

## ПРОВЕРКА И 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*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Представлены результаты модельных экспериментов по отработке нового взрыво-магнитного лайнерного устройства, его уточненные характеристики и результаты двумерных магнитогидродинамических расчетов имплозии лайнера в этом устройстве.

### Введение

В натурном эксперименте – аналоге экспериментов [1] – предполагается проверить эффективность магнитной имплозии лайнера и возможность высокоточных ударно-волновых измерений, при скоростях лайнера  $\sim 20$  км/с и давлениях до 10 Мбар (Al) [2–5]. При ожидаемом токе до 70 МА (магнитная индукция – до 5 МГс) основной проблемой является развитие неустойчивости лайнера, весьма опасное по расчетам [6–8].

Натурное устройство (см. рис. 1) разрабатывается на основе 15-элементного дискового взрыво-магнитного генератора  $\varnothing 0,4$  м (ДВМГ) с электро-взрывным открывающим ключом – фольговым размыкателем тока (ФРТ). Спиральный ВМГ (СВМГ) обеспечивает начальный ток ДВМГ  $I_0$  ко времени  $t_0$ , когда СВМГ отключается от ДВМГ (взрывным замыкателем 3) и начинается сжатие магнитного потока в ДВМГ. Нагрузка – коаксиально-радиальная передающая линия (ПЛ) 6, 7 и лайнерный пондеромоторный узел (ПУ) 8, 9 – подключается в заданное время  $t_{01}$  взрывным замыкателем тока (ВЗТ) 4 ( $\Omega_l$  – его сопротивление). Основные узлы натурального устройства разрабатываются вновь, поэтому потребовалась их отработка в модельных экспериментах. Ранее сообщалось [9] о начале такой отработки – дискового элемента, модуля ВЗТ, системы высоковольтной изоляции ПЛ и о подготовке комплексного модельного эксперимента с 2-элементным ДВМГ (см. рис. 2). Сообщалось также [10] о выборе геометрии торцевых электродов ПУ 9 (см. рис. 1), сделанном по результатам двумерного магнитогидродинамического (2D МГД) моделирования лайнерной имплозии в ПУ с различной формой этих электродов.

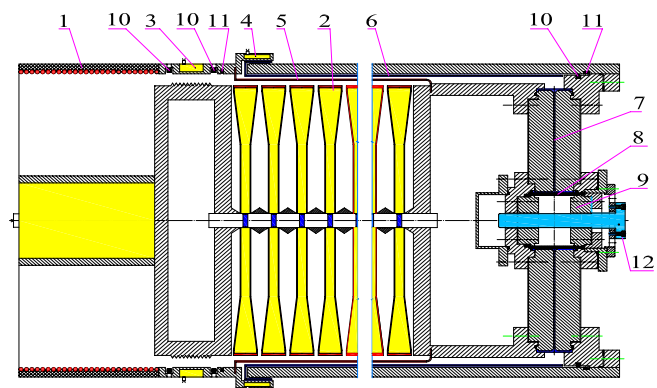


Рис. 1. Схема разрабатываемого натурального экспериментального устройства: 1 – СВМГ, 2 – диски с взрывчаткой - ДВМГ, 3 – взрывной узел отключения СВМГ от ДВМГ, 4 – ВЗТ нагрузки, 5 – электровзрывающаяся Cu-фольга – ФРТ, 6, 7 – передающая линия – ПЛ, 8 – Al-лайнер ПУ, 9 – торцевые электроды ПУ, 10, 11 – датчики для измерения токов и их производных, 12 – центральный измерительный блок – ЦИБ (Al)

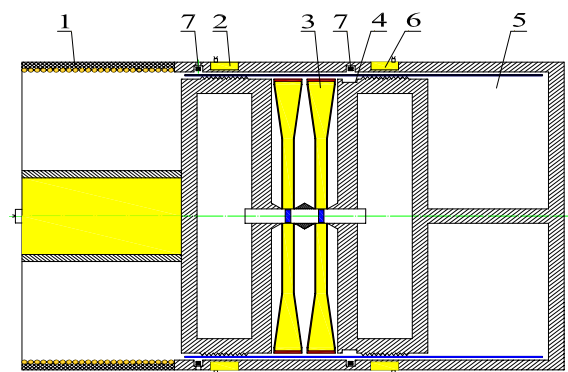


Рис. 2. Схема модельного экспериментального устройства: 1 – СВМГ, 2 – взрывной узел отключения СВМГ, 3 – диски с взрывчаткой – ДВМГ, 4 – эквивалентная нагрузка, 5 – дополнительная нагрузка, 6 – взрывной узел отключения дополнительной нагрузки, 7 – индуктивные датчики для измерения производных токов СВМГ и ДВМГ

