

УДК 537.84, 537.9, 537.639

ПРИМЕНЕНИЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ В ФИЗИКЕ ВЫСОКИХ ПЛОТНОСТЕЙ ЭНЕРГИИ

В. Д. Селемир, П. Б. Репин, В. А. Демидов, А. С. Борискин,
А. И. Быков, Г. В. Борисков, О. М. Таценко, А. С. Коршунов

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

E-mails: selemir@vniief.ru, repin@ntc.vniief.ru, demidov@ntc.vniief.ru,
boriskin@ntc.vniief.ru, bykov@ntc.vniief.ru, boriskov@ntc.vniief.ru,
tatsenko@ntc.vniief.ru, korshunov@ntc.vniief.ru

Описаны различные типы современных взрывомагнитных генераторов, принципы их работы, конструкции, основные характеристики. Рассмотрены области применения генераторов в физике высоких плотностей энергии. Изучены перспективы дальнейшего развития взрывомагнитных генераторов.

Ключевые слова: взрывомагнитный генератор, сверхсильное магнитное поле, изоэнтропическое сжатие, магнитокумулятивный генератор, мягкое рентгеновское излучение.

DOI: 10.15372/PMTF20190301

Введение. Поиски источников энергии, близких по запасу энергии к взрывчатым веществам (ВВ), приводят к необходимости использования электрического или магнитного поля. Однако запас удельной энергии в диэлектриках $\varepsilon_0 \varepsilon E^2 / 2$ (ε_0 , ε — диэлектрическая проницаемость вакуума и вещества; E — напряженность электрического поля) и магнетиках $\mu_0 \mu H^2 / 2$ (μ_0 , μ — магнитная проницаемость вакуума и вещества; H — напряженность магнитного поля) обычно невелик (приблизительно 100 Дж/л).

Таким образом, создание конденсаторных батарей, способных аккумулировать энергию порядка десятков мегаджоулей, является сложной задачей. Для ВВ удельная энергия равна $\rho D^2 / 16 \approx 10$ МДж/л (ρ — плотность ВВ; D — скорость волны детонации). Можно попытаться перевести эту энергию в энергию магнитного поля, одновременно увеличивая концентрацию энергии. Впервые эту идею предложил А. Д. Сахаров в 1952 г. Он показал, что при сохранении магнитного потока путем быстрого уменьшения индуктивности контура с током, сближая с помощью взрыва прямой и обратный проводники, можно преобразовать энергию ВВ в энергию магнитного поля, причем тем эффективнее, чем больше энергия поля по сравнению с джоулевым теплом.

А. Д. Сахаровым предложены два типа генераторов, реализующих магнитную кумуляцию: генераторы поля и генераторы энергии [1]. Развитие данных идей привело к созданию во Всероссийском научно-исследовательском институте экспериментальной физики



Рис. 1. Генератор МК-1

(ВНИИЭФ) уникальных приборов для проведения исследований в области физики высоких плотностей энергии — генератора сверхсильных магнитных полей МК-1 и линеек спиральных и дисковых взрывомагнитных генераторов, обеспечивающих в полезных нагрузках небольшого объема энергию порядка десятков мегаджоулей.

1. Генератор МК-1. На рис. 1 показан готовый к подрыву генератор МК-1. Генерация сверхсильных магнитных полей в генераторе МК-1 происходит следующим образом. Внутри проводящего цилиндра, окруженного зарядом ВВ, создается начальное магнитное поле, затем под действием продуктов взрыва ВВ цилиндр быстро сжимается, при этом магнитный поток сохраняется, а индукция поля увеличивается обратно пропорционально квадрату радиуса цилиндра. Современные генераторы МК-1, разработанные под руководством А. И. Павловского, позволяют воспроизводить магнитные поля с индукцией до 10 МГс в объемах порядка 10 см^3 . При этом плотность энергии достигает нескольких сотен килоджоулей в кубическом сантиметре. Максимальное значение напряженности магнитного поля, полученного с помощью генератора МК-1, составляет 28 МГс [2].

Генератор МК-1 позволяет проводить систематические исследования в фундаментальных областях физики — физике твердого тела (оптические, магнитные, транспортные и другие свойства веществ) и физике свойств веществ в экстремальных условиях. Максимальная плотность энергии магнитного поля превышает энергию внутрикристаллического обменного взаимодействия, что приводит к существенному изменению магнитной и электронной структуры твердых тел. При большом полезном объеме сверхсильного магнитного поля это позволяет проводить исследования с использованием современных методов регистрации оптических спектров поглощения и излучения, циклотронного резонанса, фарадеевского вращения, магнитной и электрической восприимчивости в широком диапазоне температур (до 4 К). В частности, исследования, проводимые в сильных магнитных полях, позволяют выявить новые фазовые состояния в конденсированных средах, определить эффективную массу и концентрацию подвижных носителей заряда в полупро-

водниках и полупроводниковых наноструктурах, константы взаимодействия в веществах с магнитным упорядочением, максимальную напряженность магнитного поля, критическую силу тока в сверхпроводниках и т. д.

ВНИИЭФ является признанным мировым лидером в проведении подобных исследований. В 1996–1997 гг. с использованием генератора МК-1 проведена серия экспериментов “Дирак” [2] на площадке Лос-Аламосской национальной лаборатории (США), а в 1997–2006 гг. — международные научно-практические семинары “Капица” [2].

