецизионной обработке (рис. 6). Формы внутренней поверхности рабочего участка лайнера-ударника, полученные в этих расчетах, приведены на рис. 7. Для зоны лайнера $2Z_{imp} = 2$ см при $h = 80, 40, 20$ мкм получены следующие значения амплитуды A_{imp} : при $a_0 = 0,2$ мкм $A_{imp} = 0,09; 0,19; 0,11$ мм, при $a_0 = 0,5$ мкм $A_{imp} = 0,08; 0,09; 0,38$ мм. Эти результаты свидетельствуют о том, что для ослабления развития неустойчивости необходимо проводить прецизионную обработку поверхности лайнера. Следует отметить значительные погрешности этих расчетов, как и расчетов [6–8], в отличие от расчетов без начальных возмущений лайнера. Эти погрешности обусловлены, в частности, тем, что коротковолновые участки спектра возмущений лайнера описываются в расчетах весьма грубо (в данном случае разрешение сетки h больше характерных длин волн λ (см. рис. 6, *б*)).

Заключение. Проведены модельные эксперименты по отработке новых узлов устройства для предполагаемого натурного эксперимента. Отработан модуль ВЗТ, который

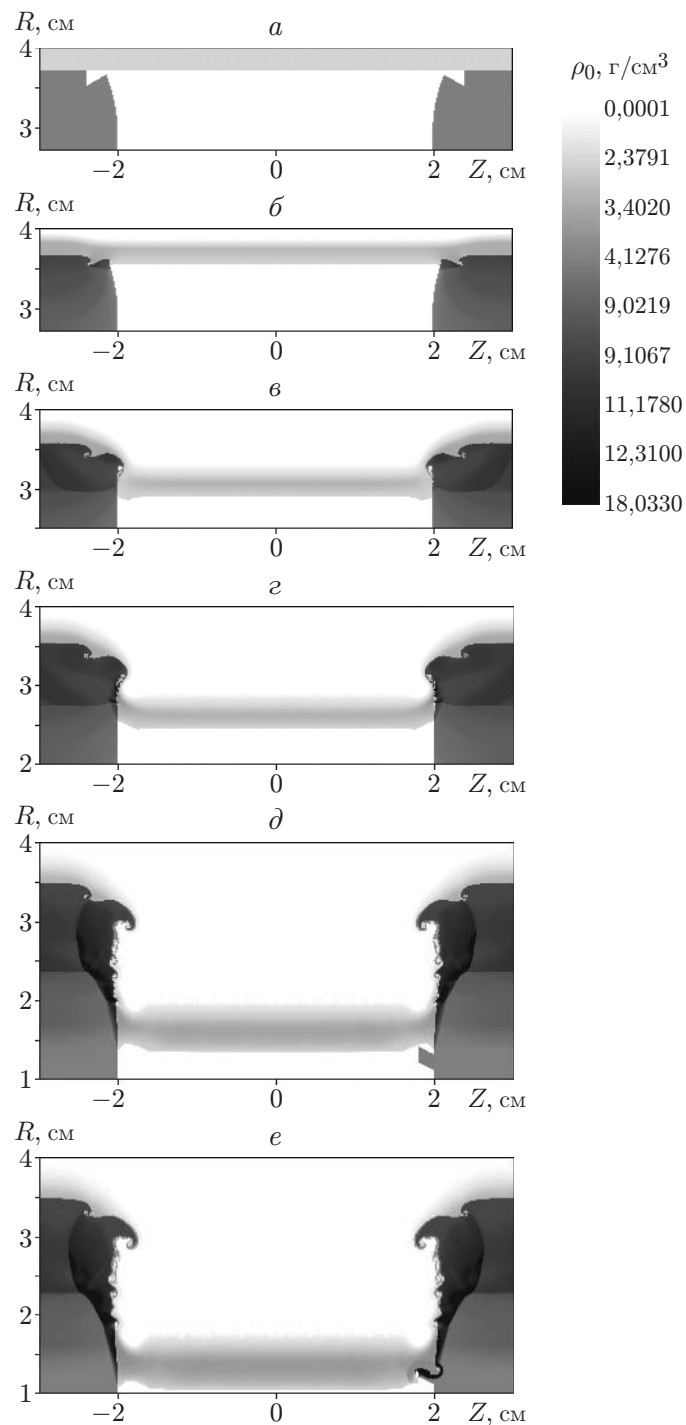


Рис. 5. Распределения плотности в ПУ в процессе имплозии лайнера без учета начальных возмущений лайнера в различные моменты времени (начало отсчета — момент времени t_0):