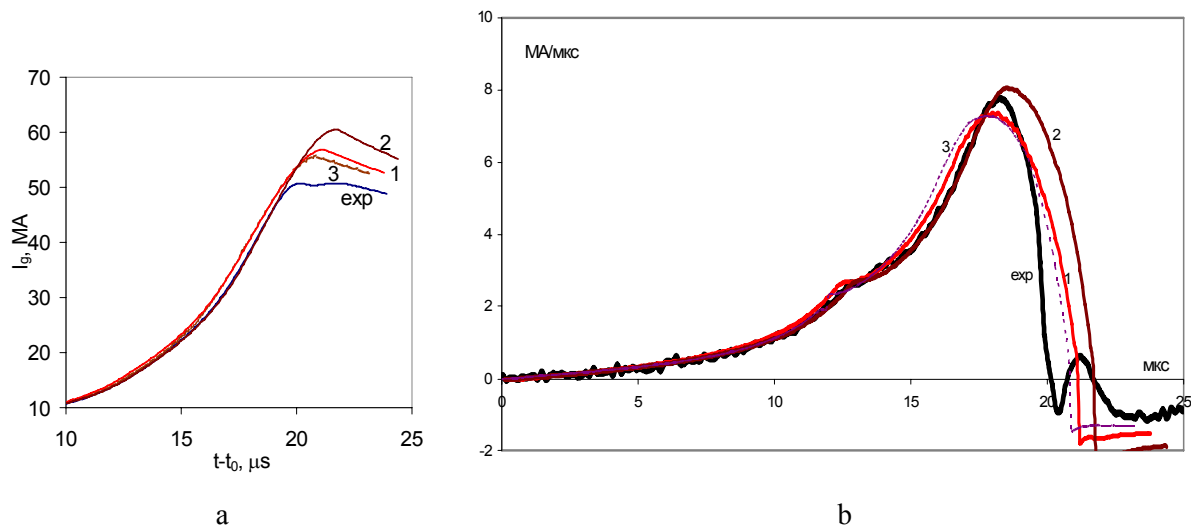


Рис. 3. Зависимости от времени тока ДВМГ (а) и его производной (б) в модельном устройстве: эксперимент (exp), предварительный и уточненный расчеты (1 и 2); 3 – расчет с дополнительными потерями в начальной стадии работы ДВМГ.

В настоящей работе представлены результаты модельных экспериментов, уточненные характеристики натурального лайнерного устройства – с учетом конструкторской и расчетной его разработки и модельных экспериментов – и результаты 2D МГД расчетов имплозии лайнера в ПУ с уточненной формой торцевых электродов.

### 1. Результаты модельных экспериментов

В таких экспериментах подтверждена высокая эффективность предложенной в [9] конструкции модуля ВЗТ, которая обеспечивает – при токе 1,33 МА и омическом сопротивлении до 0,5 МОм – стабильный электроконтакт в течение 20 мкс. Натурный ВЗТ, состоящий из таких модулей [9], должен иметь пренебрежимо малое омическое сопротивление  $\Omega_l \sim 0,01$  Ом.

В эксперименте с модельным устройством (см. рис. 2) использовались такие же основные узлы, как и в натурном устройстве (см. рис. 1): СВМГ 1, его узел отключения 2 и дисковые элементы 3. СВМГ работал на двухэлементный ДВМГ, эквивалентную нагрузку 4 и дополнительную нагрузку 5, что моделировало начальную индуктивность 15-модульного ДВМГ и его нагрузки в натурном устройстве ( $t < t_0$ ). Двухэлементный ДВМГ – после срабатывания узлов отключения 2 и 6 ( $t > t_0$ ) – работал на эквивалентную нагрузку 4, что моделировало работу модулей ДВМГ в натурном устройстве (по величине индуктивности на один модуль, но не моделировало потери магнитного потока).

