

УДК 621.316.549

ДИСКОВЫЕ ВЗРЫВОМАГНИТНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ ЭНЕРГИИ МАЛОГО КЛАССА

Б. Е. Гриневич, П. В. Дудай, А. В. Ивановский, К. Н. Климушкин,
А. И. Краев, В. Б. Куделькин, В. И. Мамышев, Ю. И. Матцев,
А. Н. Скобелев, Е. В. Шаповалов

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

E-mails: bgr@elph.vniief.ru, duday@elph.vniief.ru, ivanovsky@elph.vniief.ru,
klimushkin@elph.vniief.ru, krayev@elph.vniief.ru, kudelkin@elph.vniief.ru,
mamyshev@elph.vniief.ru, mattsev@elph.vniief.ru, skobelev@elph.vniief.ru,
shapovalov@elph.vniief.ru

Рассмотрен один из типов генераторов энергии — дисковый взрывомагнитный генератор с плоскими дисковыми элементами и металлическими вставками. Приведена методика численного моделирования работы этого генератора. Описаны принцип действия и конструкция дискового взрывомагнитного генератора. Представлены результаты расчетов и экспериментов.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, дисковый взрывомагнитный генератор, индуктивная нагрузка, энергия магнитного поля, магнитный поток.

Введение. Для изучения свойств веществ и моделирования физических процессов, происходящих при высоких плотностях энергии, а также для проведения исследований термоядерных процессов необходимы компактные источники электромагнитной энергии, составляющей десятки мегаджоулей. Запас удельной энергии в диэлектриках $\varepsilon_0 \varepsilon E^2/2$ и магнетиках $\mu_0 \mu H^2/2$ обычно небольшой (≈ 100 Дж/дм³), поэтому создание конденсаторных батарей с такой энергетикой — сложная задача, для решения которой требуются значительные финансовые затраты.

В 1951 г. А. Д. Сахаров предложил идею перевода энергии взрывчатого вещества (ВВ) в энергию магнитного поля путем быстрого уменьшения индуктивности контура с током за счет сближения с помощью взрыва прямого и обратного проводников. Это явление, названное магнитной кумуляцией, было экспериментально подтверждено в 1952 г. Р. З. Людаевым, Е. А. Феоктистовой, Г. А. Цырковым и А. А. Чвилевой (см. [1, 2]). В тот же период аналогичные эксперименты проводились в Лос-аламосской лаборатории (США) [3].

А. Д. Сахаров предложил два типа генераторов, реализующих магнитную кумуляцию: генераторы поля МК-1 и генераторы энергии МК-2 [2]. В данной работе рассматривается один из типов генераторов энергии — дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ) [4–6], представляющий собой короткий коаксиал, индуктивность которого уменьшается при разлете боковых стенок дисковой кассеты под действием инициируемого в центре дискового заряда ВВ.

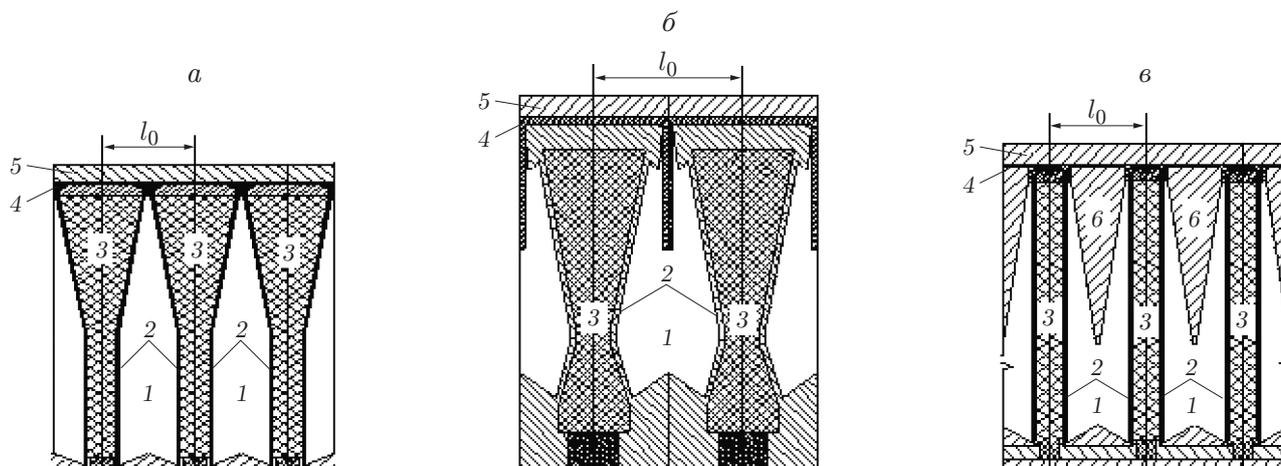


Рис. 1. Схемы ДВМГ различного типа:

a — ДВМГ семейства “Поток”, *б* — ДВМГ с увеличенной индуктивностью полости сжатия (схема 1), *в* — ДВМГ с плоскими дисковыми элементами (схема 2); 1 — полости сжатия, 2 — медные диски, 3 — заряды ВВ, 4 — волновая линия, 5 — обратный токопровод, 6 — металлические инертные вставки

Таблица 1

Характеристики ДВМГ малого класса

Тип генератора	L_0 , нГн	m_0 , кг	l_0 , см	L_n , нГн
ДВМГ семейства “Поток”	6	1,6	3,5	$\approx 0,33$
ДВМГ (схема 1)	9	2,0	5,5	$\approx 0,50$
ДВМГ (схема 2)	6	0,9	3,5	$\approx 0,33$

Результаты первых испытаний ДВМГ с профилированными дисковыми элементами показали, что в пятиэлементном генераторе диаметром 400 мм начальный ток, равный 6,5 МА, был увеличен до 90 МА за время ≈ 5 мкс, магнитная энергия в нагрузке составила ≈ 10 МДж [4]. Возможность увеличения энергии за счет увеличения числа элементов была проверена в эксперименте с 10-модульным ДВМГ диаметром 400 мм, в котором амплитуда импульса тока достигла 108 МА, энергия магнитного поля — 27,5 МДж.

В результате исследований, проводившихся в 70–80-х гг., был создан ДВМГ семейства “Поток” с зарядами ВВ диаметром 250, 400 и 1000 мм [7]. Генераторы такого типа создают токи $60 \div 300$ МА за время $4 \div 10$ мкс.

Дальнейшие исследования проводились в двух направлениях: 1) увеличение индуктивности полостей сжатия с целью увеличения генерируемой энергии магнитного поля [8] в соответствии со схемой 1 (рис. 1, табл. 1); 2) уменьшение массы ВВ за счет замены профилированных элементов плоскими дисковыми элементами и формирования профиля металлическими вставками в полости сжатия (схема 2) [9, 10].

В табл. 1 приведены характеристики ДВМГ малого класса (диаметр 250 мм), рассчитанные на один дисковый элемент: начальная индуктивность полости сжатия L_0 , масса ВВ m_0 , оптимальная нагрузка L_n , расстояние между центрами зарядов ВВ l_0 .

Эффективность ДВМГ семейства “Поток”, определяемая как количество производимой магнитной энергии на 1 кг ВВ, приблизительно равна 0,38 МДж/кг. Трехэлементный ДВМГ семейства “Поток” производит приблизительно такое же количество магнитной энергии ($\approx 1,8$ МДж), что и двухэлементный ДВМГ, сконструированный в соответствии со схемой 1 [11], но масса ВВ в нем в $\approx 1,2$ раза больше. Иными словами, эффективность работы ДВМГ, созданного в соответствии со схемой 1, в $\approx 1,2$ раза больше.

В настоящей работе приводятся результаты расчетных и экспериментальных исследований параметров ДВМГ малого класса, разработанного согласно схеме 2. Отличием таких генераторов от ДВМГ семейства “Поток” является уменьшение массы ВВ в $\approx 1,8$ раза (см. табл. 1). Изготовление ДВМГ по схеме 2 не требует больших финансовых затрат, что позволяет проектировать ДВМГ любого калибра, не проводя предварительные экспериментальные исследования.

Методика численного моделирования. Результаты расчетов. Для проведения расчетов ДВМГ разработана методика численного моделирования, которая включает:

- двумерный гидродинамический расчет параметров ВВ и продуктов его детонации;
- расчет смещения дисков под действием давления продуктов детонации с учетом противодействия магнитного поля в одномерном МГД-приближении;
- одномерные расчеты диффузии магнитного поля в стенки ДВМГ и передающих линий с учетом расширения этих линий под действием давления магнитного поля;
- расчет дополнительных потерь магнитного потока и некоторых режимов работы ДВМГ, отличающихся от нормального режима.