Другим направлением исследований, проведенных с использованием генератора МК-1, является изучение свойств веществ при их изоэнтропическом сжатии сверхсильным магнитным полем до давлений в них порядка нескольких мегабар. Такие исследования имеют как прикладной, так и теоретический характер. В частности, исследование физических свойств веществ, составляющих планеты Солнечной системы, позволяет проверить теоретические представления и оценить правильность существующих гипотез о происхождении, строении и развитии Земли и других планет. Высокие давления могут вызывать фазовые переходы и полиморфные превращения. Представляют интерес исследования, проводимые в области низких температур и необходимые не только для понимания строения и эволюции планет-гигантов, но и для проверки фундаментальных теорий. Особую актуальность имеет построение нулевых изотерм изотопов водорода — протия и дейтерия, а также гидридов металлов, льда и воды. Это обусловлено широким распространением водорода во Вселенной, а также его практической значимостью как одного из основных элементов энергетики будущего.

В настоящее время лишь метод изоэнтропического сжатия позволяет эффективно определять характеристики вещества в области низких температур и сверхвысоких давлений. В генераторе МК-1 внутри полого проводящего цилиндра коаксиально располагаются цилиндрические слои исследуемого и эталонного (как правило, алюминия) веществ. В ходе эксперимента выполняется два рентгеновских снимка: предварительный (до начала эксперимента, когда все вещества имеют известную плотность) и в один из моментов времени после подрыва заряда ВВ (рис. 2). После денситометрирования этих рентгеновских снимков определяется степень сжатия всех веществ, находящихся внутри проводящего цилиндра. Зная степень сжатия эталонного вещества, по его известному уравнению состояния можно определить давление, в частности, в исследуемом образце.

Полученные указанным способом (P - ρ)-диаграммы водорода и дейтерия, которые в настоящее время соответствуют практически “эталонным” точкам на фазовой диаграмме, приведены в работе [3], (P - ρ)-диаграмма гидрида лития природного состава — в работе [4].

В последнее время метод изоэнтропического сжатия с помощью сверхсильного магнитного поля генератора МК-1 был распространен на тяжелые вещества. В работе [5] представлена (P - ρ)-диаграмма сплава ВММ-3-2.

2. Взрывомагнитные генераторы энергии. Развитие во ВНИИЭФ предложенного А. Д. Сахаровым способа преобразования энергии взрыва в электрическую энергию привело к созданию мощных источников энергии, обеспечивающих в полезных нагрузках импульсы тока с амплитудой, достигающей сотни мегаампер, и энергией, составляющей десятки мегаджоулей. В настоящее время наибольшее распространение получили два типа таких взрывомагнитных генераторов (ВМГ) спиральные и дисковые.

2.1. Спиральные ВМГ. Спиральные генераторы, являющиеся наиболее часто используемыми взрывными генераторами, имеют существенно бóльшую по сравнению с ВМГ других типов индуктивность, высокую скорость ее вывода (уменьшения) и поэтому эффективно работают на нагрузки с широким диапазоном индуктивности и сопротивления. Схема спирального ВМГ показана на рис. 3.

