

УДК 537.63; 537.84

ЭЛЕКТРОВЗРЫВНЫЕ РАЗМЫКАТЕЛИ СИЛЬНОТОЧНЫХ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

А. М. Буйко

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
607188 Саров, Россия
E-mail: a.m.buyko@vniief.ru

Представлен обзор работ об электровзрывных фольговых размыкателях тока, применяемых для формирования в нагрузках взрывомагнитных генераторов импульсов тока до 100 МА (в экспериментах — до 45 МА), нарастающих за время $0,1 \div 10,0$ мкс. Рассмотрены физические схемы, модели и проведен анализ эффективности фольговых размыкателей тока экспериментальных и ряда разрабатываемых устройств.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, электровзрывной фольговый размыкатель тока, магнитогидродинамическое моделирование.

Введение. Электровзрывные размыкатели мегаамперных токов для взрывомагнитных генераторов (ВМГ) — это, как правило, фольговые размыкатели тока (ФРТ). Эксперименты проводились с дисковыми ВМГ (ДВМГ), а также с коаксиальными ВМГ и сильноточными спиральными ВМГ (СВМГ) с использованием цилиндрических Си-фольг [1–11] (рис. 1), а в последние годы — и гофрированных Си-фольг [12–14] (рис. 2). Фольга должна плотно прилегать к изолятору нагрузки, чтобы обеспечить наличие необходимой дугогасящей среды. Нагрев такой фольги током ВМГ приводит к ее взрыву — резкому увеличению сопротивления фольги и напряжения на ней, что обеспечивает быстрый “переброс” магнитного потока из ВМГ через фольгу в нагрузку. В индуктивных и лайнерных нагрузках ВМГ были получены экспериментальные токи $10 \div 45$ МА за времена $\tau_I^* = 1 \div 10$ мкс. (Характерные времена нарастания тока обычно оцениваются по формуле $\tau_I = I_m / (dI/dt)_m$, где I_m и $(dI/dt)_m$ — максимальные значения тока и его производной, или по формуле $\tau_{0,1} = t(0,9I_m) - t(0,1I_m)$, где $\tau_{0,1}$ — время увеличения тока с 0,1 до 0,9 его максимального значения.)

В работах [2–4, 8, 10, 12, 14–21] большое внимание уделялось численному моделированию ФРТ экспериментальных и разрабатываемых устройств. Расчеты ФРТ проводились, как правило, в одномерном магнитогидродинамическом (МГД) приближении, эффективность которого была показана ранее при анализе экспериментов с размыкателями тока из взрывающихся Си-проволочек [22].

В последнее время разрабатываются новые устройства с ДВМГ и ФРТ для таких направлений, как лайнерная физика, физика высоких плотностей энергии и свойства веществ в экстремальных условиях [12, 14, 20, 21]. В работе [20] рассматриваются также другие сильноточные системы с ФРТ.

В настоящей работе представлен обзор работ, в которых описаны сильноточные эксперименты с ВМГ и ФРТ и проведено моделирование ФРТ экспериментальных и близких к

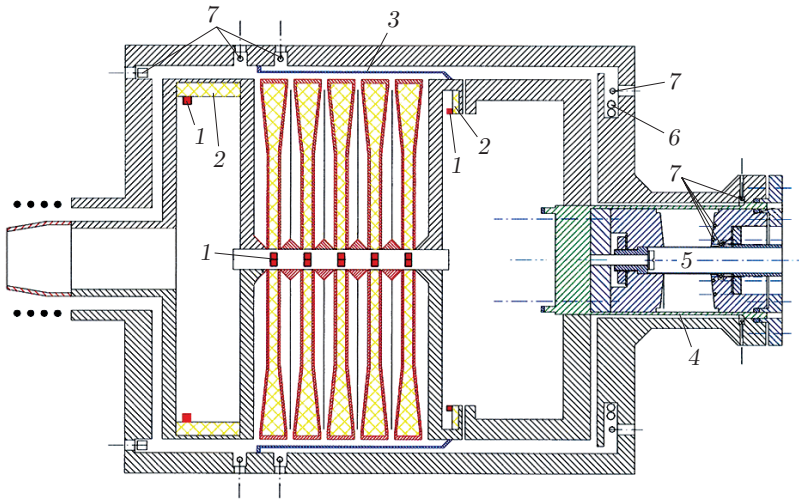


Рис. 1

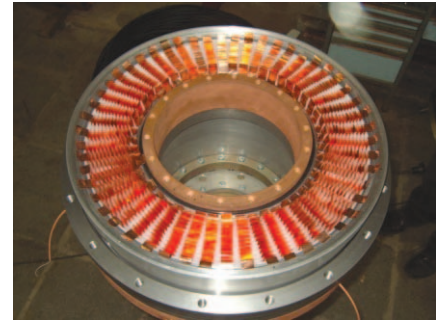


Рис. 2

Рис. 1. Схема устройства, используемого в экспериментах АЛТ-1, АЛТ-2 [8]:

1 — детонаторы; 2 — взрывные замыкатели тока (ВЗТ) для отключения СВМГ от ДВМГ (в момент t_0 начала сжатия полостей ДВМГ) и подключения нагрузки (в заданный момент времени t_{0l}); 3 — цилиндрическая Si-фольга ФРТ; 4 — лайнерный пондеромоторный узел (ПУ); 5 — центральный измерительный блок; 6, 7 — датчики для измерения токов и их производных

Рис. 2. Общий вид ФРТ с гофрированными Si-фольгами, размещенными на различных азимутах радиальной передающей линии и соединенными параллельно [13]

ним разрабатываемых устройств. Детально рассматриваются такие устройства с ДВМГ диаметром 0,4 м, разработанные и испытанные группой А. А. Петрухина при участии автора данной работы (см. [2, 8, 18, 20]).

1. Эксперименты с ВМГ и ФРТ. Эксперименты с ДВМГ проводились только во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ) в основном с цилиндрической Si-фольгой (см. рис. 1). В тестовых экспериментах [1] с 5-модульным ДВМГ диаметром 0,4 м и цилиндрической Si-фольгой высотой 33 см и толщиной 0,139 или 0,184 мм токи в ДВМГ достигали 85 и 90 МА, токи в индуктивных нагрузках (1,1 и 2,5 нГн) нарастали до 40 и 45 МА за времена $\tau_I = 2,6; 1,9$ мкс.