слева — результаты расчета в случае отсутствия на торцевых электродах противоструйного “барьера”, *справа* — результаты расчета в случае наличия противоструйного “барьера”; $a - t = 0$, $b - t = 21,0$ мкс, $в - t = 21,9$ мкс, $г - t = 22,3$ мкс, $д - t = 23,0$ мкс, $e - t = 23,25$ мкс

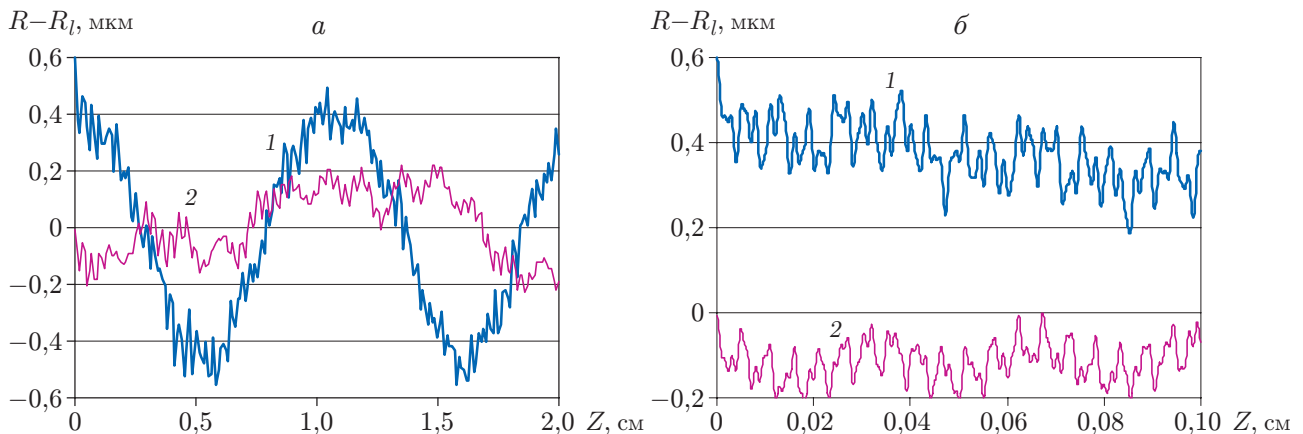


Рис. 6. Формы начальных возмущений внешней поверхности лайнера $R(Z)$ ($R_l = 4$ см):
 а — $Z < 2$ см, б — $Z < 0,1$ см ($Z = 0$ — плоскость симметрии); 1 — $a_0 = 0,2$ мкм, 2 — $a_0 = 0,5$ мкм

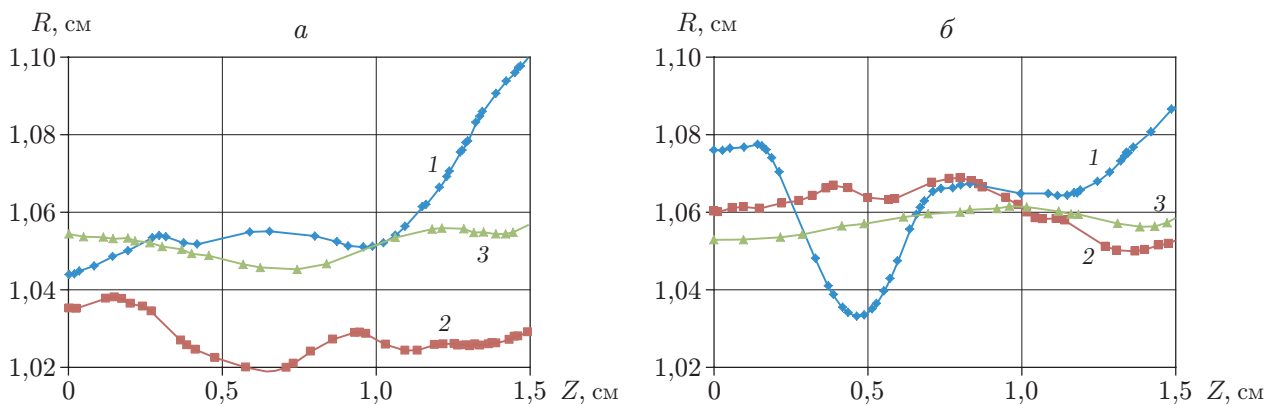


Рис. 7. Формы внутренней поверхности рабочего участка лайнера-ударника в конце процесса имплозии:
 а — $a_0 = 0,2$ мкм, б — $a_0 = 0,5$ мкм; 1 — $h = 20$ мкм, 2 — $h = 40$ мкм, 3 — $h = 80$ мкм

должен обеспечить пренебрежимо малое омическое сопротивление натурального ВЗТ $\approx 0,01$ мОм. В эксперименте с двухэлементным ДВМГ показана эффективность работы трех узлов устройства: СВМГ, узла отключения СВМГ и дисковых элементов ДВМГ. Зарегистрированные токи СВМГ и ДВМГ достигали ≈ 7 и ≈ 51 МА, т. е. близки к расчетным значениям.