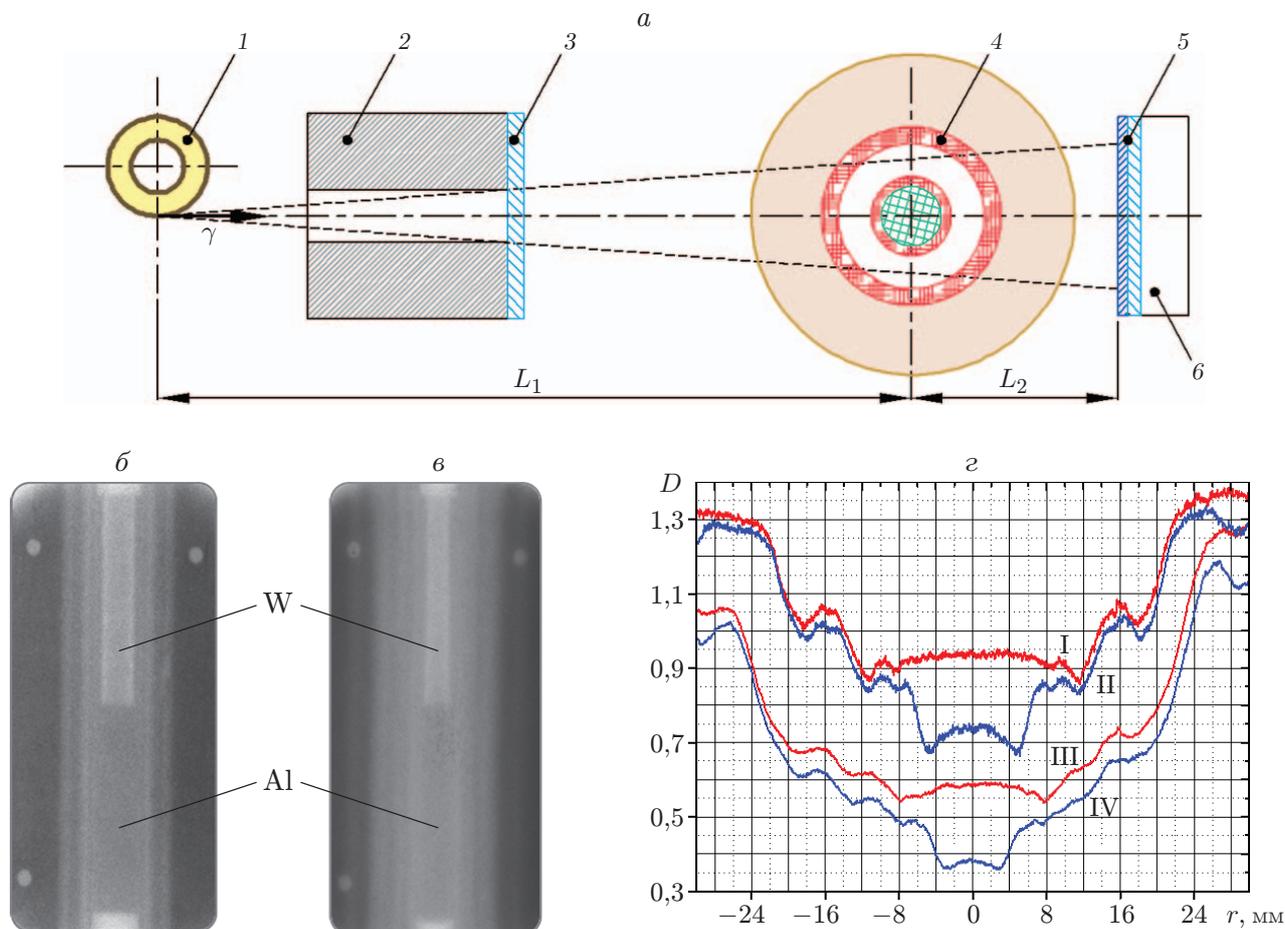


Рис. 2. Схема импульсной рентгенографической установки (а), начальная (б) и полученная в процессе сжатия (в) рентгенограммы и их денситограммы (z): 1 — бетатрон, 2 — канал вывода излучения с коллиматором, 3 — защита коллиматора, 4 — объект рентгенографирования, 5 — защита регистратора, 6 — регистратор; I, III — алюминий, II, IV — вольфрам; I, II — до сжатия, III, IV — в процессе сжатия; D — степень почернения, r — радиус образцов сжимаемых веществ

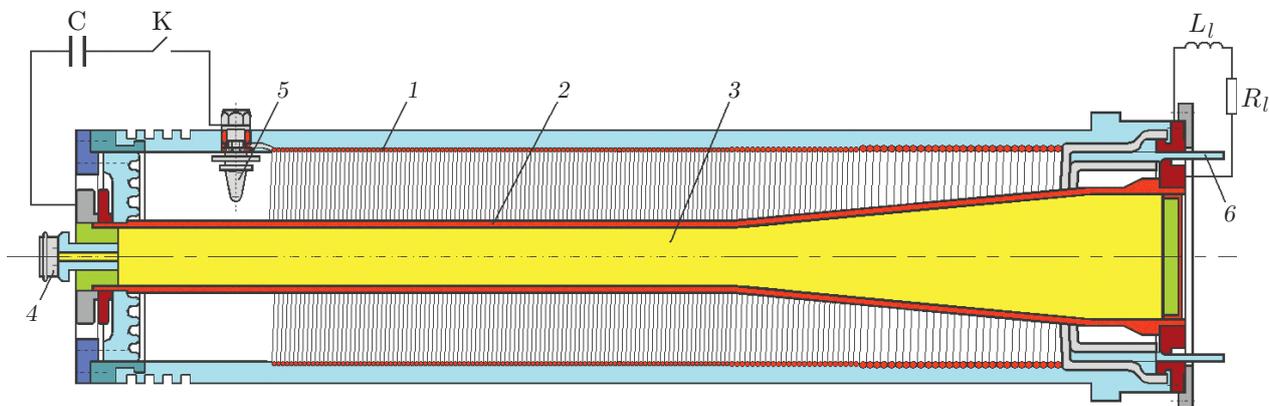


Рис. 3. Схема спирального ВМГ:
1 — спираль (статор), 2 — центральная металлическая труба (лайнер), 3 — заряд ВВ, 4 — электродетонатор, 5 — замыкающий ключ (кроубар) для шунтирования источника начального тока, 6 — изолятор, С — конденсаторная батарея, К — разрядник, L_1 , R_l — индуктивность и сопротивление нагрузки

Таблица 1

Характеристики спиральных ВМГ

Тип ВМГ	E_0 , кДж	L_n , нГн	I_n , МА	E_n , МДж	τ_e , мкс
ВМГ-50	0,02	25	1	0,012	3
ВМГ-60	0,03	1200	0,045	0,0012	2
ВМГ-80	0,09	40 ÷ 45	1,4 ÷ 1,7	0,045 ÷ 0,058	4,5 ÷ 5,0
ВМГ-100	5	25	6,5	0,5	9
ВМГ-200	8 ÷ 9	100 ÷ 110	6 ÷ 7	2 ÷ 3	17
ВМГ-240	130	200	9,2	8,5	28
ВМГ-280	105	200	10	10	32
ВМГ-320	120 ÷ 200	300	10	15	38

Примечание. E_0 — энергия запитки генератора, L_n , I_n , E_n — индуктивность, сила тока и энергия нагрузки, τ_e — характерное время нарастания тока в нагрузке.