Серия экспериментов с 5-, 10- и 15-модульными ДВМГ диаметром 0,4 м и ФРТ проводилась с подключением лайнерной нагрузки взрывным замыкателем тока (ВЗТ) (см. рис. 1). Результаты экспериментов 2, 3, 4 приведены в табл. 1 (эксперимент 1 — один из тестовых экспериментов). В этих и других аналогичных экспериментах цилиндрический взрывающийся Al-лайнер массой 1 г (радиус 30 мм, толщина 0,2 мм, высота 10 мм) под действием токов $20 \div 35$ МА разгонялся до скоростей $20 \div 50$ км/с (приемный радиус 8 мм) [2, 18]. В экспериментах 3, 4 удалось измерить напряжение $U_f(t)$ на фольге при $t < t_{0l}$ и напряжение $U_k(t)$ на ВЗТ при $t > t_{0l}$. При проведении сравнения экспериментальных и расчетных данных это позволило выявить составляющие баланса магнитного потока в лайнерной нагрузке индуктивностью $L_l(t)$ с током $I_l(t)$:

$$U_f(t) = \frac{d(L_l I_l)}{dt} + U_l + U_{tl} + U_k, \quad t \geq t_{0l}, \quad I_l(t_{0l}) = 0 \quad (1)$$

(U_l, U_{tl} — расчетные напряжения на внешней поверхности лайнера и стенках линий, передающих ток от фольги к лайнеру (см. п. 2)). С использованием результатов измерения

Таблица 1

Характеристики устройств с ДВМГ и ФРТ диаметром 0,4 м в экспериментах с индуктивной нагрузкой (№ 1), с взрывающимся лайнером массой 1 г (№ 2–4) и с конденсированным лайнером массой 50 г (№ 5, 6), а также характеристики разрабатываемых устройств, которые могут быть использованы в экспериментах с конденсированным лайнером массой 50 г (№ 7, 8) и массой 75 г (№ 9–11)

Номер эксперимента	N	I_0 , МА	D_f , мкм	H_f , см	t_{0l} , мкс	U_{0l} , кВ	L_{0l} , нГн	$H_{ПУ}$, см	Материал стенок ПУ	I_{gm} , МА	τ_I , мкс	I_{lm} , МА	v_l , км/с	Источник
1	5	7,1	185	33	Без ВЗТ		2,45	—	—	90	1,9	44,5	—	[1]
2	5	7,4	185	50	19,7	—	2,30	2	Cu	65	1,0	32,0	38	[2]
3	10	7,3	155	90	18,7	—	7,70	2	Cu	50	1,2	27,5	37	[2]
4	15	5,9	155	108	19,9	100	10,10	2	Cu	59	1,0	35,5	51	[2]
5	10	5,9	120	72	18,4	50	7,50	15	Al	34	1,6	32,5	12	[8]
6	10	6,0	120	72	18,3	50	8,00	15	Al	35	1,4	31,3	12	[8]
7	7	7,0	180	50	19,2	20	3,50	6	Cu	64	1,5	46,0	16	[20]
8	7	6,0	180	72	Без ВЗТ		3,90	15	Al	73	1,8	40,0	13	[20]
9	15	7,0	180	108	Без ВЗТ		4,00	6	Cu	99	1,2	73,0	21	[20]
10	15	7,0	180	108	18,7	30	4,00	6	Cu	91	1,3	75,0	23	[20]
11	15	7,0	150	90	17,0	7	6,00	12	Cu	79	1,3	69,0	22	[21]

Примечание. N, I_0 — число модулей и начальный ток ДВМГ; D_f, H_f — толщина и высота цилиндрической Cu-фольги, t_{0l}, U_{0l} — момент срабатывания ВЗТ и напряжение на ФРТ в этот момент; L_{0l} — начальная индуктивность нагрузки; $H_{ПУ}$ — высота ПУ; I_{gm}, I_{lm} — максимальные токи в ДВМГ и нагрузке; τ_I — характерное время нарастания тока I_{lm} ; v_l — максимальная скорость лайнера.

напряжений $U_k(t)$ и результатов расчетов $U_{tl}(t)$ в [18] получены интерполяционные зависимости соответствующих эффективных омических сопротивлений Ω_k и Ω_{tl} от времени. Для эксперимента 4 (1988 г.)

$$\Omega_k(\tau) \approx \Omega_c + a_1 \exp(-a_2\tau), \quad \Omega_c = 1, \quad \Omega_{tl} \approx 0,6, \quad \tau_k \leq \tau \leq \tau_m, \quad \tau = t - t_{0l}. \quad (2)$$

Здесь $a_1 = 35$ мОм, $a_2 = 3$ мкс⁻¹ — коэффициенты; Ω_c — постоянная составляющая (превышающая величину Ω_{tl}), мОм; $\tau_k \approx 0,2$ мкс — длительность срабатывания ВЗТ до момента полного замыкания; $\tau_m \approx 1,8$ мкс — полное время нарастания тока в нагрузке. В эксперименте 4 также были измерены угловая асимметрия тока в нагрузке (12 %), угловая разновременность взрыва фольги (начало ее свечения — 20,0 ÷ 20,3 мкс) и электровзрывной пик давления в изоляторе нагрузки (44 кбар).

Результаты эксперимента 4 и расчетные данные, в том числе производные токов, хорошо согласуются [2, 18]. Это позволяет сделать вывод о достоверности других расчетных характеристик ФРТ и нагрузки, значения которых приведены в табл. 1, 2 и на рис. 3. Из рис. 3 следует, в частности, что момент возникновения тока в нагрузке ($t - t_0 = 19,9$ мкс) находится в интервале времен $t - t_0 = 19,55 \div 20,30$ мкс, границам которого (штриховые линии) соответствуют значения интеграла действия тока 1240 и 1950 МА²·мкс·см⁻⁴ (моменты начала и прекращения кипения меди при ее квазистатическом нагреве) [23]. В момент времени $t - t_0 = 21,0$ мкс достигаются максимумы производной тока в нагрузке (38 МА/мкс), электрического поля на фольге (3,9 кВ/см), давления на ее внешней поверхности (34 кбар), при этом фольга нагревается до 8 кДж/г, а ее сопротивление увеличива-

Таблица 2

Расчетные характеристики эффективности ФРТ в устройствах с N -модульными ДВМГ диаметром 0,4 м с ВЗТ и без ВЗТ [20]

N	Номер расчета (см. табл. 1)	E_{gm} , МДж	U_{fm} , кВ	W_{fm} , ТВт	S_{fm} , МДж	E_{lm} , МДж	q_{fm} , кДж/г	$\frac{\Omega_{fm}}{\Omega_{f0}}$	w_{fm} , ГВт/г	j_{fm}^2 , МА ² /см ⁴	q_m , кДж/г
10	6	10	200	3	10	5	5,8	120	4,4	425	8,3
7	—	12	140	5	13	5	7,0	115	5,2	530	10,9
7	8	15	170	7	14	7	6,4	100	4,2	620	7,9
15	4	24	425	10	10	6	8,0	130	7,0	830	12,0
15	10	33	250	17	39	13	6,5	140	4,7	630	10,0
15	9	41	330	21	37	17	7,8	140	7,9	960	12,0

Примечание 1. U_{fm} — пиковое напряжение на ФРТ; W_{fm} , S_{fm} — пиковая мощность и максимальная электромагнитная энергия, передаваемые через ФРТ в нагрузку; E_{gm} , E_{lm} — пиковые значения магнитной энергии в ДВМГ и нагрузке; q_{fm} , Ω_{fm}/Ω_{f0} — джоулев нагрев и относительное сопротивление фольги при пиковом напряжении на фольге; w_{fm} , j_{fm} — пиковые значения удельной мощности джоулевого нагрева и плотности тока в фольге; q_m — максимальный джоулев нагрев фольги.