В результате уточненных расчетов для натурального лайнерного устройства получены следующие характеристики системы импульсной мощности: ток ДВМГ — $71 \div 79$ МА, напряжение на ФРТ — $230 \div 300$ кВ, ток в ПУ — $64 \div 69$ МА, при этом толщина Су-фольги составляла $0,12 \div 0,15$ мм, ток СВМГ — 7 МА. В данном случае скорость лайнера должна достигать $21 \div 22$ км/с.

Приведены основные результаты уточненных МГД-расчетов магнитной имплозии лайнера. Установлено, что добавление в конструкцию торцевых электродов ПУ противоструйного “барьера” устраняет приэлектродную струю, представляющую потенциальную опасность. Для ослабления развития неустойчивости лайнера необходимо проводить прецизионную обработку его поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **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 related topics, Moscow — St. Petersburg, July 7–14, 2002. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 747–751.
2. **Буйко А. М., Горбачев Ю. Н., Иванова Г. Г. и др.** Устройства с дисковыми взрывомагнитными генераторами для высокоскоростной имплозии конденсированных лайнеров // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. [Электрон. ресурс]. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2010. С. 475–485.
3. **Буйко А. М., Куделькин В. В., Кузьяев А. И. и др.** Влияние параметров взрывчатки на характеристики дискового ВМГ // Тр. 12-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. [Электрон. ресурс]. Новосибирск: Ин-т гидродинамики, 2010. С. 274–281.
4. **Buyko A. M., Garanin S. F., Gorbachev Yu. N., et al.** Explosive magnetic liner devices to produce shock pressures up to 3 TPa // Digest of Technical Papers of the 17th IEEE Intern. pulsed power conf., Washington, June 28 — July 2, 2009. S. l., 2009. P. 215–220.
5. **Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Глыбин А. И. и др.** Система с дисковым ВМГ для ускорения лайнеров-ударников до скоростей ~ 20 км/с // Тр. Междунар. конф. “13-е Харитоновские тематические научные чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 14–18 марта 2011 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2011. С. 488–495.
6. **Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. и др.** Расчеты магнитной имплозии лайнеров-ударников, ускоряемых до скоростей ~ 20 км/с // Тр. Междунар. конф. “13-е Харитоновские тематические научные чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 14–18 марта 2011 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2011. С. 549–556.
7. **Sgro A. G., Atchison W. L.** Simulation of magnetically driven experiments // Тр. Междунар. конф. “13-е Харитоновские тематические научные чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 14–18 марта 2011 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2011. С. 211–221.
8. **Buyko A. M., Garanin S. F., Zmushko V. V.** Magnetic liner implosion simulations for the ALT-3 experiment // Proc. of the 14th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation related topics, Hawaii, Oct. 14–19, 2012. S. l.: IEEE, Inc., 2012. P. 172–177.
9. **Glybin A. M., Grinevich B. E., Dudai P. V., et al.** Model experiments to test pulsed power system components // Proc. of the 14th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation related topics, Hawaii, Oct. 14–19, 2012. S. l.: IEEE, Inc., 2012. P. 252–260.
10. **Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В.** К выбору геометрии лайнерного ПУ для эксперимента ALT-3 // Сб. докл. Междунар. конф. “15-е Харитоновские тематические научные чтения: Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны”, Саров, 18–22 марта 2013 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2013. С. 779–789.
11. **Buyko A. M.** Disc explosive magnetic generator and quasi-spherical liner simulations with a 1D code // Proc. of the Intern. conf. on megagauss magnetic field generation related topics, Santa Fe (USA), Nov. 5–10, 2006. S. l.: IEEE, Inc., 2007. P. 287–292.
12. **Буйко А. М.** Электровзрывные размыкатели сильноточных взрывомагнитных генераторов // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 137–149.

13. **Софронов И. Д., Винокуров О. А., Змушко В. В. и др.** Комплекс программ МИМОЗА. Решение многомерных задач гидродинамики // Вопросы математического моделирования, вычислительной математики и информатики: Сб. науч. тр. М.; Арзамас-16: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики: Междунар. акад. информатизации, 1994. С. 94–96.
14. **Майлс А. Р.** Комплексное моделирование систем ВМГ-мишень и новая тестовая задача по исследованию целостности лайнера // Сб. аннот. докл. Междунар. конф. “16-е Харитоновские тематические научные чтения: Мощная импульсная электрофизика”, 21–25 апр. 2014 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2014. С. 68–69.

*Поступила в редакцию 16/X 2014 г.,
в окончательном варианте — 1/XII 2014 г.*