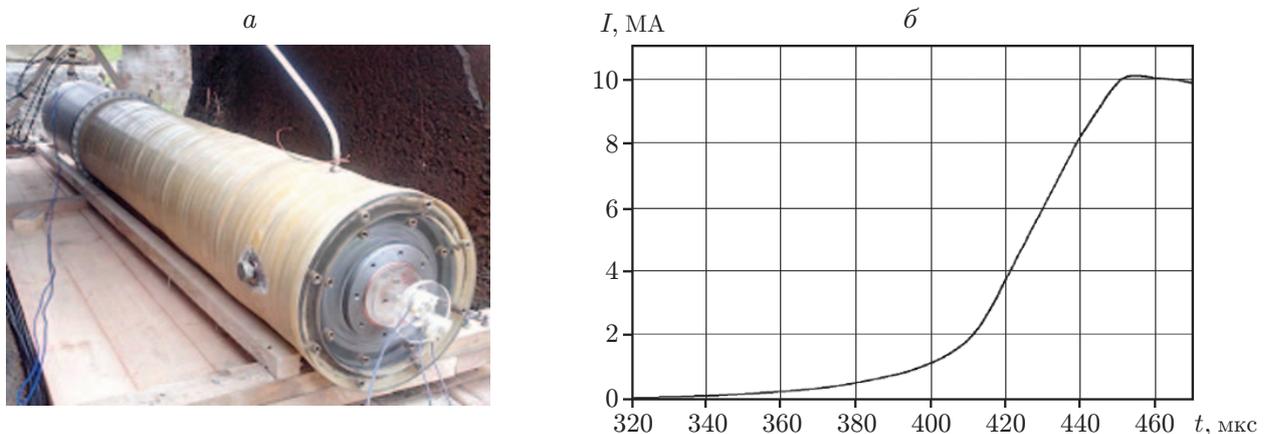


Рис. 4. ВМГ-280:

a — внешний вид, *б* — зависимость силы тока от времени

Основными элементами спирального ВМГ являются расположенные коаксиально цилиндрический соленоид и металлическая труба с зарядом ВВ, электрически соединенные через нагрузку. Магнитный поток, создаваемый в объеме генератора внешним источником энергии, сжимается изготовленной из мягкой меди или мягких сплавов алюминия центральной трубой, которая при инициировании заряда ВВ на противоположном относительно нагрузки торце разлетается под действием продуктов детонации в виде конуса, перемещающегося вдоль оси устройства со скоростью, равной скорости детонации. Генерирование магнитной энергии в спиральном ВМГ происходит за счет работы, совершаемой при разлете центральной трубы в области давления магнитного поля.

В научно-производственном центре физики (НПЦФ) ВНИИЭФ разработаны спиральные ВМГ со спиральными катушками, внутренний диаметр которых составляет от 60 до 320 мм (табл. 1). Одними из наиболее мощных спиральных ВМГ, созданных в России, являются генераторы с внутренними диаметрами спиральной катушки, равными 240, 280 и 320 мм [6]. По удельной энергии эти генераторы превосходят зарубежные аналоги в 2–3 раза, по коэффициенту усиления энергии — в 10–20 раз и по быстроходности — приблизительно в два раза.

На рис. 4 представлены ВМГ-280 и зависимость выходного тока этого генератора от времени. При начальной энергии, равной 105 кДж, ВМГ-280 обеспечивает в нагрузках с индуктивностью 200 нГн силу тока до 10 МА. Максимальная производная силы тока равна

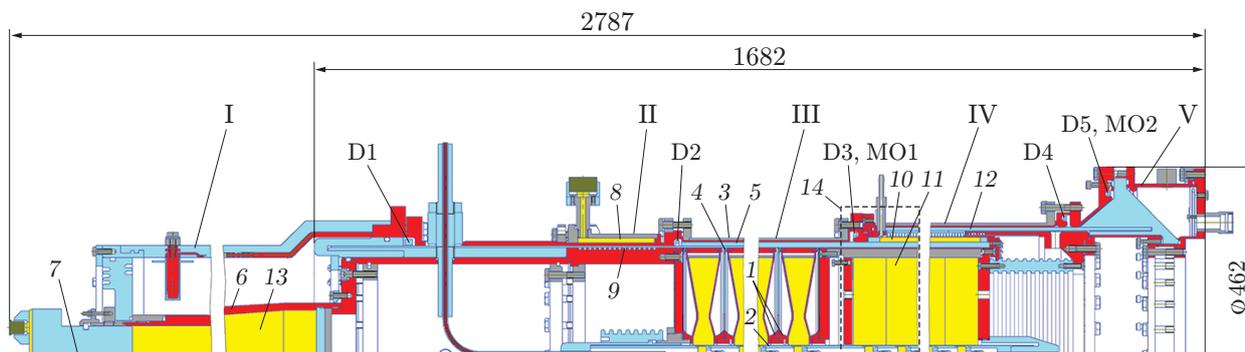


Рис. 5. Схема взрывного источника импульсной мощности:

I — спиральный ВМГ-240, II — узел отключения предусилителя, III — дисковый ВМГ-240, IV — взрывной размыкатель тока, V — индуктивная нагрузка; 1 — конус, 2 — устройство инициирования, 3 — корпус, 4, 5, 9, 12 — изоляторы, 6 — центральная труба, 7 — взрывная линия задержки, 8, 10, 11, 13 — заряды ВВ, 14 — расчетная область; D1–D5 — группы индукционных датчиков, МО1, МО2 — магнитооптические датчики