Подробное описание методики приведено в работах [12, 13]. В [14] проведено сравнение результатов расчетов и некоторых экспериментов.

Схема генератора с тремя полостями сжатия имеет ряд особенностей, которые могут быть учтены в расчетах.

1. В генераторе имеются центральные полости сжатия магнитного потока и две боковые полуполости. Центральные полости содержат металлические инертные вставки, боковые полуполости ограничены медными дисками и боковыми металлическими стенками, причем геометрия этих полуполостей может отличаться от геометрии половины центральной полости.

2. Металлическая вставка может быть покрыта слоем изолятора различной толщины, в вертикальных зазорах на выходе из полостей также имеются слои изолятора различной толщины.

3. Токовый контур генератора может состоять из трех металлов: Cu, Al, Fe.

4. В конкретной конструкции генератора могут использоваться дополнительные элементы, связанные с системой предварительной запитки, например узел отключения от спирального ВМГ.

Для учета указанных особенностей в конструкции генератора в методику расчета [12, 13] и программу расчета ДВМГ были внесены следующие дополнения.

1. Для учета динамики полета дисков проводятся два двумерных расчета, которые позволяют определить динамику подлета дисков к правой и левой боковым стенкам генератора с учетом того, что эти стенки могут иметь различную геометрию. Для ДВМГ с большим количеством элементов (более 5–7) изменение основных характеристик, таких как индуктивность, радиус области контакта, не оказывает существенного влияния на работу генератора. Для ВМГ с 2–3 элементами влияние боковых неполных элементов может быть значительным.

2. В расчет внесено дополнение, которое позволяет учесть наличие слоя изолятора, расположенного вдоль боковых стенок или на вставках, что может приводить к задержке замыкания диска с корпусом генератора или с металлическими инертными вставками и к дополнительным потерям магнитного потока.

3. Для расчета потерь магнитного потока на токовом контуре, состоящем из разных металлов, в программу расчета ВМГ внесено дополнение, позволяющее решать уравнения диффузии магнитного поля для участков стенок генератора из алюминия и стали. В стандартном варианте расчета для этих металлов задана “классическая” проводимость по Кнопфелю [15].

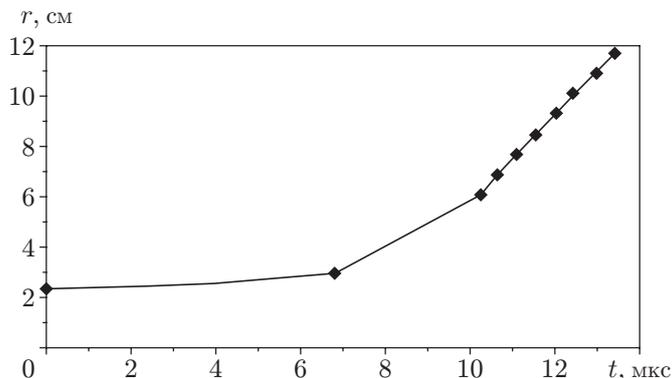


Рис. 2. Зависимость радиуса области контакта r от времени: линия — результаты расчета, точки — экспериментальные данные

Проведено сравнение расчетных данных о динамике разлета дисков и результатов газодинамического эксперимента, в котором с помощью контактных датчиков была получена зависимость радиуса области контакта от времени (рис. 2).

Изменения, внесенные в программу расчета ДВМГ для учета некоторых конструктивных особенностей генераторов с плоскими дисковыми элементами, были проверены путем сравнения расчетных значений производной тока и экспериментальных значений, полученных в трех экспериментах с двух- и трехэлементными ДВМГ.

В расчетах были учтены практически все конструктивные особенности экспериментальных сборок: материал дисков, вставок, боковых стенок, наличие дополнительной изоляции и подводящей линии для запитки генератора и т. п.

Экспериментальное исследование. Экспериментальное исследование параметров ДВМГ малого класса [11] проводилось для двух- и трехэлементных генераторов. В серии экспериментов с двухэлементным ДВМГ диаметром 250 мм была определена оптимальная конструкция изоляторов передающей линии, дисковых элементов, металлических инертных вставок. Схема двухэлементного ВМГ, использованного в последнем эксперименте, приведена на рис. 3.