В этом эксперименте полученный ток СВМГ близок к расчету: максимум тока  $\sim 7$  МА (начальный ток ДВМГ  $I_0$ ), интеграл действия  $\sim 1000$  МА<sup>2</sup>мкс, эффективное время нарастания  $\sim 52$  мкс (оценка по максимальным величинам тока и его производной). Экспериментальный максимальный ток ДВМГ –  $\sim 51$  МА – более близок к предварительному расчету 1, чем к уточненному расчету 2 ( $\sim 57$  МА и  $\sim 61$  МА, см. рис. 3а). В расчете 2 учтены такие уточнения, как начальные индуктивности ДВМГ и его нагрузки (24,00 вместо 23,28 нГн и 1,67 вместо 1,86 нГн). Отличия результатов этих расчетов и результатов эксперимента более детально видны на графиках производных токов (см. рис. 3б). Был проведен также расчет 3 с искусственным увеличением потерь в начальной стадии работы ДВМГ – в отличие от расчета 2. Результаты расчета 3 близки к эксперименту лишь до 14 мкс, а позднее они отличаются от эксперимента так же, как и результаты расчета 1. Очевидно, в эксперименте в конце работы ДВМГ (после 19 мкс) тоже имели место дополнительные потери магнитного потока – сверх расчетных потерь, связанных с диффузией магнитного поля в проводящие стенки.

Следует отметить, что ток ДВМГ, полученный в модельном устройстве, существенно меньше, чем ток ДВМГ, ожидаемый в натурном устройстве (71–79 МА, см. раздел 2). Это связано с такими отличиями модельного устройства от натурального, как большая индуктивность нагрузки на 1 модуль и увеличенные потери магнитного потока в начале и в конце работы.

## 2. Уточненные характеристики натурального устройства

Результаты конструкторской и расчетной разработки натурального устройства и результаты модельных экспериментов позволили уточнить (по сравнению с [5]) такие его параметры, как сопротивление ВЗТ  $\Omega_l = 0,01$  мОм (было 0,2 мОм), индуктивность нагрузки  $L_{ol} = 6$  нГн (было 6–7 нГн) и время подключения нагрузки  $t_{ol}-t_0 = 14,8-17,0$  мкс, требуемое при толщине Cu-фольги ФРТ  $\Delta_f = 0,12-0,15$  мм соответственно. Указанные времена выбраны так, чтобы напряжение на ВЗТ при подключении нагрузки не превышало величины  $U_{ol} = 10$  кВ.

Расчеты устройства с уточненными параметрами были проведены по коду 1D(MHD)<sub>n</sub> [11], ко-

торый позволяет, как показала практика [1, 12], рассчитывать характеристики близких устройств с точностью порядка точности их измерения в экспериментах. Поэтому результаты двух серий расчетов  $1(t_{ol})$  и  $2(t_{ol})$  с заданными временами  $t_{ol}$ , которые соответствуют толщинам Cu-фольги ФРТ  $\Delta_f = 0,12$  и  $0,15$  мм (см. табл. 1), можно рассматривать как ожидаемые в экспериментах с возможными начальными токами ДВМГ  $I_0 = 7,5-6,0$  МА. Серия расчетов  $1(t_{ol})$  – для  $\Delta_f = 0,12$  мм – дает токи в ПУ  $I_{lm} = 64,7-61,2$  МА и скорости лайнера  $v_{imp} = 21,5-19,6$  км/с, при напряжениях на ФРТ  $U_{fm} = 227-249$  кВ. В серии расчетов  $2(t_{ol})$  – для  $\Delta_f = 0,15$  мм – токи, скорости лайнера и напряжения на ФРТ несколько больше:  $I_{lm} = 70,6-64,1$  МА,  $v_{imp} = 23,2-20,2$  км/с,  $U_{fm} = 281-306$  кВ. На рис. 4а, б показаны характерные зависимости от времени

Таблица 1

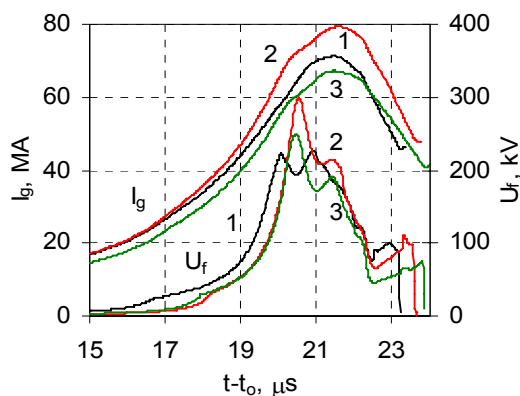
Расчетные характеристики устройства при возможных значениях его параметров  $\Delta_f$ ,  $I_0$  и  $t_{ol}(U_{ol})$ .