Таблица 2

Характеристики ДВМГ

Тип ДВМГ	E_0 , МДж	L_H , нГн	I_H , МА	E_H , МДж	τ_e , мкс	Примечание
ДВМГ-240-3	0,36	1,5	60	2,7	3	Эксперимент
ДВМГ-240-10	0,72	5,0	44	4,8	≈ 4	Эксперимент
ДВМГ-240/600-15	2,30	14,0	50	17,0	≈ 4	Эксперимент
ДВМГ-480-5	4,70	7,0	100	35,0	7	Эксперимент
ДВМГ-480-15	15,00	22,0	100	100,0	≈ 7	Расчет

$3,5 \cdot 10^{11}$ А/с, характерное время нарастания тока — 32 мкс, величина магнитной энергии, запасенной в нагрузке, — 10 МДж. Мощность генератора составляет 400 ГВт.

2.2. *Дисковые ВМГ.* В дисковых ВМГ (ДВМГ) уменьшение начальной индуктивности генератора происходит за счет одновременного схлопывания достаточно большого количества малых полостей между профилированными дисковыми элементами, внутри которых находятся синхронно подрываемые заряды ВВ, что обеспечивает существенно меньшее время срабатывания (быстродействие) I/\dot{I} по сравнению со спиральными ВМГ. Схема ДВМГ с формирователем импульса тока приведена на рис. 5. Начальный магнитный поток в дисковых ВМГ обычно создается с помощью спиральных ВМГ. При достижении в дисковом генераторе магнитного потока заданной величины предусилитель отключается и контур генератора замыкается, захватывая введенный таким образом магнитный поток. В тот же момент с помощью осевой системы инициирования в синхронном режиме подрываются заряды ВВ. Схлопываясь под действием продуктов взрыва, токопроводящие дисковые пластины сжимают магнитный поток во всех полостях одновременно и вытесняют его из полостей сжатия через передающую линию в нагрузку. Форма токопроводящих пластин выбрана с учетом условий отсутствия электрических пробоев и обеспечения минимального характерного времени нарастания тока на конечном этапе работы ДВМГ.

В настоящее время в НПЦФ ВНИИЭФ создана серия многоэлементных дисковых ВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм (ДВМГ-240) и 480 мм (ДВМГ-480), характеристики которых представлены в табл. 2. При подаче энергии на реальные нагрузки получены следующие значения параметров: коэффициент усиления энергии — 8, характерное время нарастания тока — $3 \div 7$ мкс, выходная энергия — более 30 МДж.

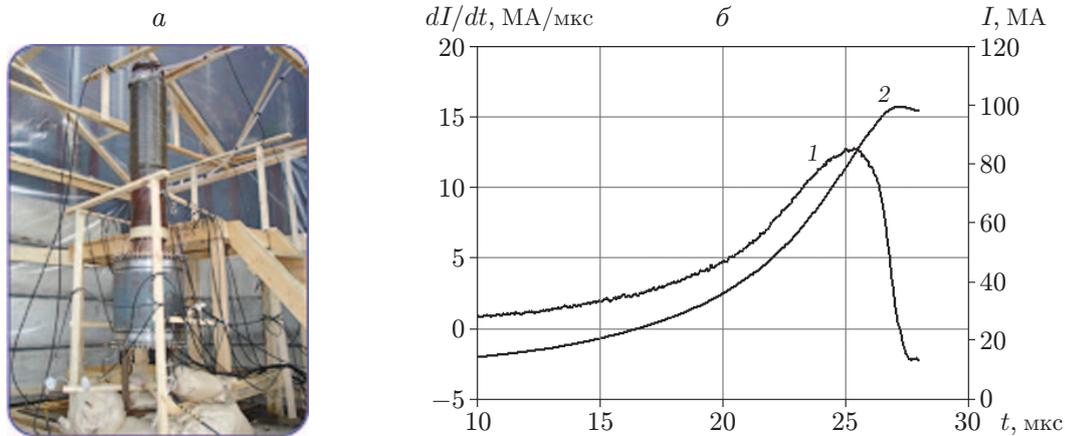


Рис. 6. ДВМГ-480-5:

a — внешний вид, *б* — зависимости производной силы тока (1) и силы тока (2) от времени

В ходе испытаний ДВМГ-480-5 (рис. 6) при подаче тока 10,2 МА (начальная энергия равна 4,7 МДж) зарегистрирован ток порядка 100 МА с характерным временем нарастания 7 мкс. Магнитная энергия в нагрузке с индуктивностью 7 нГн составила приблизительно 35 МДж.

2.3. Применение спиральных и дисковых ВМГ. Основной областью применения спиральных и дисковых ВМГ является использование их в составе взрывных систем импульсной мощности, обеспечивающих высокую плотность энергии в нагрузочных узлах. Спиральные ВМГ используются в таких системах в качестве как основного источника энергии, так и предусилителя, обеспечивающего запитку ДВМГ. В последнем случае для снижения теплового и механического воздействия тока на элементы ДВМГ в качестве предусилителя необходимо использовать быстроходный спиральный генератор с малым характерным временем нарастания тока. Для увеличения мощности импульсных взрывных систем время нарастания импульса тока требуется уменьшить до микросекундного уровня. Для этого применяется схема коммутации, в которой нагрузка и накопительный контур ВМГ, снабженный размыкателем тока, включены параллельно. В НПЦФ ВНИИЭФ разработаны и применяются взрывные (ВРТ) и электровзрывные (ЭВРТ) размыкатели тока [7, 8].