Примечание 2. В 3-й и 6-й строках приведены характеристики работы ФРТ в устройствах без ВЗТ.

Таблица 3

Расчетные характеристики устройства АЛТ-2 и его возможных модификаций [20]

Номер расчета	Отличие от расчета 6	I_{gm} , МА	I_{lm} , МА	τ_I , мкс	U_{fm} , кВ	q_{fm} , кДж/г	$\frac{\Omega_{fm}}{\Omega_{f0}}$	j_{fm}^2 , МА ² /см ⁴	w_{fm} , ГВт/г	q_m , кДж/г
6	—	35,4	31,3	1,4	197	5,8	120	425	4,4	8,3
6а	УРС- σ	34,2	30,9	1,8	157	6,4	130	340	2,7	7,9
6б	$n_f = 1$	37,0	31,9	1,5	186	6,8	120	430	4,0	8,8
6с	$n_f = n_{ins} = 1$	38,6	32,9	2,2	144	7,6	110	425	2,9	9,2
12	$U_{0l} = 0$	44,0	35,4	1,6	215	5,9	130	425	4,9	8,6
13	$U_{0l} \rightarrow \infty$	34,0	—	—	357	8,2	140	510	11,3	15,7
14	$I_0 = 7$ МА	36,6	32,8	1,6	176	5,3	120	340	3,5	8,1
15	$L_{0l} = 4$ нГн	42,1	35,7	1,4	133	5,0	110	420	2,8	7,3
16	$D_f = 0,18$ мм	65,6	35,3	1,0	289	8,5	130	710	8,7	12,4

ется до 12 мОм (в 130 раз). В эксперименте 4 получена наибольшая эффективность ФРТ (см. табл. 2, 3). В нагрузку с индуктивностью 10 нГн была передана энергия 10 МДж с пиковой мощностью 10 ТВт при пиковом напряжении на фольге ≈ 425 кВ (скорости потерь магнитного потока в (1) составили $U_k \approx 52$ кВ, $U_{ll} \approx 13$ кВ, $U_l \approx 4$ кВ). Это максимальное напряжение, которое выдерживали изоляторы нагрузки в подобных экспериментах (в одном из них произошел пробой изолятора [18]).

В экспериментах АЛТ-1, АЛТ-2 [8] использовались 10-модульный ДВМГ диаметром 0,4 м, ФРТ и А1-лайнера (радиус и высота лайнера 40 мм, толщина 2 мм). Для выбора параметров устройства (см. рис. 1) было проведено приблизительно 100 численных экспериментов с использованием кода 1D(MHD)_n. Индуктивные датчики размещались по азимуту с интервалом 60°, что позволяло оценивать азимутальную асимметрию токов и получать осредненные по азимуту токи в ДВМГ $I_g(t)$ и нагрузке $I_l(t)$, которые были на 3 ÷ 5 % меньше токов, измеренных с помощью фарадеевских датчиков. С учетом погреш-

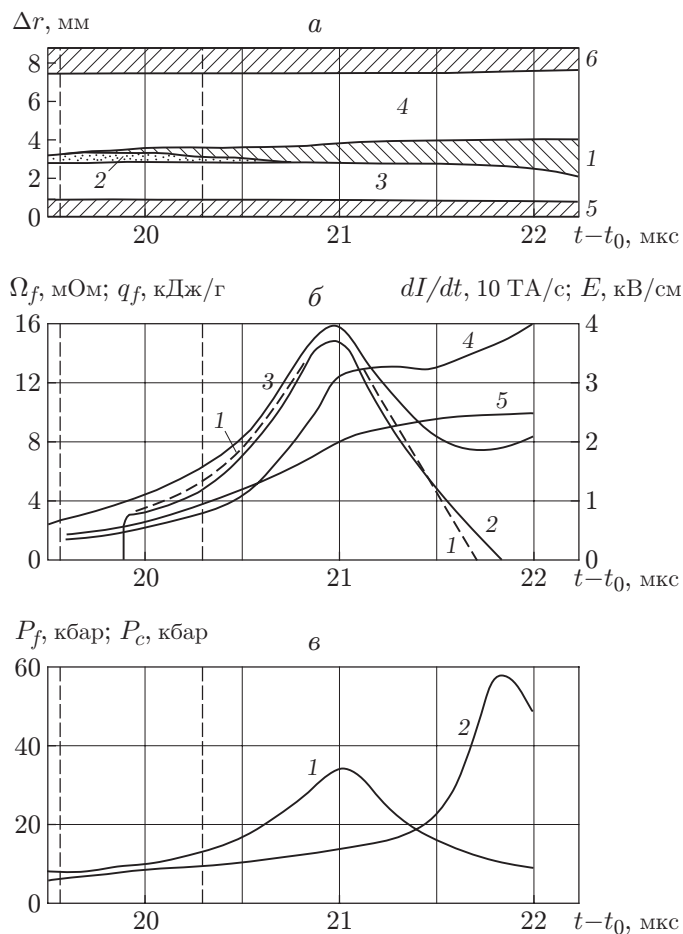


Рис. 3. Расчетные и экспериментальные зависимости характеристик ФРТ (эксперимент 4) от времени [2]:

a — расчетные зависимости положения границ слоев ФРТ от времени (1 — фольга, 2 — вакуум под фольгой, 3 — изоляторы ДВМГ, 4 — нагрузка, 5, 6 — внутренний и внешний токопроводы); *б* — зависимости электрических характеристик ФРТ от времени (1, 2 — производные тока в нагрузке dI/dt (1 — эксперимент, 2 — расчет), 3 — электрическое поле на фольге E , 4 — эффективное сопротивление фольги Ω_f , 5 — джоулев нагрев фольги q_f); *в* — расчетные зависимости давлений в изоляторе нагрузки от времени (1 — давление P_f вблизи фольги, 2 — давление P_c вблизи внешнего токопровода); вертикальные штриховые линии — значения $t - t_0$, при которых начинается и заканчивается процесс кипения

ностей измерений в экспериментах АЛТ-1 и АЛТ-2 максимальные токи в нагрузке равны $I_{lm} = (31,5 \pm 1,5) \text{ МА}$ и $I_{lm} = (30,0 \pm 1,3) \text{ МА}$ [8]. Результаты экспериментов свидетельствуют о стабильности работы таких устройств и удовлетворительно согласуются с результатами расчетов 5, 6 (см. табл. 1) токов и их производных (рис. 4).