#( $t_{ol}$ , $U_{ol}$ ) $\Delta_f$	# (№)	$I_0$ МА	$t_{ol}(U_{ol})$ $\mu s(kV)$	$U_{fm}$ kV	$I_{gm}$ МА	$I_{lm}$ МА	$t_{lm}-t_0$ $\mu s$	$v_{imp}$ km/s	$t_{imp}-t_0$ $\mu s$
1( $t_{ol}$ ) 0,12 mm	967	7,5	14,8(10)	236	72,6	64,7	21,6	21,5	22,6
	973(1)	<b>7,0</b>	<b>14,8(6)</b>	<b>227</b>	<b>71,2</b>	<b>64,1</b>	<b>21,7</b>	<b>21,3</b>	<b>22,9</b>
	977(2)	<b>6,0</b>	<b>14,8(3)</b>	<b>249</b>	<b>67,2</b>	<b>61,2</b>	<b>21,8</b>	<b>19,6</b>	<b>23,5</b>
2( $t_{ol}$ ) 0,15 mm	968	7,5	17,0(10)	281	81,3	70,6	21,8	23,2	23,0
	974(3)	<b>7,0</b>	<b>17,0(7)</b>	<b>298</b>	<b>79,3</b>	<b>69,0</b>	<b>22,0</b>	<b>22,3</b>	<b>23,3</b>
1( $U_{ol}$ ) 0,12 mm	928	7,0	15,3(8)	233	73,0	65,4	21,6	21,7	22,8
	930	6,0	16,7(8)	237	68,5	62,4	21,8	19,9	23,3
2( $U_{ol}$ ) 0,15 mm	857(4)	<b>7,0</b>	<b>17,0(8)</b>	<b>307</b>	<b>78,9</b>	<b>66,1</b>	<b>21,7</b>	<b>20,8</b>	23,3
	854	6,0	18,0(8)	329	73,3	61,7	21,9	18,5	23,9

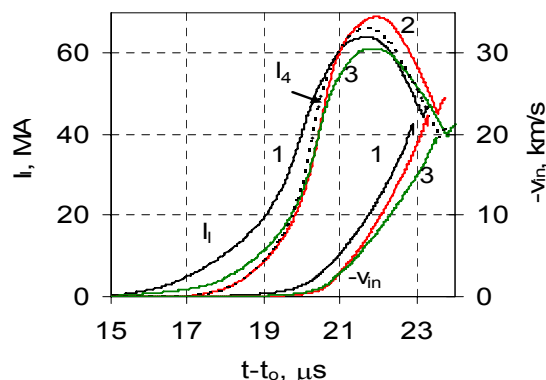
Примечания к таблице 1:

$t_{ol}(U_{ol})$  – время  $t_{ol}$  подключения нагрузки, при котором напряжение на ВЗТ равно  $U_{ol}$  (в сериях расчетов  $1(U_{ol})$  и  $2(U_{ol})$  время  $t_{ol}$  определялось по заданному напряжению  $U_{ol}$  на ВЗТ);

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



а



б

Рис. 4. Результаты уточненных расчетов натурального устройства: а – ток  $I_g$  в ДВМГ и напряжение  $U_f$  на ФРТ – из расчетов 1, 2, 3; б – ток в лайнерной нагрузке  $I_l$  и скорость внутренней границы лайнера  $v_{in}$  – из расчетов 1, 2, 3; тестовый ток  $I_4(t)$  – из расчета 4.

тока в ДВМГ, тока в лайнерной нагрузке, напряжения на ФРТ и скорости внутренней границы лайнера, – из расчетов **1, 2, 3** (выделенных жирным шрифтом в табл. 1). Сравнения расчетов **1, 3** и **1, 2** показывают, как повлияют на ожидаемые характеристики устройства предстоящий перед экспериментом выбор толщины фольги в пределах 0,12–0,15 мм и возможное в эксперименте снижение начального тока ДВМГ (с 7 до 6 МА).

Как видно из приведенных данных, при одинаковых величинах  $\Delta_f$  и  $I_0$  результаты уточненных расчетов из  $1(t_{0l})$  и  $2(t_{0l})$  близки к результатам предварительных расчетов  $1(U_{0l})$  [5] и к результатам поисковых расчетов  $2(U_{0l})$  ( $\Omega_l > 0,5$  МОм, 2010 год). Например, токи в ПУ из расчетов **1, 2, 3** достаточно близки к току  $I_4(t)$ , который был взят из поискового расчета **4** (см. табл. 1 и рис. 4b), использовался в качестве тестового тока при 2D МГД моделировании лайнерной имплозии в работах [6–8, 10] и используется с той же целью в разделе 3 настоящей работы.