Результаты испытаний ряда взрывных систем импульсной мощности (см. рис. 5) на индуктивную нагрузку приведены в табл. 3, из которой следует, что современные системы импульсной мощности на основе ДВМГ-240 и ДВМГ-480 обеспечивают в нагрузках с практически значимой индуктивностью импульсы тока с амплитудой, составляющей десятки мегаампер, при времени нарастания импульса не более 1 мкс [8, 9].

2.4. Генерация импульсов мягкого рентгеновского излучения. Одним из направлений применения взрывных систем импульсной мощности, развиваемых в НПЦФ ВНИИЭФ, является запитка цилиндрических многопроволочных лайнерных систем, при токовой имплозии которых генерируется мощный импульс мягкого рентгеновского излучения (МРИ). Такие источники МРИ используются при исследовании пробегов излучения в плазме для астрофизических приложений, зажигания термоядерных мишеней и других процессов, происходящих при высокой плотности энергии. Результаты исследований генерации МРИ приведены в табл. 4.

В экспериментах использовались одно- и двухкаскадные лайнеры из вольфрамовых проволочек диаметром $4 \div 15$ мкм, изготавливаемые по специально разработанной техно-

Таблица 3

Результаты испытаний и расчетов параметров взрывных систем импульсной мощности на индуктивную нагрузку

Тип усилителя энергии	Параметры обострителя		L_n , нГн	I_n , МА	τ , мкс	Примечание
	Диаметр, мм	Длина, мм				
СВМГ-200+ДВМГ-240-5	290	240	6,8	9,3	0,57	Эксперимент
СВМГ-240+ДВМГ-240-10	290	360	16,0	10,0	0,55	Эксперимент
СВМГ-240+ДВМГ-240/600-15	600	750	15,0	20,0	1,00	Эксперимент
СВМГ-240+ДВМГ-480-5	560	700	17,0	15,0	0,80	Эксперимент
СВМГ-320+ДВМГ-480-15	1200	1500	25,0	40,0	0,80	Расчет

Примечание. τ — время нарастания тока в нагрузке от значения, составляющего 0,1 максимальной амплитуды, до значения, составляющего 0,9 максимальной амплитуды.

Таблица 4

Результаты экспериментов по генерации импульсов МРИ

Тип системы импульсной мощности	Параметры вольфрамового лайнера			L_{0n} , нГн	I_n , МА	τ , мкс	W , кДж
	Число каскадов	Число проволочек	Начальный диаметр, мм				
СВМГ-200+ВРТ-200	1	200	60	15,0	5,0	0,40	180
ДВМГ-240-10+ЭВРТ	2	720 ÷ 360	200 ÷ 140	6,5	14,0	1,10	800
СВМГ-200+ВРТ-200	2	240 ÷ 120	60 ÷ 40	22,0	3,6	0,45	75
ДВМГ-240/600-15+ВРТ-600	1	680	60	18,0	4,3	0,90	250

Примечание. L_{0n} , I_n — индуктивность и сила тока лайнерной системы, W — энергия импульса МРИ.

логии, обеспечивающей неизменность геометрии лайнеров при их перевозке и монтаже на взрывной позиции.

При использовании 10-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм и ЭВРТ в лайнерах получены токи порядка 14 МА с характерным временем нарастания 1,1 мкс, что является российским рекордом. Энергия МРИ составила приблизительно 0,8 МДж [10]. В дальнейшем планируется применение ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм с количеством элементов от 5 до 15 и ВРТ. При этом токи в лайнере должны составить приблизительно 50 МА с временем нарастания 0,5 ÷ 1,0 мкс. Согласно результатам расчетов энергия МРИ при таких параметрах тока должна составлять более 10 МДж, что позволит проводить эксперименты по зажиганию термоядерных мишеней.

На рис. 7 приведены характеристики источников тока, перспективных для зажигания термоядерных мишеней. В работе [11] полагается, что для зажигания таких мишеней следует сформировать в лайнерной нагрузке импульс тока с амплитудой 60 ÷ 100 МА при времени нарастания, близком к 0,1 мкс. Для этого на стационарных установках необходимо обеспечить увеличение амплитуды тока в 2–3 раза при достигнутых временных параметрах импульса. Следует отметить, что современные взрывные системы импульсной мощности создают импульсы тока с амплитудой, существенно превышающей требуемую (см. рис. 7). В настоящее время разрабатываются методы уменьшения времени нарастания импульсов тока, генерируемых взрывными источниками энергии. Таким образом, взрывные системы импульсной мощности являются альтернативой стационарным установкам, используемым в физике высоких плотностей энергии.

