

**МАГНИТОКУМУЛЯТИВНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ—
ИМПУЛЬСНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

Том 1

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики»

Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии

В 2 томах

Том 1

Монография

Под редакцией В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича,
В. Д. Селемира

Саров, 2012

УДК 533.95:537.84:621.039

ББК 31.252

М 12

Авторы:

А. С. Борискин, А. М. Буйко, В. А. Васюков, Ю. В. Власов, В. А. Демидов,
В. А. Иванов, С. А. Казаков, Л. А. Лукьянчиков, А. А. Петрухин,
Л. Н. Пляшкевич, В. Д. Садунов, В. Д. Селемир, В. И. Скоков, Г. А. Швецов,
В. Б. Якубов

М 12

Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2012. С. 439

ISBN 978-5-9515-0196-7

Рассмотрены физико-технические основы магнитокумулятивных генераторов, основное внимание уделено энергетическим магнитокумулятивным генераторам, их согласованию с нагрузкой, формированию токового импульса и их применениям в физических экспериментах. Обобщены результаты многолетних разработок таких генераторов в различных лабораториях мира, в том числе и в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

В первом томе книги рассматриваются основные понятия магнитной кумуляции и история развития работ по этой тематике. Проанализировано состояние работ по различным типам генераторов: спиральным, коаксиальным, дисковым, спирально-дисковым, шинным и плоским, витковым и др. Рассмотрены также различные источники начальной энергии для магнитокумулятивных генераторов.

Книга предназначена для научных работников и инженеров – специалистов в области физики взрыва и импульсной энергетики.

The book considers physical and technical bases of magneto-cumulative generators. The attention is paid to the magneto-cumulative generators of energy, matching the load and MCG, current pulse conditioning and MCG use in physical experiments. The results of long-term developments of such generators in different laboratories of the World, including RFNC-VNIIEF, are summarized.

The first volume of the book considers main ideas of the magnetic cumulation and history of the works development on this topic. State of the works on different types of the generators: helical, coaxial, disk, helical-disk, stripe and plain, coil, etc. is analyzed. Different sources of the initial energy for the magneto-cumulative generators are also considered.

The book is intended for scientists and engineers – the specialists in explosion physics and pulsed power energy.

ISBN 978-5-9515-0196-7

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2012

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	7
1. Магнитокумулятивные генераторы. Основные понятия	9
1.1. Принцип магнитной кумуляции	10
1.1.1. Сохранение магнитного потока в замкнутом проводнике при его сжатии	11
1.1.2. Факторы, влияющие на процесс магнитной кумуляции	14
1.1.3. Представление МКГ электрическим контуром	16
1.2. Взрыв и ударные волны	20
1.2.1. Детонация ВВ. Свойства некоторых ВВ	20
1.2.2. Основные типы подвижной части (арматуры) МКГ	22
1.2.3. Ускорение проводников с помощью взрыва	24
1.2.4. Инициирование заряда ВВ	28
1.3. Типы магнитокумулятивных генераторов	30
1.3.1. Магнитокумулятивные генераторы сверхсильных магнитных полей	30
1.3.2. Магнитокумулятивные генераторы энергии	32
1.3.3. Быстроходные МКГ	36
1.3.4. Размеры генераторов. Скейлинг	39
1.4. Согласование МКГ с нагрузкой и формирование импульса тока	41
1.4.1. Включение нагрузки в контур МКГ	41
1.4.2. Электротехническое согласование МКГ с параметрами нагрузки	43
1.4.3. Формирование токового импульса в нагрузке МКГ	44
1.5. Особенности взрывного эксперимента	48
1.5.1. Постановка взрывного эксперимента. Средства инициирования	48
1.5.2. Защита от взрыва МКГ	49
1.5.3. Средства диагностики	53
1.6. МКГ и другие импульсные источники энергии	56
1.6.1. Емкостные накопители энергии	57
1.6.2. Электрохимические источники энергии	61
1.6.3. Индуктивные накопители энергии	61
1.6.4. МГД – генераторы	64
1.6.5. Взрывные пьезоэлектрические и ферромагнитные генераторы	65
2. Исторический обзор развития работ по магнитной кумуляции	66
2.1. Предшественники магнитной кумуляции	66
2.2. Пионеры магнитной кумуляции	67
2.3. Расширение работ по магнитной кумуляции	71