### 3. 2D МГД расчеты имплозии лайнера

Уточненное 2D МГД моделирование лайнерной имплозии под действием тока  $I_4(t)$  проводится, как и ранее [6,8,10], по эйлерово-лагранжевой методике МИМОЗА [13].

В работе [10] для выбора геометрии ПУ расчеты имплозии лайнера проводились без учета его начальных возмущений, – в отличие от расчетов, моделирующих развитие его неустойчивости типа Релея – Тейлора [6–8]. Поэтому расчеты [10] давали нижнюю оценку максимальной разновременности  $T_{imp}$  соударения с ЦИБ рабочего участка лайнера высотой  $2Z_{imp}$  (центральная зона лайнера – ударник):  $T_{imp} = A_{imp}/v_{imp}$ , где  $A_{imp}$  и  $v_{imp}$  – максимальная амплитуда возмущений и максимальная скорость внутренней поверхности ударника. Незначительные отличия выбранной геометрии поверхностей скольжения ПУ (при  $R > 3$  см) слабо влияют на характеристики ударника высотой  $2Z_{imp} = 2,6$  см:  $T_{imp} = 1,7-1,1-0,8$  нс и  $1,2-0,6-0,6$  нс – в предварительных и в уточненных ранее расчетах с разрешением сеток  $h = 50-33-20$  мкм, соответственно. Сходимость этих результатов с уменьшением величины  $h$  делает их методически достаточно достоверными. Такие расчеты лайнерной имплозии показывают (см. рис. 5,  $Z < 0$ ), что перед соударением лайнера с ЦИБ возникает небольшая струя у торцевого электрода ПУ, которая отстает от ударника лишь на 0,1 нс. Нельзя исключить, что в действительности она может опередить ударник, что помешало бы выводу информации о

результатах измерений из ЦИБ. Для устранения этой опасности в выбранную ранее геометрию ПУ, согласно [10], был введен противоструйный «барьер» – достаточно эффективный по уточненному расчету (см. рис. 5,  $Z > 0$ ).

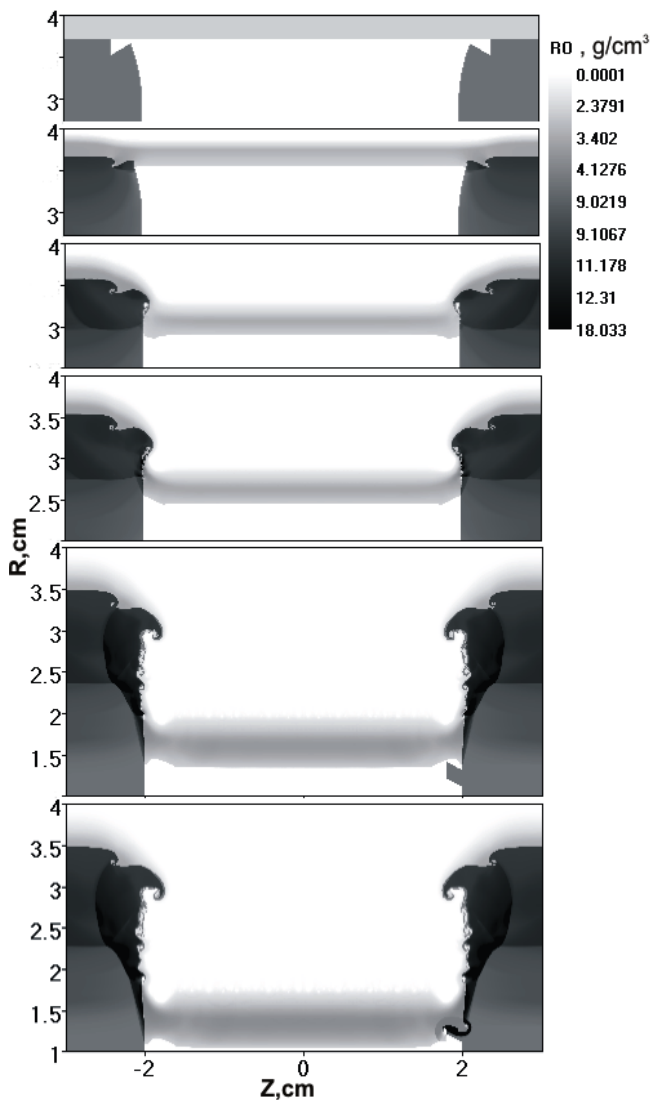


Рис. 5. Распределения плотности лайнерного ПУ в начале, в процессе и в конце имплозии (сверху вниз) – из расчетов без начальных возмущений лайнера с выбранной геометрией торцевых электродов с противоструйным барьером ( $Z > 0$ ) и без него ( $Z < 0$ )