В экспериментах с 3-модульным ДВМГ диаметром 240 мм и цилиндрической Си-фольгой высотой 15 см и общей толщиной 0,2 мм (1, 4 и 9 слоев в экспериментах 1, 2, 3) при токах ДВМГ 40, 39, 33 МА ($L_g = 1,6 \text{ нГн}$) получены токи в нагрузке 28, 23, 21 МА ($L_l = 1,5 \text{ нГн}$) за времена $\tau_{0,1} = 1,0; 0,8; 0,7 \text{ мкс}$ соответственно [9, 10]. В аналогичном эксперименте с 10-модульным ДВМГ [10] цилиндрическая фольга имела толщину 0,18 мм (9 слоев) и высоту 50 см. При токе ДВМГ 40 МА и индуктивной нагрузке 6,5 нГн получен ток 14 МА за время $\tau_{0,1} = 1,1 \text{ мкс}$. В эксперименте [11] с таким же устройством

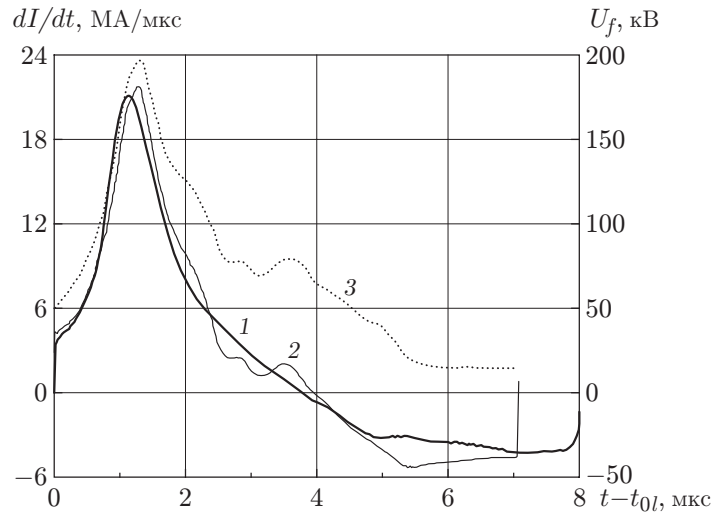


Рис. 4. Зависимости производной тока в нагрузке в эксперименте АЛТ-2 (1) и расчете 6 (2), а также расчетного напряжения на ФРТ (3) от времени [20]

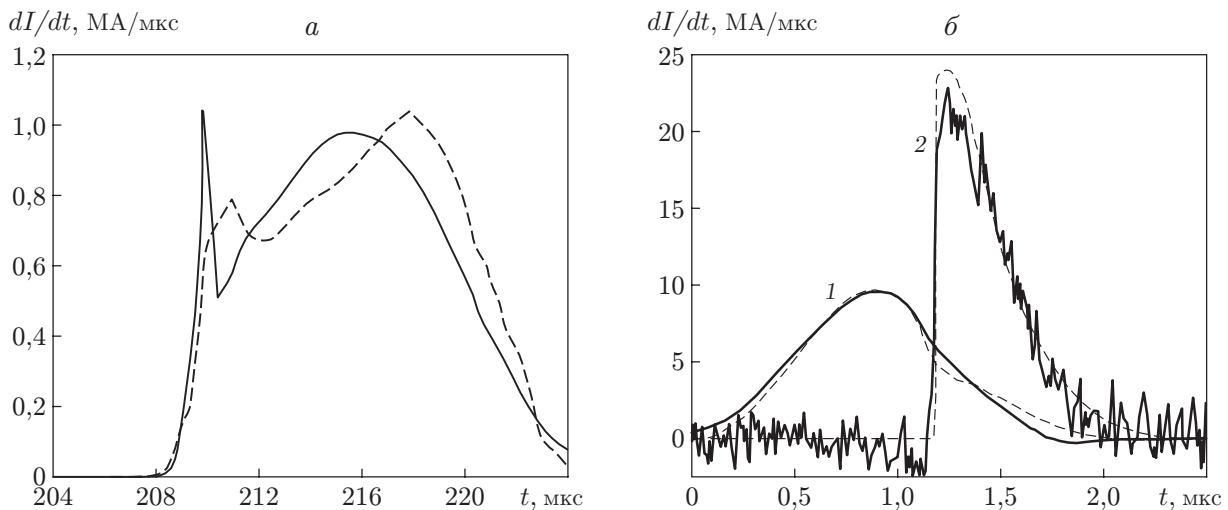


Рис. 5. Зависимости производной тока в нагрузке от времени: *а* — система СВМГ–ФРТ [3], *б* — система СВМГ–ВРТ–ФРТ [14]; сплошные линии — эксперимент, штриховые — расчет; 1 — зависимость, полученная в результате срабатывания первой ступени размыкателя, 2 — в результате срабатывания второй ступени размыкателя

при имплозии многопроволочного лайнера под действием тока 14 МА происходило мягкое рентгеновское излучение с энергией 0,8 МДж.

В эксперименте [12] с гофрированными Си-фольгами (см. рис. 2) при токе ДВМГ 20 МА (10 модулей диаметром 0,25 м) ток в нагрузке нарастал до 10 МА за время $\tau_{0,1} = 3$ мкс (толщина фольги 0,15 мм, высота 20 см, суммарная ширина 66 см).

В экспериментах с СВМГ [3] использовался СВМГ Mark-IX с цилиндрической Си-фольгой (три слоя толщиной по 25 мкм между слоями полиэфира толщиной 50 мкм) шириной 1 м и высотой 75 см. При индуктивной нагрузке 24 нГн получен ток 10 МА за время $\tau_I = 10$ мкс (рис. 5, *а*). В эксперименте с СВМГ диаметром 0,2 м использование гофрированной Си-фольги (см. рис. 2) обеспечило увеличение тока в индуктивной нагрузке (5,2 нГн) до 12,8 МА за время $\tau_I = 4,8$ мкс [13].

Для получения меньшего времени роста тока в нагрузках СВМГ применялись двухступенчатые размыкатели (вероятно, впервые испытанные в экспериментах [22]). В эксперименте [14] с СВМГ диаметром 0,24 м сначала взрывной размыкатель тока (ВРТ) обеспечил ток 9 МА за время $\tau_I = 1$ мкс, а затем ФРТ с гофрированными Cu-фольгами (см. рис. 2) обеспечил ток 8,5 МА за время $\tau_I = 0,4$ мкс. Ток 8,5 МА был измерен датчиками, размещенными в изоляторе нагрузки. (В вакуумной части нагрузки ток отсутствовал, вероятно, вследствие пробоя на поверхности изолятора, что учитывалось в расчете (рис. 5, б).)

Проведены эксперименты с коаксиальными ВМГ типа RANCHERO. В тестовом эксперименте ROS1 с модулем ВМГ высотой 43 см и цилиндрической Cu-фольгой (два слоя толщиной по 50 мкм) высотой 30 см и радиусом 22,8 см при токе ВМГ 30 МА ток в индуктивной нагрузке ($L_l = 5$ нГн) достигал 29 МА за время $\tau_{0,1} = 6$ мкс [5]. В аналогичных экспериментах RL2 и RL3 [6, 7] при высоте ВМГ 43 и 140 см, высоте цилиндрической Cu-фольги 30 и 45 см и токе ВМГ 26 МА в лайнерных нагрузках ($L_l = 5,0; 8,4$ нГн) получен ток 15 и 18 МА за времена $\tau_{0,1} = 7, 8$ мкс, при этом цилиндрические Al-лайнеры с внутренним радиусом 3,5 см и толщинами 1,6 и 2 мм (массой 39 и 49 г) были разогнаны до скоростей 6 и 6,8 км/с соответственно.