2.4. МКГ начинают широко применяться в физических экспериментах (1960–1970-е годы)	85
2.5. Развитие работ по магнитной кумуляции в 1980–1990-х годах	95
2.6. Современное состояние работ по магнитной кумуляции	114
2.7. Заключительные замечания	127
3. Диффузия сильного магнитного поля в металл	128
3.1. Факторы сильного магнитного поля	128
3.2. О соотношении плотности джоулевой энергии и плотности магнитной энергии в скин-слое МКГ	130
3.3. Расчет нелинейной диффузии магнитного поля в цилиндрический проводник переменного во времени радиуса	136
3.4. Подобие в задачах с линейной и нелинейной диффузией магнитного поля и его использование в расчетах МКГ	140
4. Электротехническое моделирование МКГ	143
4.1. Приближенное моделирование. RL -контур	143
4.2. Работа МКГ в RLC -контуре	161
5. Спиральные МКГ	174
5.1. Потери магнитного потока в спиральных МКГ	176
5.1.1. Геометрические отсекаания	177
5.2. Электрическая прочность спиральных МКГ	181
5.2.1. Напряжения в спиральном МКГ	182
5.2.2. Экспериментальное определение величины U_{\max}	184
5.2.3. Зависимость максимального напряжения от скорости разлета трубы и распределения $L(x)$	185
5.2.4. Оптимальное, с точки зрения снижения рабочих напряжений, распределение индуктивности по длине спирали ...	187
5.2.5. Локализация и характер электрических пробоев в спиральных генераторах	188
5.2.6. Потери магнитного потока в изоляции витков	191
5.2.7. Электропрочность ударно-сжатого воздуха	195
5.3. Осевое смещение конечных витков спирального МКГ	200
5.4. Масштабирование спиральных МКГ	204
5.5. Стабилизация выходной энергии спирального МКГ при изменении индуктивности нагрузки	209
5.6. Спиральные генераторы с постоянным выходным напряжением	211
5.7. Высокоиндуктивные спиральные МКГ	213
5.8. Быстроходные спиральные МКГ	220
5.8.1. Применение конусной центральной трубы	222
5.8.2. Спиральные МКГ с двухсторонним иницированием заряда ВВ	222
5.8.3. МКГ с конусной спиралью	226
5.8.4. Спиральные МКГ с осевым иницированием	227

5.9. Технические характеристики некоторых образцов спиральных МКГ	229
5.9.1. Малогабаритные спиральные МКГ	229
5.9.2. Среднегабаритные спиральные МКГ	233
5.9.3. Крупногабаритные спиральные МКГ	241
5.10. Достоинства и недостатки спиральных МКГ	248
6. Коаксиальные МКГ	249
6.1. Физическая модель коаксиальных МКГ	249
6.2. Описание некоторых коаксиальных МКГ	255
6.3. Коаксиальные МКГ со встречным подрывом заряда ВВ	259
6.4. Коаксиальные конусные МКГ	261
6.5. Коаксиальные МКГ с осевым инициированием заряда ВВ	267
6.5.1. Генераторы ВНИИЭФ	269
6.5.2. Генераторы ЛАНЛ	273
6.6. Достоинства и недостатки коаксиальных МКГ	275
7. Дисковые МКГ	276
7.1. Методика численного расчета ДМКГ	280
7.1.1. Комплексная методика расчета ДМКГ	281
7.1.2. Упрощенная расчетная модель	288
7.2. Механическая прочность конструкции ДМКГ	291
7.3. Инициирование зарядов ВВ	292
7.4. Эксперименты с ДМКГ	292
7.4.1. Малогабаритные ДМКГ	292
7.4.2. Среднегабаритные ДМКГ	297
7.4.3. Крупногабаритные ДМКГ	302
7.5. Другие разновидности ДМКГ	304
7.6. Достоинства и недостатки ДМКГ	306
8. Спирально-дисковые МКГ	308
9. Шинные и плоские МКГ	315
10. Витковые МКГ	320
11. Прочие МКГ	329
11.1. Сферический МКГ	329
11.2. Генератор коротких импульсов на основе спирального МКГ с осевым инициированием	330
11.3. «Матрешка»	331
11.4. Спиральные МКГ с плоским поршнем	332
11.5. Спиральный МКГ с раздельным расположением секций спирали	335
11.6. МКГ с многоэлементной арматурой	336
12. Источники начальной энергии для МКГ	344
12.1. Питание МКГ от конденсатора	344
12.2. Питание МКГ от конденсатора через повышающий трансформатор	349