В работе [8] показано, что форму внутренней поверхности лайнера-ударника и ее основную характеристику  $A_{imp}$  определяет развитие неустойчивости лайнера, возникающее вследствие его начальных возмущений, – при слабом влиянии геометрии торцевых электродов ПУ. Так, для электродов с различной формой при  $R > 3$  см – со «ступенькой» или с «зубом» (близким к рис. 5, вверху) – одинаковые случайные возмущения наружной поверхности лайнера

с максимальной амплитудой  $a_0 \approx 0,17$  мкм приводят к концу имплозии к близким результатам в центральной зоне лайнера  $2Z_{imp} < 3$  см (при разрешении сеток  $h = 33$  мкм):  $A_{imp} = 0,33$  и  $0,38$  мм ( $T_{imp} = 16$  и  $18$  нс). Увеличение втрое величины  $a_0$  приводит в расчете со «ступенькой» к росту величины  $A_{imp}$  с  $0,33$  до  $0,38$  мм.

Форма начальных возмущений и разрешение сеток  $h$  существенно влияют на результаты, сходимость которых с уменьшением  $h$  отсутствует [6]:

$A_{imp} = 0,15-0,22-0,48$  мм – для величин  $2Z_{imp} = 2,7-2,7-3,2$  см при  $h = 50-33-25$  мкм, соответственно. Приведем результаты этих же расчетов для величин  $2Z_{imp} = 2$  и  $3$  см (используемых в [10, 14]):

$A_{imp} (2Z_{imp} = 2 \text{ см}) = 0,15-0,22-0,48$  мм ( $T_{imp} = 8-11-24$  нс);

$A_{imp} (2Z_{imp} = 3 \text{ см}) = 0,30-0,48-0,48$  мм ( $T_{imp} = 15-24-24$  нс).

Аналогичные уточненные расчеты были проведены с двумя другими начальными возмуще-

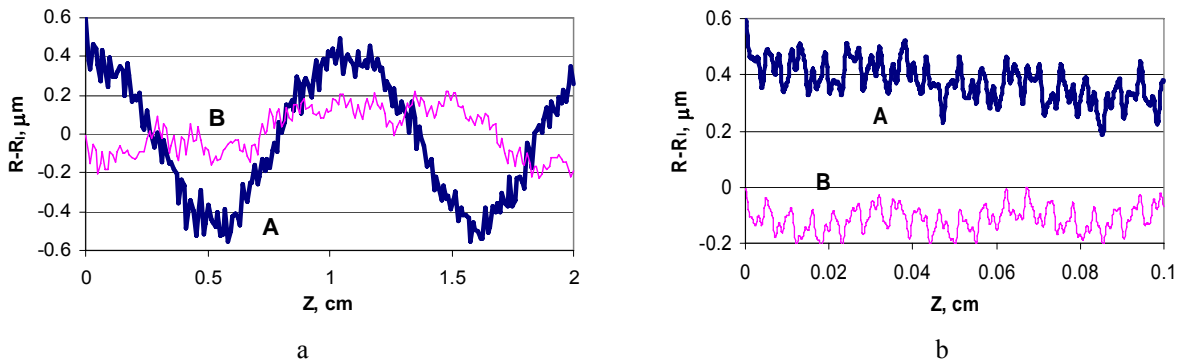


Рис. 6. Формы А и В\*) начальных возмущений наружной поверхности двух прецизионно обработанных лайнеров (а) и те же возмущения на фрагментах лайнеров (б)

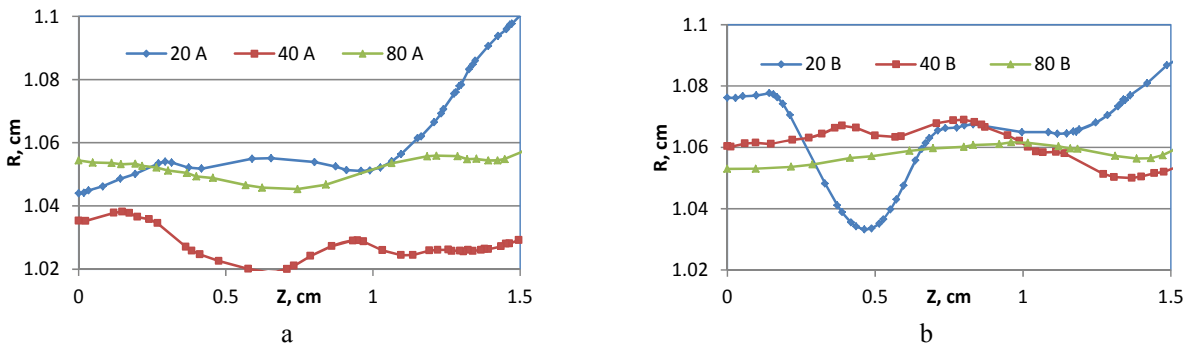


Рис. 7. Формы внутренней поверхности рабочего участка лайнера из расчетов с его начальными возмущениями А (а) и В (б) – при  $h = 80-40-20$  мкм.