2. Моделирование ФРТ в устройствах с ВМГ. Устройства на основе ДВМГ (см. рис. 1) наиболее успешно моделируются с использованием кодов DISK-FL [18] и 1D(MHD) $_n$ [19–21], которые позволяют рассчитывать и предсказывать характеристики устройств с точностью порядка точности их измерения в экспериментах. Высокую эффективность кодов обеспечивают использование комплекса уравнение состояния (УРС) — уравнение электропроводимости (УРС- σ) Cu-фольги, подобранного в [22]; моделирование гидродинамики прилегающих к фольге слоев изоляторов; одномерные МГД-расчеты Cu-фольги и других токонесущих элементов устройства; двумерное моделирование взрывчатого вещества ДВМГ. Более широкие возможности имеет код 1D(MHD) $_n$ [19], предусматривающий совместное решение произвольного количества одномерных МГД-расчетов, связанных между собой и моделирующих основные токонесущие элементы устройства (в коде DISK-FL два таких расчета, моделирующих ФРТ и лайнер). Граничные условия для связанных одномерных МГД-расчетов определяются магнитными полями (токами):

$$H_k(R_i, t) = I_k(t)/(5R_i(t)), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad k = g, l, \quad (3)$$

где R_i — радиус, выбираемый для каждого i -го из n моделируемых элементов устройства — от стенки полости ДВМГ до лайнера пондеромоторного узла (ПУ) (для устройств типа ALT (см. рис. 1) $n = 13$: четыре расчета моделируют стенки полостей ДВМГ и прилегающей коаксиальной линии, ток $I_g(t)$; два расчета с токами $I_g(t)$ и $I_l(t)$ каждый — ФРТ с прилегающими коаксиальными линиями; три расчета — коаксиально-радиальную линию от ФРТ до ПУ; четыре расчета — лайнерный ПУ (всего семь расчетов с током $I_l(t)$); $I_g(t)$, $I_l(t)$ — токи, определяемые из уравнений баланса (1) магнитного потока в цепях ФРТ — лайнер и ДВМГ–ФРТ соответственно:

$$\frac{d[(NL_g + L_{gf})I_g]}{dt} + NU_g + U_{gf} + U_f = 0, \quad t \geq t_0, \quad I_g(t_0) = I_0, \quad (4)$$

$NL_g(t)$, $NU_g(t)$ — индуктивность полостей N -модульного ДВМГ и напряжение на их стенках; $L_{gf}(t)$, $U_{gf}(t)$ — индуктивность линии, передающей ток от полостей ДВМГ к фольге ФРТ, и напряжение на ее стенках; $U_f(t)$ — напряжение на фольге ФРТ. В уравнениях (1), (4) индуктивности и напряжения вычисляются по значениям $\delta_k(R_i, t)$, $E_k(R_i, t)$, $i = 1, 2, \dots, n$, $k = g, l$, полученным с помощью одномерного МГД-моделирования. Здесь $\delta_k(R_i, t)$ — смещения стенок устройства; $E_k(R_i, t)$ — электрические поля на этих стенках. Для моделирования в (4) ДВМГ — двумерного узла — используется два результата

двумерного расчета модуля ДВМГ (полученные заранее две табличные функции) [19]: индуктивность полости модуля $L_g(t)$ и минимальный радиус этой полости $R_{\min}(t)$, необходимый для вычисления напряжения $U_g(t)$ на ее стенках (в методике [18] — прямой двумерный расчет модуля).

Применяются также упрощенные модели устройств с ДВМГ и ФРТ. В работе [15] рассмотрено аналогичное представленному в [1] устройство на основе 5-модульного ДВМГ диаметром 1 м и проведено моделирование узлов этого устройства по формулам, выбранным с использованием экспериментальных и расчетных данных (включая ФРТ). ФРТ моделировался также в одномерном МГД-приближении с описанием Си-фольги в соответствии с [24]. Согласно [15] через ФРТ в нагрузку с индуктивностью 4 нГн может быть передан ток 116 МА с пиковым значением производной 85 МА/мкс при напряжении на фольге 318 кВ. В работе [10] индуктивность модуля ДВМГ $L_g(t)$ вычислена в предположении, что стенка полости движется в осевом направлении после мгновенной детонации на каждом радиусе независимо. Сопротивление ДВМГ $\Omega_g(t)$ находится исходя из предположения, что ток равномерно течет по скин-слою, проводимость которого определяется его удельным джоулевым нагревом. Индуктивности передающих линий и нагрузки считаются постоянными. В работах [12, 14] ДВМГ моделируется заданными функциями $L_g(t)$ и $\Omega_g(t)$, а лайнер рассматривается как сосредоточенная масса. В работах [10, 12, 14] Си-фольга ФРТ моделируется в одномерном МГД-приближении в соответствии с описанием меди, приведенным в [22]. В работе [17] для моделирования экспериментов с дисковым и коаксиальным ВМГ [8, 6] использовались нуль-мерный МГД-код CONFUSE и его одномерная МГД-модификация. Такое моделирование низкоиндуктивных устройств с ФРТ оказалось менее успешным по сравнению с моделированием систем на основе СВМГ.

Системы на основе СВМГ чаще моделировались в нуль-мерном приближении. Например, в [3, 4] при анализе результатов экспериментов применялся нуль-мерный МГД-код CONFUSE (см. рис. 5, а); для описания уравнения состояния и проводимости взрывааемых фольг использовалась база SESAME. В системах с СВМГ и двухступенчатыми размыкателями типа ВРТ–ФРТ характеристики Си-фольги в ФРТ рассчитывались в нуль-мерном [16] и одномерном [14] МГД-приближениях. В работе [16] использовались экспериментальные зависимости сопротивления ВРТ от времени и расчетные зависимости сопротивления ФРТ от интеграла действия тока; параметры расчетов выбирались близкими к параметрам в экспериментах включая эксперимент [25]. Согласно таким расчетам при токах батареи СВМГ $20 \div 40$ МА токи в контурах ВРТ–ФРТ (10 нГн) и ФРТ — лайнер (5 нГн) могут достигать $16 \div 21$ МА за время $\tau_I = 1$ мкс и $13 \div 17$ МА за время $\tau_I = 0,1$ мкс при напряжениях $0,6 \div 0,9$ МВ на ВРТ и $0,9 \div 1,9$ МВ на ФРТ соответственно (при этом цилиндрический лайнер массой 16 мг, имеющий радиус и высоту 5 см, может разогнаться до скоростей $360 \div 470$ км/с).