12.3. Питание МКГ от взрывных пьезоэлектрических генераторов ...	353
12.3.1. Питание МКГ от ВПП с дополнительным конденсатором	357
12.3.2. ВПП с прямым подключением к МКГ	358
12.3.3. Схема питания МКГ на основе ВПП с линейным нарастанием тока	359
12.4. Ферромагнитные источники питания МКГ	361
12.4.1. Ударное размагничивание	361
12.4.2. Постоянные магниты	363
12.4.3. Метание постоянного магнита	365
12.5. Выводы	366
13. Исследования некоторых физических процессов в МКГ	367
13.1. Электрическая изоляция в дисковых МКГ	367
13.2. Возбуждение взрывчатого превращения в заряде МКГ под действием магнитного давления	371
13.3. Исследование температуры газа вблизи зоны динамического контакта	377
13.4. Электрические свойства детонационной плазмы и продуктов детонации конденсированных ВВ	380
Список литературы	399
Сведения об авторах	434

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Василий Александрович Демидов. Родился в 1944 г. в Горьковской области. В 1966 г. окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета. Начальник отделения Научно-технического центра физики РФЯЦ-ВНИИЭФ. В 2002 г. присвоена ученая степень доктора физико-математических наук. Лауреат Государственной премии СССР (1980) и премии Правительства РФ (1999).

Научные интересы – мощная импульсная электрофизика, физика высоких плотностей энергии. Имеет большой опыт в разработке и исследовании взрывных магнитокумулятивных генераторов, их применении в экспериментах по физике плазмы, по генерированию импульсов нейтронного, рентгеновского, микроволнового излучений и др. В. А. Демидов – член постоянного Международного Программного комитета конференций «Мегагаусс».



Леонид Николаевич Пляшкевич. Родился в 1939 г. в Псковской области. В 1962 г. окончил физический факультет Горьковского государственного университета. Ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ. Ученая степень – кандидат технических наук (1972 г.).

Занимался разработкой магнитокумулятивных генераторов и их применением в физических экспериментах для запитки мощных лазеров, моделирования электромагнитного импульса молнии, токового воздействия на металлические кумулятивные струи и др.

Являлся членом оргкомитета международных конференций «Мегагаусс-7» (1996 г.) и «Мегагаусс-9» (2002 г.), а также редактором трудов этих конференций.



Виктор Дмитриевич Селемир. Родился в 1948 г. в Черновицкой области. В 1972 г. окончил физический факультет Харьковского государственного университета. В настоящее время является заместителем научного руководителя РФЯЦ-ВНИИЭФ, директором Научно-технического центра физики РФЯЦ-ВНИИЭФ. Доктор физико-математических наук (2000 г.), профессор Саровского физико-технического института. Лауреат премии Правительства РФ (1998 и 2005 гг.).

Научные интересы связаны с физикой и техникой сильноточных ускорителей электронов, микроволновой электроникой, физикой плазмы, магнитной кумуляцией и ее применениями.