\*) Параметры начальных возмущений наружной поверхности лайнера, определяемых формулой из доклада [14]

$$R(Z) - R_l = \sum \{ a \cos(2\pi Z/\lambda + \varphi) \}_{(R_l = 40 \text{ мм})}$$

А (test 3а)			В (test 3в)		
$\lambda$ (mm)	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$\varphi$	$\lambda$ (mm)	$a$ ( $\mu\text{m}$ )	$\varphi$
10,7250	0,437478	0,00733367	20,3850	0,160000	3,08107
5,36200	0,0375836	3,13565	15,2890	0,0739775	0,0513646
1,69300 0,335000	0,0358307	0,00192529	6,11600	0,0562101	3,14365
0,131000	0,0269713	0,00131416	3,82200	0,0188448	0,00969661
0,0630000	0,0262631	0,00280489	2,78000	0,0166121	0,0105065
0,0270000	0,0463916	0,00440671	1,79900	0,0169567	3,14578
0,0160000	0,0437554	0,00134288	0,329000	0,0341893	0,000510319
-	0,0196561	0,000357714	0,0520000	0,0441961	0,00275870
-	-	-	0,0270000	0,0206755	0,00111632
-	-	-	0,0160000	0,0184813	0,000208535

ниями наружной поверхности лайнера – возможными при прецизионной обработке лайнера, – с тестовыми возмущениями А и В (рис. 6а,б, максимальные амплитуды  $a_0 \approx 0,2$  и  $0,5$  мкм). Формы внутренней поверхности лайнера в конце имплозии, полученные в этих расчетах, приведены на рис. 7а,б. Обработка этих данных дает следующие характеристики лайнера-ударника по расчетам при  $h = 80-40-20$  мкм соответственно:

для возмущений А

( $a_0 \approx 0,2$  мкм):  $A_{imp}(2Z_{imp} = 2 \text{ см}) = 0,09-0,19-0,11$  мм  
( $T_{imp} = 4.5-9.5-5.5$  нс),

$A_{imp}(2Z_{imp} = 3 \text{ см}) = 0,11-0,19-0,57$  мм  
( $T_{imp} = 5.5-9.5-28$  нс);

для возмущений В

( $a_0 \approx 0,5$  мкм):  $A_{imp}(2Z_{imp} = 2 \text{ см}) = 0.08-0.09-0.38$  мм  
( $T_{imp} = 4.0-4.5-19$  нс),

$A_{imp}(2Z_{imp} = 3 \text{ см}) = 0,08-0,20-0,45$  мм  
( $T_{imp} = 5,5-9,5-28$  нс).

Здесь развитие возмущений несколько слабее, чем в вышеприведенных расчетах со случайными возмущениями лайнера. Это свидетельствует о том, что для ослабления развития неустойчивости лайнера необходима его прецизионная обработка.

Следует отметить, что погрешности приведенных уточненных расчетов имплозии лайнера с учетом его начальных возмущений, как и расчетов [6, 8], остаются значительными – в отличие от расчетов без начальных возмущений лайнера (см. выше). Указанные погрешности связаны с тем, в частности, что коротковолновые участки спектра возмущений лайнера передаются в расчетах весьма грубо: здесь разрешение сетки  $h$  больше длин волн  $\lambda$  (см. рис. 6б).

### Заключение

Завершены модельные эксперименты по обработке основных узлов нового лайнерного устройства на основе 15-элементного ДВМГ  $\varnothing 0,4$  м – для планируемого эксперимента по проверке эффективности магнитной имплозии лайнера и возможности высокоточных ударно-волновых измерений. Отработан модуль ВЗТ, который должен обеспечить пренебрежимо малое омическое сопротивление  $\sim 0,01$  мОм натурального ВЗТ. В модельном эксперименте с 2-элементным ДВМГ  $\varnothing 0,4$  м показана работоспособность СВМГ, его узла отключения и дисковых элементов. Зарегистрированные токи СВМГ и ДВМГ достигали  $\sim 7$  МА и  $\sim 51$  МА, что в целом близко к расчетам.