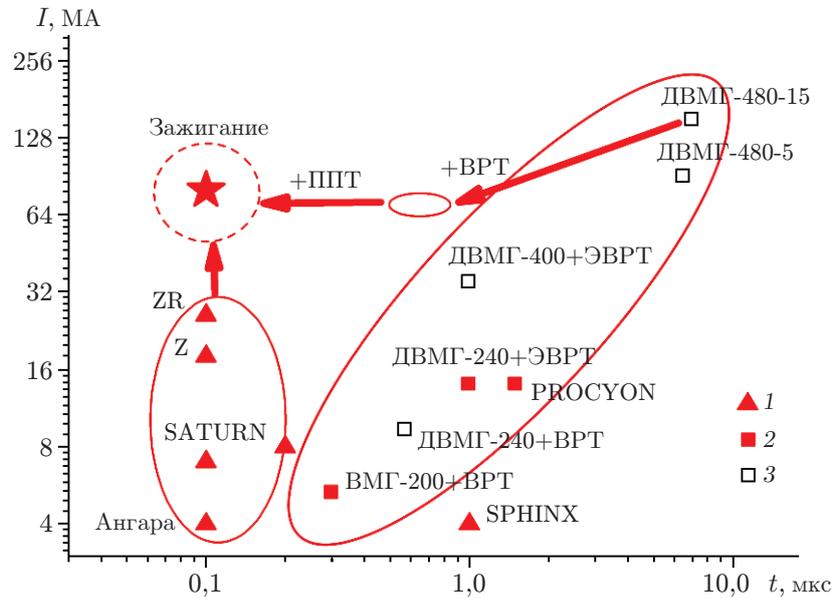


Рис. 7. Характеристики источников тока, используемых для зажигания термоядерных мишеней:

1 — стационарные установки, 2 — взрывные установки, 3 — источники тока типа ДВМГ; ППТ — плазменный прерыватель тока; стрелки — способы совершенствования установок

Энергия, генерируемая взрывными источниками, составляет порядка 10 МДж, поэтому, несмотря на то что эти источники могут быть использованы только один раз, затраты на проведение экспериментов на взрывных и стационарных установках являются сопоставимыми. Это обусловлено необходимостью частичной или полной замены нагрузочных узлов стационарных установок, в которых выделяемая энергия эквивалентна массе ВВ, составляющей несколько килограммов.

2.5. *Взрывные системы импульсной мощности для ускорения плоских ударников и изоэнтропического сжатия в цилиндрической геометрии.* Одним из способов определения параметров уравнений состояния веществ при высокой плотности энергии является обработка результатов измерения волновых и массовых скоростей в мишени при ударе по ней пластины, движущейся со скоростью, равной нескольким километрам в секунду, а также при изоэнтропическом сжатии вещества давлением порядка единиц или десятков мегабар.

Результаты расчетов [12] показывают, что спиральные ВМГ типа ВМГ-200 и ВМГ-240 могут обеспечить устойчивый разгон алюминиевых пластин с размерами сечения 5×5 см до скоростей 4 км/с, медных — до скоростей 3 км/с. При этом не нарушаются ограничения на смещение пластин и толщину скин-слоя, что позволяет сохранить в твердом состоянии поверхность пластины, соударяющейся с мишенью. Увеличение скорости до 10 км/с обеспечивают взрывные системы импульсной мощности на основе многоэлементных ДВМГ-480 с размыкателями тока.

Эффективной для осуществления квазиизоэнтропического сжатия веществ давлением, составляющим десятки мегабар, является схема, обеспечивающая схлопывание двухслойной цилиндрической оболочки под действием давления магнитного поля, возникающего при протекании по ней тока [13]. Схема опробована на установке ZR в Сандийских национальных лабораториях (США). Показана возможность квазиизоэнтропического сжатия



Рис. 8. Искровые каналы на поверхности грунта

образцов давлением $10 \div 20$ Мбар при запитке цилиндрической сборки импульсом тока с амплитудой 15 МА и временем нарастания 1 мкс.

Оценки показывают, что при схлопывании двухслойной цилиндрической оболочки с размерами, в 2–4 раза превышающими размеры оболочек, используемых в [13], взрывная система импульсной мощности на основе многоэлементного ДВМГ-480 с размыкателем тока может обеспечить уровень давления при квазиизэнтропическом сжатии $10 \div 100$ Мбар. При этом сила тока, протекающего по толкателю, должна составлять $15 \div 70$ МА при времени нарастания 1 мкс. При давлении порядка 10 Мбар экспериментальные исследования можно проводить с использованием системы импульсной мощности на основе ДВМГ-240 с размыкателем тока.

2.6. *Высоковольтные взрывные системы импульсной мощности на основе спиральных ВМГ.* В некоторых случаях система импульсной мощности должна обеспечивать на выходе высоковольтный импульс напряжения. В НППЦФ ВНИИЭФ разработано и испытано устройство для формирования высоковольтных импульсов напряжения с крутым передним фронтом в высокоимпедансной нагрузке [14]. Это устройство реализовано на основе многомодульной системы, состоящей из двух спиральных ВМГ диаметром 60 мм и двух дисковых ВРТ диаметром 200 мм. В высокоимпедансной нагрузке (сопротивление — 27 Ом, индуктивность — 0,5 мкГн) сформирован импульс напряжения с амплитудой 370 кВ и характерным временем нарастания $\tau \approx 170$ нс, при этом максимальная сила тока составила 12 кА. Система импульсной мощности с увеличенным в два раза количеством ВМГ и ВРТ и уменьшенной в два раза силой разрываемого тока обеспечила в аналогичной нагрузке импульс напряжения, равный 280 кВ, с характерным временем нарастания $\tau \approx 100$ нс, максимальная сила тока составила 9,5 кА.

Реализована также автономная система импульсной мощности с энергоемкостью 1 кДж (индуктивность нагрузки 1,2 мкГн) и объемом 2 дм³ на основе спирального ВМГ с первичной запиткой от взрывного пьезогенератора [15]. Устройство представляет собой моноблок или два электрически соединенных блока. Автономный источник энергии применяется для запитки малогабаритных сильноточных вакуумных диодов в составе сверхвысокочастотных генераторов [16], а также может быть использован при создании каскадных систем усиления энергии для питания более мощных ВМГ.