3. Эффективность ФРТ и его характеристики в устройствах с ДВМГ. Хорошее соответствие результатов экспериментов 4, 6 (см. табл. 1) и расчетов 4, 6 (см. рис. 3, 4) позволило экспериментально-расчетным путем выявить детальные характеристики этих экспериментальных устройств, подтвердить достоверность расчетной модели ФРТ и устройств в целом и надежно прогнозировать характеристики близких к ним разрабатываемых устройств (см. табл. 1–3, рис. 6) [18, 20].

Характеристики ФРТ и других узлов устройства АЛГ-2 получены в расчете 6. Работа ФРТ в целом как открывающего ключа показана на рис. 6, а. К моменту времени $t - t_{0l} = 20,7$ мкс индуктивности ДВМГ и нагрузки становятся равными (8 нГн), а ток в нагрузке нарастает до 28 МА (магнитный поток равен 0,23 Вб), при этом потери потока достигают 0,27 Вб (1/3 этих потерь происходит при $t < t_{0l}$, 2/3 — при $t > t_{0l}$, в основном через ВЗТ), а скорость этих потерь составляет 35 кВ. При пиковом токе в нагрузке ($t -$

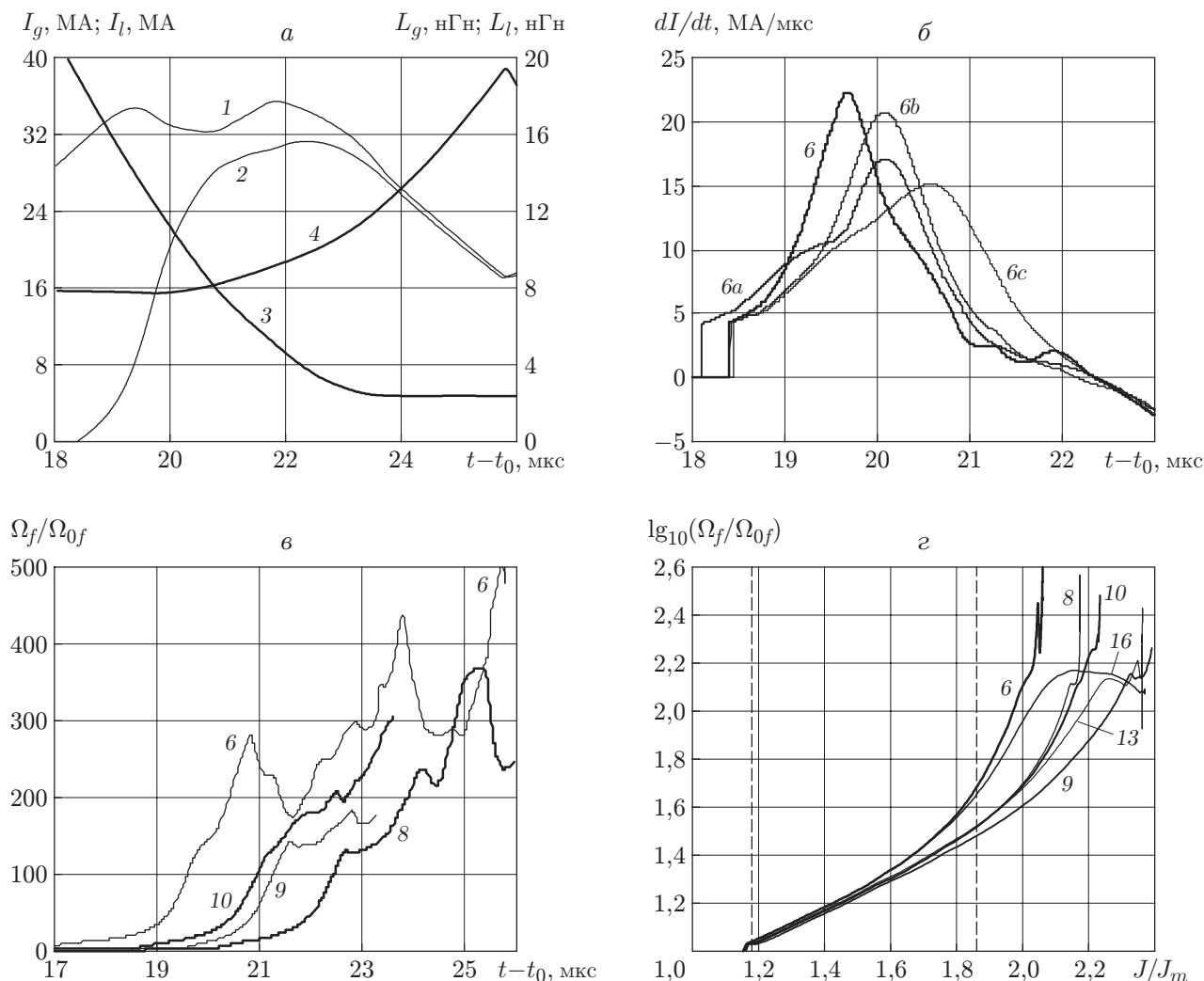


Рис. 6. Результаты расчетов параметров устройства ALT-2 (6) и его аналогов (8–10, 13, 16) (см. табл. 1, 3) [20]:

a — зависимости тока в ДВМГ и нагрузке (1, 2), а также индуктивности ДВМГ и нагрузки (3, 4) от времени, полученные в расчете 6; *б* — зависимость производной тока в нагрузке от времени (6, 6а, 6б, 6с — результаты расчетов 6, 6а, 6б, 6с (см. табл. 3)); *в* — зависимость относительного сопротивления фольги от времени; *г* — зависимость относительного сопротивления фольги от интеграла действия тока (вертикальные штриховые линии — значения J/J_m , при которых начинается и заканчивается процесс кипения (см. рис. 3))

$t_{0l} = 22,3$ мкс) ее индуктивность увеличивается на 2 нГн вследствие смещений лайнера и токонесущих стенок под действием давления магнитного поля. В эксперименте ALT-2 расчетные параметры ВЗТ близки к параметрам ВЗТ, полученным в эксперименте 4 (в (2) $\Omega_c = 0,5$ мОм).

Пиковые значения напряжения на Си-фольге 200 кВ и производной тока в нагрузке 22 МА/мкс (см. рис. 4, 6,б) достигаются одновременно ($t - t_0 = 19,7$ мкс) после достижения пика мощности джоулева нагрева Си-фольги 4,4 ГВт/г и максимального значения квадрата плотности тока в ней $425 \text{ MA}^2/\text{см}^4$; при этом средний нагрев фольги составляет 6 кДж/г, а ее сопротивление увеличивается в 120 раз (кривая 6 на рис. 6,в). В отличие от эксперимента 4 (кривая 4 на рис. 3,б) относительное сопротивление фольги монотонно

увеличивается до максимального значения, равного 280, при этом плотность фольги и ток в ней имеют локальные минимумы 1 г/см^3 и 4 МА соответственно.