В результате уточненных расчетов натурального устройства получены следующие характеристики

его системы импульсной мощности: ток ДВМГ – 71–79 МА, напряжение на ФРТ – 230–300 кВ, ток в ПУ – 64–69 МА, – при токе СВМГ 7 МА и толщине Cu-фольги ФРТ 0,12–0,15 мм. При этом скорость лайнера должна достигать 21–22 км/с.

Приведены основные результаты уточненных 2D МГД расчетов магнитной имплозии лайнера в ПУ натурального устройства:

– добавление противоструйного «барьера» к выбранной геометрии торцевых электродов ПУ достаточно эффективно: устраняется потенциальная опасность для получения экспериментальной информации об эффективности лайнерной имплозии и результатах ударно-волновых измерений;

– начальные возмущения лайнера, возможные при его прецизионной обработке, могут привести к ослаблению развития его неустойчивости – по сравнению со случайными возмущениями той же амплитуды (порядка долей микрона).

### Список литературы

1. Buyko A. M., Gorbachev Yu. N., Zmushko V.V. et al. Simulation of Atlas parameters in explosive magnetic experiments ALT-1,2 // MEGAGAUSS-9. Proc. of Ninth Int. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation Related Topics, M.–St. Petersburg, July 7–14, 2002. Eds V.D. Selemir and L.N. Plyashkevich, VNIIEF, Sarov, 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 // Труды XII международной конференции Генерация мегагауссных магнитных полей и родственные эксперименты, Новосибирск, 13–18 июля 2008 г. Ред. Швецов Г. А., СО РАН, Новосибирск, 2010. С. 475–485.
3. Буйко А. М., Куделькин В. В., Кузьяев А. И., Мамышев В. И. и др. Влияние параметров взрывчатки на характеристики дискового ВМГ // Там же. 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 Int. Pulsed Power Conf., Eds. F. Peterkin and R. Curry. Washington, DC, USA, June 28–July 2, 2009. S.I., 2009. P. 215–220.
5. Буйко А. М., Гаранин С.Ф., Глыбин А. И. и др. Система с дисковым ВМГ для ускорения лайнероударников до скоростей  $\sim 20$  км/с // Труды Международной конференции XIII Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные

состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 14–18 марта 2011 г. Редактор Михайлов А. Л., ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2011. С. 488–495.

6. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В., Кудрявцева Н. А. и др. Расчеты магнитной имплозии лайнеров-ударников, ускоряемых до скоростей ~20 км/с // Там же. С. 549–556.

7. Sgro A. G., Atchison W. L. Simulation of Magnetically Driven Experiments // Ibid. P. 211–221.

8. Buyko A. M., Garanin S. F., Zmushko V. V. Magnetic Liner Implosion Simulations for the ALT-3 Experiment // Pres. at the XIV Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation Related Topics. Oct. 14–19, 2012, USA, Hawaii, Maui. ISBN: 978-1-4673-5720-7, 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 // Ibid. P. 252–260.

10. Буйко А. М., Гаранин С. Ф., Змушко В. В. К выбору геометрии лайнерного ПУ для эксперимента ALT-3 // Сборник докладов. Международная конференция XV Харитоновские тематические научные чтения «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны», РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, 18–22 марта 2013 г. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2013. С. 779–789.

11. Buyko A. M. Disc Explosive Magnetic Generator and Quasi-Spherical Liner Simulations with a 1D code // Proc. 2006 Int. Conf. Megagauss Magnetic Field Generation Related Topics, Nov. 5–10, 2006, Santa Fe, NM, USA. Eds Kiuttu G. F., Turchi P. J., Reinovsky R. E., IEEE, Inc., 2007. P. 287–292.

12. Буйко А. М. Электровзрывные размыкатели сильноточных взрывомагнитных генераторов // Труды Международной конференции XVI Харитоновские тематические научные чтения «Мощная импульсная электрофизика», РФЯЦ-ВНИИЭФ, 21–25 апреля 2014 г. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров. Настоящий сборник.

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. научных трудов. Москва–Арзамас-16, 1994.

14. Майлс А. Р. Комплексное моделирование систем ВМГ– мишень и новая тестовая задача по исследованию целостности лайнера // Сборник анн. Международная конференция XVI Харитоновские тематические научные чтения «Мощная импульсная электрофизика», РФЯЦ-ВНИИЭФ, 21–25 апреля 2014 г. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров, 2014. С. 68–69.