Высокая удельная мощность ВМГ (приблизительно на два порядка больше по сравнению с конденсаторными источниками) и возможность создания на их основе автономных

систем импульсной мощности позволяют применять ВМГ для испытания на стойкость к удару молнии важных промышленных объектов. В экспериментах по воспроизведению на защитном заземлении токового импульса молнии применялись ВМГ-160 или ВМГ-320 с повышающими трансформаторами, ЭВРТ и обостряющий разрядник мегавольтного уровня срабатывания. Впервые зарегистрированы возникновение и развитие вдоль поверхности грунта мощных искровых каналов длиной до 30 м (рис. 8). В этих экспериментах при силе тока, равной 70 кА, активное сопротивление заземлителя уменьшается более чем на порядок [17].

Заключение. Описанные в работе генераторы сверхсильных магнитных полей позволяют исследовать свойства веществ в магнитных полях с индукцией до 10 МГс при изоэнтропическом сжатии давлением, составляющим десятки мегабар. Системы импульсной мощности на основе современных спиральных и дисковых взрывомагнитных генераторов, создающих в нагрузках малого объема энергию, составляющую десятки мегаджоулей, используются для генерации мощных потоков мягкого рентгеновского излучения, ускорения плоских ударников до скоростей 10 км/с, изоэнтропического сжатия веществ давлением порядка 10 Мбар, генерации высоковольтных импульсов для питания сверхвысокочастотных генераторов и исследования крупных промышленных объектов на стойкость к удару молнии.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сахаров А. Д.** Взрывомагнитные генераторы // Успехи физ. наук. 1966. Т. 88, вып. 4. С. 725–734.
2. **Долотенко М. И.** Магнитокумулятивные генераторы МК-1 сверхсильных магнитных полей. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2015.
3. **Борисков Г. В., Быков А. И., Егоров Н. И. и др.** Исследование сжимаемости твердого протия в диапазоне давлений от 100 кбар до 5 Мбар // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Сб. докл. Междунар. конф. “XVII Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 23–27 марта 2015 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2015. Т. 2. С. 187–201.
4. **Борисков Г. В., Быков А. И., Егоров Н. И. и др.** Исследование уравнения состояния гидрида лития в экспериментах по изоэнтропическому сжатию давлением сверхсильного магнитного поля // Применение лазерных технологий для решения задач по физике высоких плотностей энергии: Тез. докл. Междунар. конф. “XX Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 17–20 апр. 2018 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2018. С. 144.
5. **Борисков Г. В., Быков А. И., Егоров Н. И. и др.** Экспериментальное исследование сжимаемости сплава ВМ-3-2 в области мегабарных давлений // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Тез. докл. Междунар. конф. “XIX Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 16–21 апр. 2017 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2017. С. 94.
6. **Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин А. С. и др.** Характеристики спирального взрывомагнитного генератора диаметром 280 мм // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 40–46.
7. **Петрухин А. А., Голубев В. В., Данов В. М. и др.** Результаты экспериментов по передаче энергии мегаджоулевого диапазона из взрывомагнитного генератора с помощью фольгового размыкателя тока // Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение. М.: Наука, 1984. С. 384–387.
8. **Demidov V. A., Boriskin A. S., Kazakov S. A., et al.** Disk magneto-cumulative generator with explosive current opening switch // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, N 8. P. 1768–1772.

9. **Демидов В. А., Борискин А. С., Казаков С. А. и др.** Дисковый взрывомагнитный генератор с взрывным размыкателем тока // ПМТФ. 2015. Т. 56, № 1. С. 24–30.
10. **Selemir V. D., Demidov V. A., Repin P. B., et al.** Explosive electrophysical complex EMIR: current state and perspectives // IEEE Trans. Plasma Sci. 2010. V. 38, N 8. P. 1754–1757.
11. **Matzen M. K., Sweeney M. A., Adams R. G., et al.** Pulsed-power-driven high energy density physics and inertial confinement fusion research // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. 055503.
12. **Demidov V. A., Boriskin A. S., Vlasov Y. V.** Simulation of the magnetically accelerated flat strikers using a magnetocumulative generator // IEEE Trans. Plasma Sci. 2018. V. 46, N 3. P. 659–662.
13. **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.
14. **Demidov V. A.** Multimodule system for fast-rising high-voltage pulse formation based on explosive current opening switches // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, N 2. P. 683–687.
15. **Demidov V. A.** Studying autonomous magneto-cumulative energy source // IEEE Trans. Plasma Sci. 2015. V. 43, N 1. P. 339–343.
16. **Бродский А. Я., Вдовин В. А., Коржевский А. В. и др.** Преобразование энергии взрыва в электромагнитное излучение микроволнового диапазона // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 846–849.
17. **Selemir V. D., Terekhin V. A., Kravchenko A. S., et al.** Investigation of spark discharge in the ground on reproduction a lightning current pulse by means of EMG // Proc. of the 15th IEEE Intern. pulsed power conf., Monterey (USA), 13–17 June 2005. S. 1., 2005. P. 541–544.

*Поступила в редакцию 19/IX 2018 г.,
после доработки — 19/IX 2018 г.
Принята к публикации 29/X 2018 г.*
