

# ВЫСОКИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ В ЭФО

Б. Е. ГРИНЕВИЧ, А. В. ИВАНОВСКИЙ

Основное направление работ электрофизического отделения (ЭФО) РФЯЦ-ВНИИЭФ — развитие сверхмощных взрывомагнитных генераторов энергии (ВМГ) для термоядерных и физических исследований замагниченной высокотемпературной плазмы и физики высоких плотностей энергии.

Наиболее известны два основных типа ВМГ — спиральные и дисковые. Спиральные генераторы работают на относительно большие индуктивные нагрузки, но уступают дисковым генераторам по энергетическим характеристикам. За последние годы достигнуто значительное продвижение в разработке обоих типов генераторов.

Разработана методика проектирования спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ), основанная на двумерном расчете распределения магнитных полей в генераторе (рис. 1). Это позволяет определять основные параметры работы генератора в любой момент времени. Рассчитываются напряжения и токи в витках спирали, изменение индуктивности генератора, поте-

ри магнитного потока в генераторе, осевые и радиальные движения витков, торможение трубы магнитным полем и др. Создана компьютерная программа расчета режимов работы СВМГ. Методика проектирования была оттестирована

с помощью большого количества экспериментальных данных, полученных в ранее проведенных опытах.

Следующим шагом стало применение методики для создания новых конструкций СВМГ (рис. 2). Сверху приведена фотография спирального генератора с диаметром спирали 200 мм с пристыкованным формирователем импульса тока квазитрапециидальной формы и сохраняемой нагрузкой, применявшегося для исследования откольной прочности материалов в совместных с Лос-Аламоской национальной лабораторией (ЛАНЛ, США) экспериментах R-Damage. Со-

храняемая нагрузка соединена с генератором коаксиальной линией передачи энергии и размещается внутри показанного на фотографии металлического укрытия. Внизу на рис. 2 приведена фотография спирального генератора с диаметром спирали 240 мм с обострителем тока, предназначенного для получения в нагрузке импульса тока амплитудой ~10 МА с временем нарастания — 1 мкс.

Использование методики позволило оптимизировать параметры спиральных генераторов, что привело к разработке СВМГ с амплитудно-временными характеристиками, свойственными скорее более мощным и сильноточным дисковым взрывомагнитным генераторам (ДВМГ).

Планируется создать источник импульсной мощности на основе СВМГ, позволяющий получать в лайнерной нагрузке ток порядка 20 МА за время ~1 мкс. Применение новой методики проектирования СВМГ позволило отказаться от проведения серий предварительных экспериментов и таким образом существенно сократить как финансовые, так и временные затраты на разра-

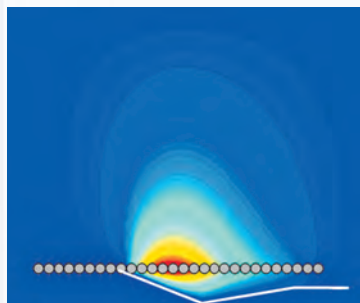


Рис. 1. Распределение магнитного поля в СВМГ



Рис. 2. Различные конструкции СВМГ

ботку новых генераторов. Создание данной методики позволило довести технологию СВМГ до коммерческого продукта, востребованного ведущими научно-исследовательскими лабораториями мира.

Существенные продвижения достигнуты и в работе с ДВМГ. Новое поколение дисковых взрывомагнитных генераторов с плоскими дисками и инертными вставками в полостях сжатия магнитного потока отличается простотой конструкции и высоким коэффициентом превращения энергии взрывчатого вещества (ВВ) в энергию магнитного поля. Проведена отработка ДВМГ с плоскими дисками малого класса диаметром 250 мм.

На рис. 3 показан трехмодульный ДВМГ непосредственно перед опытом (слева — источник питания (спиральный ВМГ)). При массе ВВ в дисках 2,7 кг величина запасенной энергии составила 2,25 МДж или 0,83 МДж/кг. Это свидетельствует о том, что ДВМГ диаметром 250 мм является экономичным генератором.

Результаты проведенных опытов показали, что в таком ДВМГ возможно усиление тока в ~10 раз до значения, превышающего 60 МА. Коэффициент перевода энергии взрыва ВВ в энергию магнитного поля превысил 14 %. Совпадение расчетных данных с результатами экспериментов позволяет использовать полученные данные для точного расчета результатов опытов при использовании аналогичного генератора с увеличенным числом дисков. Представляется целесообразным использовать данный генератор в тех экспериментах, в которых энергия магнитного поля не превышает 20 МДж.