В. Д. Селемир – член Международного Программного комитета конференций «Мегагаусс», был председателем оргкомитета конференции «Мегагаусс-7» (1996 г.) и председателем конференции «Мегагаусс-9» (2002 г.), а также редактором трудов этих конференций. Награжден премией им. академика А. И. Павловского «За выдающийся вклад в исследования по магнитной кумуляции».



Александр Сергеевич Борискин. Родился в 1948 г. в г. Москве. В 1972 г. окончил Московский инженерно-физический институт по специальности техническая физика. Начальник отдела НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ. В 1989 г. получил степень кандидата физико-математических наук, в 2011 г. – доктора физико-математических наук.

Занимается разработкой устройств импульсной мощности на основе магнитокумулятивных генераторов и их применением в различных физических экспериментах, в том числе по моделированию электромагнитного импульса молнии, генерированию рентгеновского и микроволнового излучений и т. д.



Анатолий Михайлович Буйко. Родился в 1941 г. в Красноярском крае. В 1966 г. окончил физический факультет Ленинградского государственного университета. Ведущий научный сотрудник теоретического отделения РФЯЦ-ВНИИЭФ. Ученая степень – кандидат физико-математических наук (1977 г.). Лауреат премии Правительства РФ (1999 г.).

Научные интересы – сильные магнитные поля, высокие плотности энергии, лайнерные системы, импульсная мощность на основе магнитокумулятивных генераторов, режимы термоядерного горения в различных мишенях. Участвовал в подготовке и проведении физических экспериментов при подземных испытаниях ядерных зарядов.



Владимир Анатольевич Васюков. Родился в 1942 г. в г. Копейск Челябинской области. В 1965 г. окончил факультет теоретической ядерной физики Московского инженерно-физического института. Ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ. Кандидат физико-математических наук (1985 г.).

Разрабатывал магнитокумулятивные генераторы с повышенной мощностью. Исследовал взрывные плазменные размыкатели для формирования мегаамперных

импульсов тока. Занимался электрофизическими методами моделирования интенсивных механических импульсов для исследования динамических свойств материалов.



Юрий Валентинович Власов. Родился в 1960 г. в г. Нижний Тагил Свердловской области. В 1984 г. окончил факультет экспериментальной и теоретической физики Московского инженерно-физического института. Ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ. Кандидат физико-математических наук (2007 г.).

Научные интересы – в области создания устройств импульсной энергетики. Имеет большой опыт разработки магнитокумулятивных генераторов и средств формирования коротких токовых импульсов, а также математического моделирования этих устройств.



Виталий Александрович Иванов. Родился в 1941 г. в Курской области. В 1965 г. окончил энергетический факультет Московского инженерно-физического института. Ведущий научный сотрудник РФЯЦ-ВНИИЭФ. Кандидат физико-математических наук (1991 г.).

Научные интересы – разработка и исследование устройств формирования токовых импульсов и их применение в физических экспериментах с МКГ, в частности, для запитки камеры МАГО и др.



Сергей Аркадьевич Казаков. Родился в 1949 г. в Свердловской области. В 1973 г. окончил физико-технический факультет Уральского политехнического института. Начальник лаборатории НТЦФ РФЯЦ-ВНИИЭФ. Лауреат премии Правительства РФ (1999 г.).

Занимается физикой высоких плотностей энергии, имеет большой опыт в разработке и исследовании источников импульсной энергии на основе МКГ и их применении в экспериментах по генерированию импульсов нейтронного, рентгеновского, светового, микроволнового излучений и др.



Леонид Александрович Лукьянчиков. Родился в 1936 г. в г. Благовещенск Амурской области. В 1953 г. окончил школу в г. Самарканд и поступил в Московский физико-технический институт. В 1956 г. был принят в группу академика М. А. Лаврентьева, на основе которой в 1957 г. было создано подразделение Института гидродинамики СО АН СССР. Главный научный сотрудник ИГ СО РАН. Ученая степень – доктор физико-математических наук (1987 г.). Лауреат премии Правительства РФ (1983 г.) и Государственной премии

РФ (1994 г.). Профессор кафедры общей физики Новосибирского государственного университета.