Каждый элемент генератора содержит дисковый заряд ВВ 14 на основе октогена, торцы которого облицованы медными дисками 12. Между дисковыми элементами установлена металлическая инертная вставка 16. Инициирование зарядов ВВ осуществляется от электродетонаторов 13. Начальная индуктивность одного элемента составляет ≈ 6 нГн. Дисковые элементы и металлическая вставка разделены лавсановыми изоляторами 10, 11. Электропрочность изоляторов составляет не менее 10 кВ. Изолятор передающей линии 6 обеспечивает отсутствие тока между дисками и внешним токопроводом 7.

В качестве предусилителя энергии использовался спиральный ВМГ-100. К моменту замыкания контура ДВМГ ток в предусилителе составлял 6,1 МА, максимальное значение производной тока $2,6 \cdot 10^{11}$ А/с.

В нагрузке ДВМГ-250-2 с индуктивностью 0,6 нГн зарегистрирован импульс тока с амплитудой 58,5 МА, максимальной скоростью нарастания $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с и характерным временем $\tau_e \approx 4$ мкс. Экспериментальные и расчетные зависимости производной тока и тока ДВМГ от времени приведены на рис. 4.

Незначительное различие расчетных и экспериментальных данных объясняется погрешностями, возникающими при монтаже ДВМГ, поэтому в технологию сборки были внесены необходимые изменения.

В дальнейшем экспериментальная отработка проводилась для трехэлементного ДВМГ. В конструкцию генератора были добавлены один дисковый элемент и одна метал-

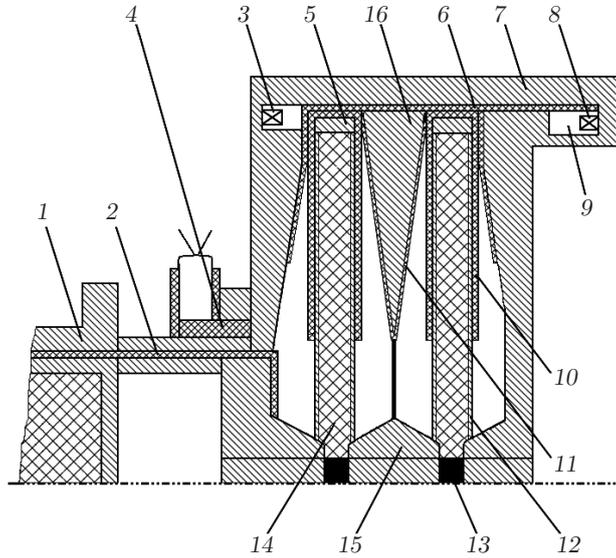


Рис. 3. Схема генератора ДВМГ-250-2:

1 — предусилитель энергии (спиральный ВМГ), 2 — изолятор, 3 — первая группа измерительных датчиков, 4 — узел отключения спирального ВМГ, 5 — металлическое кольцо, 6, 10, 11 — изоляторы, 7 — внешний токопровод, 8 — вторая группа измерительных датчиков, 9 — нагрузка, 12 — диск, 13 — электродетонатор, 14 — дисковый заряд ВВ, 15 — соединительный элемент, 16 — металлическая вставка

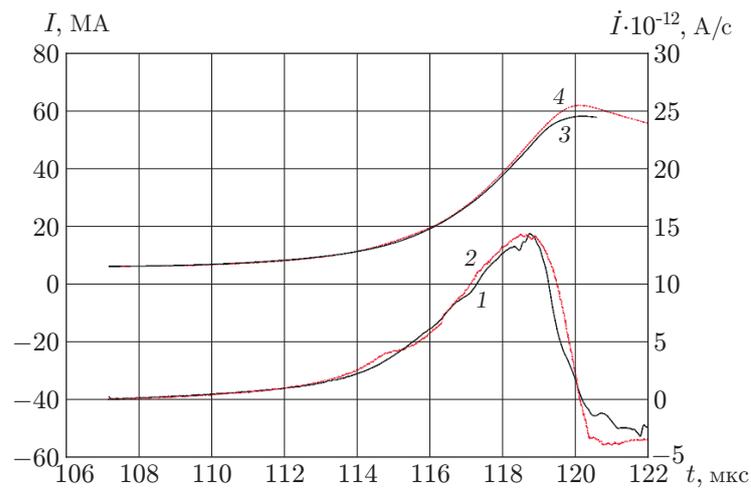


Рис. 4. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости производной тока и тока ДВМГ-250-2 от времени:

1, 2 — производная тока ДВМГ, 3, 4 — ток ДВМГ

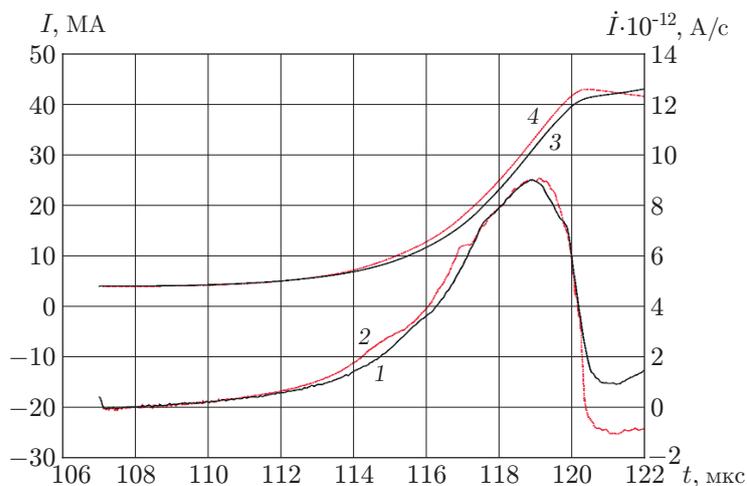


Рис. 5. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости производной тока и тока ДВМГ-250-3 от времени:

1, 2 — производная тока ДВМГ, 3, 4 — ток ДВМГ

лическая вставка, также была увеличена суммарная индуктивная нагрузка генератора, составившая 1,2 нГн. Все элементы ДВМГ были изготовлены из меди. Система изоляции осталась такой же, как и в двухэлементном ДВМГ.

В эксперименте ДВМГ запитывался от спирального ВМГ диаметром 160 мм начальным током $I_0 = 4$ МА.

В нагрузке ДВМГ-250-3 с индуктивностью 1,2 нГн дисковый генератор сформировал импульс тока с амплитудой 42 МА, максимальной скоростью нарастания $9 \cdot 10^{12}$ А/с и характерным временем $\tau_e \approx 4$ мкс. Экспериментальные и расчетные зависимости производной тока и тока дискового генератора приведены на рис. 5. Видно, что экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами расчетов.

Следующий эксперимент с трехэлементным модернизированным ДВМГ-250-3М был проведен при начальном токе $I_0 = 5,1$ МА. В конструкцию ДВМГ были внесены изменения. Иницирование узла отключения спирального ВМГ происходило от заряда ВВ в центральной трубе этого генератора. Детали дискового генератора выполнены из меди и стали. Уменьшена толщина слоя изоляции на токоведущих элементах генератора, увеличена индуктивность нагрузки ДВМГ, составившая 1,7 нГн.

В качестве предусилителя использовался спиральный ВМГ диаметром 200 мм.

В нагрузке с индуктивностью 1,7 нГн зарегистрирован импульс тока с амплитудой 36,6 МА, максимальной скоростью нарастания $6,8 \cdot 10^{12}$ А/с и характерным временем $\tau_e \approx 4$ мкс.

Так же как и в предыдущем эксперименте, полученные данные хорошо согласуются с результатами расчетов (рис. 6).

Проведены расчеты рабочих параметров трехэлементного ДВМГ-250-3М при начальном токе $I_0 = 6,5$ МА, близком к максимально возможному току для данного генератора. В расчетах полагалось, что корпус, металлические вставки, стенки ДВМГ изготовлены из меди. Индуктивность нагрузки равна 1,2 нГн. Зависимости производной тока и тока генератора от времени приведены на рис. 7. В расчете максимальный ток равен 65,3 МА, максимальная скорость нарастания тока в нагрузке — $1,4 \cdot 10^{13}$ А/с, максимальная магнитная энергия $\approx 2,6$ МДж.