Расчетные значения параметров устройства АЛТ-2 приведены в табл. 3. Расчеты ба, бб, бс (см. табл. 3, рис. 6, б) имеют следующие отличия от расчета б: в расчете ба используется комплекс УРС- σ , принятый в работе [24], в расчете бб пренебрегается МГД-процессами, происходящими в Си-фольге ($n_f = 1$, т. е. в фольге имеется одна счетная зона), в расчете бс, кроме того, пренебрегается гидродинамическими процессами в прилегающих слоях изоляторов ($n_f = 1$, $n_{ins} = 1$, как и в работах [3, 4]). Согласно расчету ба взрыв фольги происходит позднее, что противоречит расчету б и эксперименту (см. рис. 4). Таким образом, используемый комплекс УРС- σ оказывает существенное влияние на результаты расчетов. Комплекс УРС- σ , принятый в работе [22], дает более адекватное описание взрыва Си-фольги. Согласно расчету бс взрыв фольги происходит еще позднее, т. е. учет гидродинамических процессов, протекающих в слоях изоляторов ФРТ, очень важен.

Параметры устройства оказывают существенное влияние на эффективность работы ФРТ. Так, отсутствие ВЗТ приводит к увеличению тока в ПУ до $35,4 \text{ МА}$ (расчет 12) при взрыве фольги, параметры которого близки к параметрам, полученным в расчете б ($4,9 \text{ ГВт/г}$ и 215 кВ). Однако если цепь ФРТ-ПУ остается разомкнутой (расчет 13), то вследствие роста тока, текущего через фольгу, скорость ее нагрева резко увеличивается до $11,3 \text{ ГВт/г}$, что приводит к росту напряжения на фольге до максимального значения 357 кВ , при котором относительное сопротивление фольги увеличивается в 180 раз и в дальнейшем не растет (в отличие от расчета б (см. рис. 6, г)).

Увеличение начального тока ДВМГ с 6 до 7 МА или уменьшение индуктивности нагрузки с 8 до 4 нГн (расчеты 14, 15) приводит к росту тока в нагрузке до $32,8$ или $35,7 \text{ МА}$ соответственно. При этом взрыв фольги происходит медленнее вследствие уменьшения скорости ее нагрева до $3,5$ или $2,8 \text{ ГВт/г}$.

При увеличении толщины фольги с $0,12$ до $0,18 \text{ мм}$ (расчет 16) ее взрыв происходит на 2 мкс позднее, что соответствует времени окончания работы ДВМГ. Интенсивность нагрева фольги резко растет ($j_{fm}^2 \approx 700 \text{ МА}^2/\text{см}^4$, $w_f \approx 9 \text{ ГВт/г}$), что приводит к резкому увеличению максимального напряжения на ней до значения 290 кВ , при котором относительное сопротивление фольги достигает максимального значения, равного 130. В дальнейшем сопротивление не увеличивается существенно, так же как в эксперименте 4 (ср. кривую 16 на рис. 6, г и кривую 4 на рис. 3, б).

Устройства 7, 10 с 7- и 15-модульными ДВМГ, которые могут быть использованы в экспериментах, более эффективны по сравнению с применяемыми экспериментальными устройствами 6, 4 с 10- и 15-модульными ДВМГ (см. табл. 1, 2). В устройстве 10 значения I_{lm} и W_{fm} могут достигать $\approx 70 \text{ МА}$ и $\approx 20 \text{ ТВт}$, что почти в два раза больше, чем в устройстве, используемом в эксперименте 4, при меньшем пиковом напряжении на ФРТ (250 кВ вместо 425 кВ). В устройствах 6–10 при пиковых напряжениях на фольге ее нагрев и увеличение омического сопротивления достаточно близки: $6 \div 8 \text{ кДж/г}$ и $100 \div 130$. Однако в устройствах 9, 10 мощность нагрева фольги достигает $7 \div 8 \text{ ГВт}$, что близко к значениям, полученным в эксперименте 4, и существенно больше, чем в эксперименте 6. К настоящему времени отработаны все новые узлы и уточнены характеристики устройства 10 (устройства 11 в табл. 1) [21]. В частности, удалось уменьшить сопротивление ВЗТ до пренебрежимо малой величины $0,01 \text{ МОм}$ и получить в расчете 11 токи в лайнерной нагрузке до 69 МА и скорости лайнера до 22 км/с при увеличении индуктивности нагрузки с 4 до 6 нГн и потерь в ПУ вследствие увеличения его высоты с 6 до 12 см.

Режимы взрыва Си-фольги в расчетах 6, 4, соответствующих экспериментам 6, 4, существенно различаются (см. табл. 1, 2, рис. 3, 4). В этих режимах характеристики ин-

тенсивности нагрева фольги различаются почти в два раза: $j_{fm}^2 = 425, 830 \text{ MA}^2/\text{cm}^4$, $w_f = 4,4; 7,0 \text{ ГВт/г}$, что соответствует менее и более “быстрым” взрывам с качественно различными зависимостями напряжений на фольге и ее эффективных сопротивлений от времени. Так же различаются взрывы фольги в расчетах 8, 10 и 9, 13, 16 (см. табл. 3, рис. 6, в, г). Из рис. 6, г следует, что в различных расчетах увеличение сопротивления фольги с ростом интеграла действия тока одно и то же вплоть до конечной стадии кипения (в соответствии с используемой моделью меди); окончание кипения и взрыв фольги происходят по-разному, что определяется конкретными условиями и различиями механизмов парообразования.

Заключение. Представлен обзор работ, в которых приводятся характеристики сильноточных электровзрывных фольговых размыкателей тока, применяемых для обострения тока различных ВМГ. В большинстве работ в качестве ФРТ использовались цилиндрические Си-фольги, однако в последнее время применяются также гофрированные Си-фольги. Получены следующие результаты:

— приблизительно в 20 экспериментах с ДВМГ, выполненных во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики (ВНИИЭФ), токи в нагрузках увеличивались до $10 \div 45 \text{ MA}$ за время $\tau_I = 1 \div 2 \text{ мкс}$; взрывающийся лайнер массой $\approx 1 \text{ г}$ разгонялся до скоростей $20 \div 50 \text{ км/с}$, конденсированный лайнер массой 53 г — до скорости 12 км/с , при имплозии проволочного лайнера током 10 MA происходило мягкое рентгеновское излучение с энергией $0,8 \text{ МДж}$;

— в экспериментах Лос-аламосской национальной лаборатории (ЛАНЛ) с коаксиальным ВМГ ток нарастал до $15 \div 29 \text{ MA}$ за время $\tau_I = 6 \div 8 \text{ мкс}$; конденсированные лайнеры массой 39 и 49 г были разогнаны до скоростей 6 и $6,8 \text{ км/с}$;

— в экспериментах со спиральными ВМГ, выполненных в ЛАНЛ, ток нарастал до 10 MA за время $\tau_I = 10 \text{ мкс}$, до $2 \div 3 \text{ MA}$ — за время $\tau_I = 1 \text{ мкс}$; в экспериментах, проведенных во ВНИИЭФ, ток нарастал до 13 MA за время $\tau_I = 5 \text{ мкс}$, до $8,5 \text{ MA}$ — за время $\tau_I = 0,4 \text{ мкс}$; времена 1 и $0,4 \text{ мкс}$ были зафиксированы в экспериментах, в которых применялись двухступенчатые размыкатели.