Научные интересы – физика взрыва и ударные волны, электрофизика, в частности – разработка и исследование взрывных сильноточных размыкателей токового контура.



Александр Александрович Петрухин. Родился в 1946 г. в Республике Мордовия. Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета в 1969 г. Начальник отдела РФЯЦ-ВНИИЭФ.

Имеет большой опыт в разработке магнитокумулятивных генераторов. Занимался исследованиями изоляции для мощных дисковых генераторов, сохраняющей свою работоспособность при больших давлениях. Проводил лайнерные эксперименты с использованием этих генераторов.



Валерий Давидович Садунов. Родился в 1944 г. в г. Ярославль. В 1969 г. окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета. Начальник лаборатории РФЯЦ-ВНИИЭФ. Ученая степень – доктор физико-математических наук (2006 г.).

Занимался разработкой магнитокумулятивных генераторов, разработкой и исследованиями сегнетоэлектрических преобразователей энергии – взрывных пьезогенераторов и измерительных датчиков ударных волн.



Виктор Иванович Скоков. Родился в 1956 г. в Ворошиловградской области. В 1979 г. окончил факультет самолетостроения Харьковского авиационного института. Начальник лаборатории РФЯЦ-ВНИИЭФ. Кандидат физико-математических наук (1998 г.).

Основные научные интересы: поведение материалов и конструкций при ударно-волновых нагружениях, разработка магнитокумулятивных генераторов и средств формирования коротких токовых импульсов.



Геннадий Анатольевич Швецов. Родился в 1944 г. в г. Кустанай. В 1967 г. окончил физический факультет Новосибирского государственного университета. Начальник отдела ИГ им. М. А. Лаврентьева СО РАН. Ученая степень – доктор физико-математических наук (1996 г.).

Основные научные результаты получены в области преобразования энергии взрыва в электромагнитную, в создании МГД и магнитокумулятивных генераторов и их применений. Внес весомый вклад в разработку электромагнитных методов ускорения твердых тел. Им развита концепция токового воздействия на металлические кумулятивные струи, показана возможность уменьшения в несколько раз проникания этих струй в преграды.

Награжден медалью Питера Марка «За выдающийся вклад в исследования электромагнитных методов ускорения», дипломом Н. Гриффитца «За наиболее значительный вклад в исследование кумулятивных зарядов», премией им. академика А. И. Павловского «За выдающийся вклад в исследования по магнитной кумуляции».

Г. А. Швецов – член постоянного Международного Программного комитета конференций «Мегагаусс», был председателем оргкомитета конференций «Мегагаусс-3» (1983 г.), «Мегагаусс-5» (1989 г.), председателем конференции «Мегагаусс-12» (2008 г.) и редактором трудов этих конференций.



Валерий Борисович Якубов. Родился в 1940 г. в Брянской обл. В 1962 г. окончил Московский инженерно-физический институт по специальности теоретическая ядерная физика. Начальник лаборатории РФЯЦ-ВНИИЭФ. Ученая степень – доктор физико-математических наук (1993 г.). Лауреат премии Правительства РФ (1999 г.).

При его непосредственном участии решен ряд важных проблемных задач ВНИИЭФ. В области магнитной кумуляции им рассматривались системы импульсной энергетики на основе МКГ и их применение для исследования возможности термоядерного зажигания, для ускорения металлических лайнеров, исследования динамических свойств материалов и т. п.

Магнитокумулятивные генераторы – импульсные источники энергии

В 2 томах

Том 1

Монография

Под редакцией **Демидова** Василия Александровича,
Пляшкевича Леонида Николаевича,
Селемира Виктора Дмитриевича

Редактор *Н. П. Мишкина*

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова*

Художник *Т. В. Андреева*

Подписано в печать 23.04.2012 Формат 70×108/16.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 38,4. Уч.-изд. л. 36,5.

Тираж 500 экз. Зак. тип. 1912-2011.

Отпечатано в Издательско-полиграфическом комплексе

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, г. Саров Нижегородской обл.