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные данные о работе ДВМГ. Из табл. 2 следует, что коэффициент сохранения магнитного потока генераторов составляет

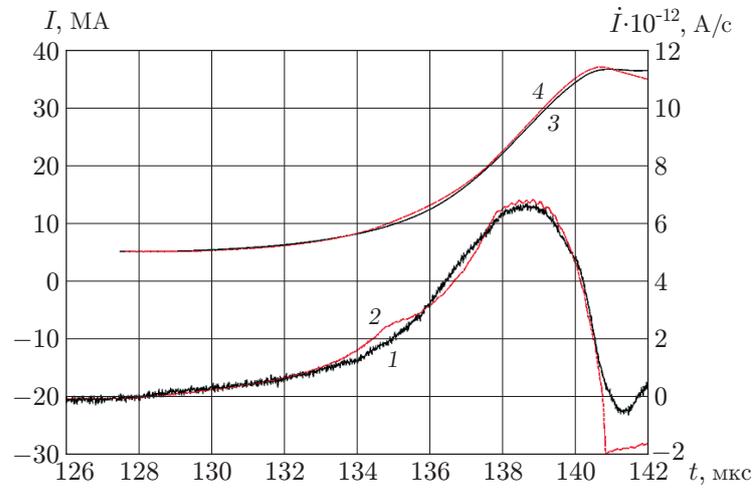


Рис. 6. Экспериментальные (1, 3) и расчетные (2, 4) зависимости производной тока и тока ДВМГ-250-3М от времени:

1, 2 — производная тока ДВМГ, 3, 4 — ток ДВМГ

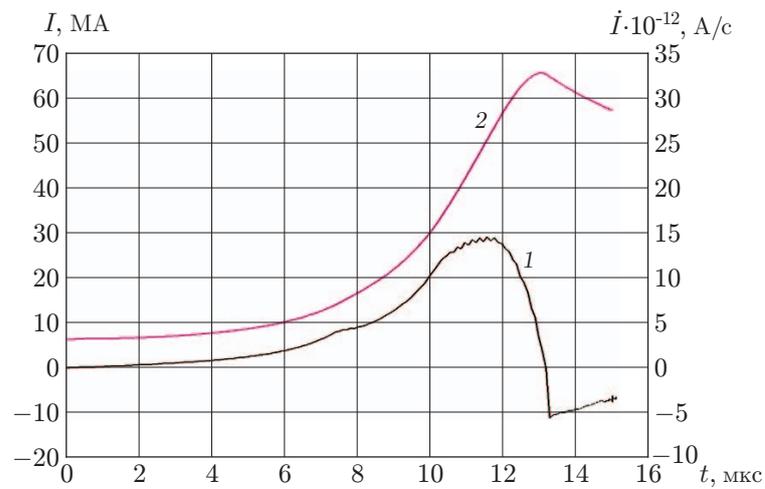


Рис. 7. Расчетные зависимости производной тока (1) и тока (2) ДВМГ-250-3М от времени

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения параметров ДВМГ малого класса с металлическими вставками

Тип генератора	$I_0 \cdot 10^{-6}$, А	$I_H \cdot 10^{-6}$, А	$\dot{I}_{max} \cdot 10^{-12}$, А/с	L_0 , нГн	L_H , нГн	E_H , МДж	$\tau_e \cdot 10^{-6}$, с	$m_{ВВ}$, кг	$E_H/m_{ВВ}$, МДж/кг
ДВМГ-250-2	6,1	58,5	14,0	12,3	0,6	0,94	4,0	1,8	0,52
ДВМГ-250-3	4,0	42,0	9,0	19,6	1,2	1,06	4,0	2,7	0,39
ДВМГ-250-3М	5,1	36,8	6,8	19,0	1,7	1,15	4,0	2,7	0,43
ДВМГ-250-3М	6,5	65,3	14,0	19,0	1,2	2,56	4,0	2,7	0,95

Примечание. В первых трех строках приведены экспериментальные данные, в четвертой — результаты расчета.

≈63 %. Наибольшее значение производимой магнитной энергии на 1 кг ВВ, приближенно равное 0,52 МДж/кг, получено в первом эксперименте. В генераторе использовались детали из стали, начальный ток ДВМГ не достиг максимально возможного значения. Все это привело к уменьшению выходных характеристик генератора. Расчетное значение производимой магнитной энергии на 1 кг ВВ при начальном токе 6,5 МА и индуктивности нагрузки 1,2 нГн составляет ≈0,95 МДж/кг.

Заключение. В работе представлены результаты трех взрывных экспериментов с двух- и трехэлементными ДВМГ малого класса с плоскими дисковыми элементами и инертными металлическими вставками. На основе анализа этих результатов определена оптимальная конструкция исследуемого генератора.