Разработан сильноточный коммутатор-формирователь импульса тока, позволяющий сокращать фронт нарастания мультимегаамперных токов в 8–8,5 раз при их коммутации на малоиндуктивные нагрузки. Коммутатор работает на принципе размыкания тонкостенного цилиндри-

ческого осесимметричного проводника на его концевом участке в области краевой неоднородности. Размыкание происходит вследствие электровзрыва концевой части проводника, быстрого растяжения и выноса образовавшейся плазмы под действием магнитного поля. На рис. 4 показан процесс размыкания проводника, содержащего один размыкаемый цилиндрический элемент (перемычку) в виде последовательности из трех кадров в различные моменты времени. Диаметр цилиндрического элемента 24 мм, толщина стенки 0,4 мм. В контрольном эксперименте ток амплитудой 4,5 МА с временем нарастания ~6 мкс был переключен в нагрузку индуктивностью 4 нГн за 0,7 мкс (см. рис. 5 и 6).

Расчеты работы многоэлементных коммутаторов с рядом последовательно установленных тонкостенных цилиндрических перемычек показали, что при их запитке от ВМГ, снабженным первичным каскадом формирования импульса тока с характерным временем нарастания ~2 мкс, время размыкания тока может составлять 140–160 нс при токах ~20 и более мегаампер.

В электрофизическом отделении используется устройство, состоящее из дискового взрывомагнитного генератора и фольгового размыкателя тока, представ-

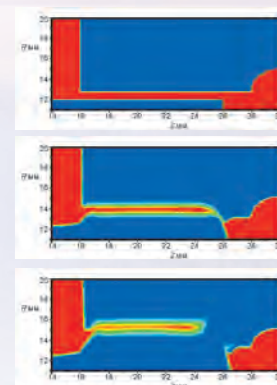


Рис. 4



Рис. 5. Внешний вид коммутатора



Рис. 3. Трехмодульный ДВМГ с преусилителем (слева) перед опытом



Рис. 6. Токи (эксперимент)



ляющего собой медную фольгу толщиной 0,15–0,19 мм, размещенную между изоляторами в передающей линии дискового ВМГ (рис. 7). Разработана и испытана новая конструкция электровзрывного размыкателя тока, в котором медная фольга укладывается полосками между двумя гофрированными радиальными изоляторами. Конструкция проста, надежна и позволяет значительно уменьшить габариты размыкателя тока и всего устройства. Индуктивность размыкателя может быть уменьшена в несколько раз, что ведет к увеличению энергии, передаваемой в нагрузку. На рис. 8 приведена фотография полосок гофрированной фольги, уложенных на один из радиальных изоляторов.

Использование такого гофрированного размыкателя тока позволило передать в нагрузку ток ~17 МА за время ~1 мкс (рис. 9). Полученные в эксперименте данные коррелируют с результатами расчетов, что свидетельствует о правильном выборе расчетной модели.

СВМГ нашли применение для разгона твердотельных лайнеров до высоких скоростей для изучения динамического разрушения в сходящейся геометрии. Наиболее известна серия из семи экспериментов R-Damage с использованием взрыво-

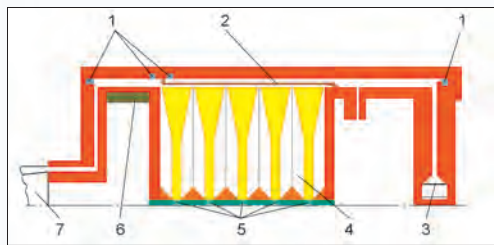


Рис. 7. Устройство для разгона лайнера: 1 — датчики; 2 — электровзрывной фольговой размыкатель; 3 — лайнер; 4 — дисковый генератор; 5 — детонаторы; 6 — узел отключения; 7 — спиральный генератор

магнитного генератора в качестве драйвера цилиндрического алюминиевого лайнера, создающего осесимметричное ударное воздействие на исследуемую мишень. Опыты были проведены совместно ВНИИЭФ и ЛАНЛ. Целью экспериментов являлось исследование особенностей зарождения и развития откольного разрушения, а также компактирования поврежденности в экструдированном алюминии марки АІСАН.