Рассмотрены проблемы численного моделирования и исследована эффективность работы ФРТ экспериментальных и близких к ним по характеристикам разрабатываемых устройств с ДВМГ диаметром $0,4 \text{ м}$. В нагрузках этих устройств токи могут нарастать до 70 MA за $\approx 2 \text{ мкс}$, в результате конденсированные лайнеры массой 75 г могут разгоняться до $\approx 20 \text{ км/с}$. Результаты проведенного исследования могут быть использованы в лайнерной физике, а также при изучении свойств веществ при больших плотностях энергии.

Автор выражает благодарность С. Ф. Гаранину за сделанные замечания и В. Б. Якубову за обсуждение полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петрухин А. А., Голубев В. В., Данов В. М. и др. Результаты экспериментов по передаче энергии мегаджоульного диапазона из взрывамагнитного генератора с помощью фольгового размыкателя тока // Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–17 июля 1983 г. М.: Наука, 1984. С. 384–387.
2. Chernyshev V. K., Buyko A. M., Kostyukov V. N., et al. Investigation of electrically exploded large area foil for current switching // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., Inc., 1990. P. 465–470.

3. **Reinovsky R. E., Lindemuth I. R., Goforth J. H., et al.** High-performance, high-current fuses for flux compression generator driven inductive store power conditioning applications // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., Inc., 1990. P. 453–464.
4. **Lindemuth I. R., Reinovsky R. E., Goforth J. H.** Exploding metallic foil fuse modeling at Los Alamos // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., Inc., 1990. P. 269–274.
5. **Goforth J. H., Atchison W. L., Fowler C. M., et al.** Hydrodynamic liner experiments using the ranchero flux compression generator systems // Proc. of the 8th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Tallahassee (USA), 18–23 Oct. 1998. Singapore: World Sci. Publ. Co. Pte. Ltd, 2004. P. 485–488.
6. **Goforth J. H., Anderson W. A., Armijo E. V., et al.** Ranchero explosive pulsed power experiments // Dig. tech. papers of the 12th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (USA), 1999. S. l.: IEEE, Inc., 1999. P. 329–331.
7. **Goforth J. H., Atchison W. L., Herrera D. H., et al.** Ranchero status report 2012 / Los Alamos Nat. Lab. N LA-14463. Los Alamos, 2013.
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, July 2002. Sarov: VNIIEF, 2004. P. 747–751.
9. **Boriskin A. S., Vlasov Yu. V., Demidov V. A., et al.** Current pulse sharpening of multi-element disk generator with electric exploded opening switch // Dig. tech. papers of the 15th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (USA), 2005. S. l., 2009. P. 545–548.
10. **Boriskin A. S., Demidov V. A., Dimant E. M., et al.** Study of multi-element disk generator with electric-exploded opening switch // Proc. of the 11th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, London, 10–14 Sept. 2006. L.: Inst. Engng Technol., 2007. P. 188–191.
11. **Selemir M. D., Demidov V. A., Repin P. B.** Explosive soft X-ray radiation source EMIR // Proc. of the 13th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Suzhou (China), 6–19 July 2010. Chángshā: Press of Nat. Univ. of Defense Technol., 2012. P. 118–131.
12. **Ivanovsky A. V.** Explosive PW-power current source — myth or reality // Proc. of the 13th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Suzhou (China), 6–19 July 2010. Chángshā: Press of Nat. Univ. of Defense Technol., 2012. P. 32–43.
13. **Ивановский А. В., Чернышев В. К., Вахрушев В. В. и др.** Источник импульсной мощности со скоростью нарастания тока до 10^{14} А/с для разгона легких лайнеров до высоких скоростей на базе дискового ВМГ второго поколения // Сб. докл. Междунар. конф. “8-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 21–24 марта 2006 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2006. С. 563–566.
14. **Duday P. V., Vochkov E. V., Dudin V. I., et al.** Shaper of a current pulse of megaampere level with rise time of 100 ns // Proc. of the 18th Intern. pulsed power conf., Chicago (USA), June 19–23, 2011. S. l., 2011. P. 522–526.
15. **Буйко А. М., Буренков О. М., Гаранин С. Ф. и др.** Эффективность использования электровзрывных фольговых открывающихся ключей для дисковых ВМГ с энергией 100 МДж при различных индуктивных нагрузках // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 428–436.
16. **Buyko A. M., Burenkov O. M., Garanin S. F., et al.** On potential efficiency of ~ 20 MJ helical EMG two-stage current pulse opening switches for generation of ~ 20 MA current pulses

- with $\sim 0.1 \mu\text{s}$ front in liner load // Dig. tech. papers of the 12th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (USA), 1999. S. l.: IEEE, Inc., 1999. P. 867–871.
17. **Lindemuth I. R., Atchison W. L., Faeh R. J., et al.** Improved modeling of electrically exploded fuse opening switches in flux compression generator experiments // Dig. tech. papers of the IEEE pulsed power plasma science, Las Vegas (USA), June 17–22, 2001. S. l.: IEEE, Inc., 2001. P. 909–912.
 18. **Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И., Якубов В. Б.** Методика численного моделирования электровзрывных открывающих ключей и ее использование в экспериментах с дисковыми ВМГ // Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегатесла магнитных полей и родственными экспериментам, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 419–427.
 19. **Буико А. М.** Disc explosive magnetic generator and quasi-spherical liner simulations with a 1D code // Proc. of the Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Santa Fe (USA), Nov. 5–10, 2006. S. l.: IEEE, Inc., 2007. P. 287–292.
 20. **Буико А. М.** High-current systems with an electrically exploded foil opening switch (FOS) // Proc. of the 13th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Suzhou (China), 6–19 July 2010. Chángshā: Press of Nat. Univ. of Defense Technol., 2012. P. 263–272.
 21. **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.
 22. **Бакулин Ю. Д., Куропатенко В. Ф., Лучинский А. В.** Магнитогидродинамический расчет взрывающихся проводников // Журн. техн. физики. 1976. Т. 46, вып. 9. С. 1963–1969.
 23. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
 24. **Гаранин С. Ф., Мамышев В. И.** Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // ПМТФ. 1990. № 1. С. 30–37.
 25. **Volkov G. I., Buiko A. M., Vakhrushev V. V., et al.** Electromagnetik implosion of a tubular liner by helical EMJ with current open switch // Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., Inc., 1990. P. 699–701.

*Поступила в редакцию 16/X 2014 г.,
в окончательном варианте — 22/XII 2014 г.*