Разработанная методика численного моделирования работы ДВМГ позволяет с высокой точностью предсказать поведение исследуемого взрывного источника тока. Результаты расчетов практически совпадают с полученными экспериментальными данными.

Показана возможность получения рекордного для ДВМГ значения производимой магнитной энергии на 1 кг ВВ ≈0,95 МДж/кг.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы при разработке конструкций более мощных источников энергии на базе 10- и 30-элементных ДВМГ малого класса и ДВМГ среднего класса диаметром 400 мм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сахаров А. Д., Людаев Р. З., Смирнов Е. И. и др. Магнитная кумуляция // Докл. СССР. 1965. Т. 165, № 1. С. 65–68.
2. Сахаров А. Д. Взрывомагнитные генераторы // Успехи физ. наук. 1966. Т. 88, № 4. С. 723–734.
3. Fowler C. M., Garn W. B., Caird R. S. Production of very high magnetic fields by implosion // J. Appl. Phys. 1960. V. 31. P. 588–594.
4. Чернышев В. К., Протасов М. С., Шевцов В. А. Первые дисковые генераторы // Сверхсильные магнитные поля: Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–17 июня 1983 г. М.: Наука, 1984. С. 23–25.
5. Протасов М. С., Архипов Б. В., Петрухин А. А. и др. Быстродействующий дисковый взрывомагнитный генератор // Сверхсильные магнитные поля: Физика. Техника. Применение: Тр. 3-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам, Новосибирск, 13–17 июня 1983 г. М.: Наука, 1984. С. 26–28.
6. Pavlovskii A. I., Ludaev R. Z., Boyko V. A., et al. Investigation of disc magnetocumulative generators // Megagauss fields and pulsed power systems: Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 3–7, 1989. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1990. P. 331–336.
7. Чернышев В. К., Протасов М. С., Шевцов В. А. и др. Взрывомагнитные генераторы семейства “Поток” // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1992. Вып. 4. С. 33–41.
8. Demidov V. A., Kazakov S. A., Kravchenko A. S., et al. High-power energy sources based on the FCG parallel and series connection // Digest of tech. papers 11th IEEE Intern. pulsed power conf., Baltimore (USA), June 29 — July 2, 1997. Baltimore: Naval Res. Lab., 1997. P. 1459–1464.
9. Chernyshev V. K., Vakhrushev V. V., Grinevich B. Ye., et al. Fast-operating disk EMG using planar disks // Megagauss magnetic field generation and pulsed power applications: Proc. of the 5th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Albuquerque (USA), Nov. 8–11, 1992. N. Y.: Nova Sci. Publ., 1994. P. 547–556.

10. **Ивановский А. В., Куделькин В. Б., Вахрушев В. В., Чернышев В. К.** Малогабаритный взрывомагнитный источник энергии на основе дискового ВМГ второго поколения диаметром 250 мм // Тр. Междунар. конф. “8-е Харитоновские тематические научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 21–24 марта 2006 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2006. С. 567–569.
11. **Агапов А. А., Борискин А. С., Булычев С. В. и др.** Мощные импульсы тока для экспериментов по физике высоких плотностей энергии // Проблемы физики высоких плотностей энергии: Тр. Междунар. конф. “12-е Харитоновские тематические научные чтения”, Саров, 19–23 апр. 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 2010. С. 447–456.
12. **Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И., Якубов В. Б.** Методика численного моделирования дисковых взрывомагнитных генераторов с электровзрывным обострителем тока и лайнерной нагрузкой // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1995. Вып. 4. С. 12–17.
13. **Буйко А. М., Данов В. М., Мамышев В. И., Якубов В. Б.** Методика численного расчета дисковых взрывомагнитных генераторов // Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применения: Тр. 7-й Междунар. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственным экспериментам, Саров, 5–10 авг. 1996 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 1997. С. 414–418.
14. **Буйко А. М., Kudelkin V. B., Kuzyayev A. I., et al.** Effect of explosives parameters on the performance of a disc explosive magnetic generator // Abstr. of the 12th Intern. conf. on megagauss magnetic field generation and related topics, Novosibirsk, July 13–18, 2008. Novosibirsk: Inst. of hydrodynamics, 2008. P. 55.
15. **Кнопфель Г.** Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 16/X 2014 г.