Серия экспериментов R-Damage продемонстрировала перспективность применения импульсных источников мощности на основе ВМГ для создания в конструкционных материалах импульсных нагрузок контролируемой амплитуды и длительности. В частности, простота реали-

зации режима с двумя последовательными нестационарными ударными волнами в мишени открывает широкие возможности исследования особенностей процесса откольного разрушения и компактирования реальной поврежденной среды. Результатом серии R-Damage стала полученная впервые информация о компактировании и верификация модели компактирования.

К преимуществам представленной методики по сравнению с нагружением образца с помощью ВВ можно отнести: отсутствие подпора лайнера продуктами взрыва; безынерционность магнитного поля; возможность задания требуемого импульса тока (амплитуда, время нарастания и спада, длительность); высокую симметрию нагружения; возможность сохранения исследуемых мишеней.

В результате проведения совместных с ЛАНЛ экспериментов серии RHSR получены данные о динамической прочности полиэтилена (2–3 кбар, больше статической в ~20 раз), подтверждены данные о динамической прочности меди. Успех этой серии экспериментов был обеспечен стабильной работой системы импульсной мощности на основе ДВМГ — точность воспроизведения импульса тока составила ~3 %.

В XXI веке усилился интерес к физике атмосферного электричества высоких энергий. Важность исследований в этой области обусловлена необходимостью предсказывать грозовую активность атмосферы, оценивать вклад процессов, ответственных за генерацию атмосферой проникающих излучений, в глобальный электрический

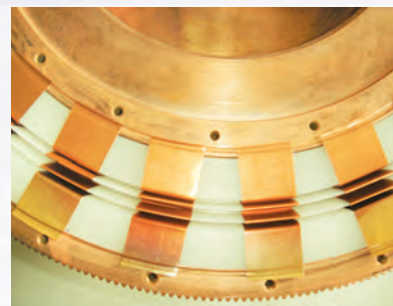


Рис. 8. Гофрированная фольга и изолятор для размыкателя тока

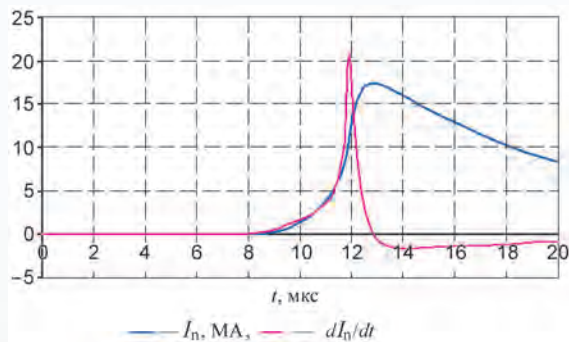


Рис. 9. Зависимость производной тока и тока в нагрузке от времени (эксперимент)



Рис. 10. Грозовой разряд

контур, предсказывать результаты их воздействия на электронное оборудование летательных аппаратов и здоровье людей. Грозовые импульсы  $\gamma$ -излучения и нейтронов могут восприниматься системами слежения как следствие несанкционированных ядерных взрывов.

Нами были выполнены расчеты тормозного излучения лавин релятивистских убегающих электронов в нижних слоях атмосферы. Моделировались импульсы жесткого  $\gamma$ -излучения тропосферных грозных облаков, зарегистрированных в Японии на уровне моря и в высокогорных условиях. Рассчитанные нами спектры излучения на уровне моря от источника, расположенного в тропосфере на высотах  $h = 0,5-2$  км, согласуются со спектром  $\gamma$ -излучения низких зимних облаков, зарегистрированным на берегу Японского моря на крыше здания атомной станции. Близость рассчитанного эмиссионного спектра к измеренному и рассчитанному на высоте 2770 м (высота горы Фудзи) свидетельствует о близости источника к месту расположения детектора. В целом результаты численного моделирования свидетельствуют о том, что лавины релятивистских убегающих электронов способны развиваться не только на больших высотах, но и в нижних слоях атмосферы. Вычислены потоки фото-нейтронов, которые генерировались измеренными импульсами  $\gamma$ -излучения. Потоки достаточны для их надежной регистрации даже на уровне моря. Фотография мощного грозового разряда приведена на рис. 10, а на рис. 11 приведена фотография свечения над горой Фудзи, обусловленного убегающими электронами.

Одним из направлений инерциального термоядерного синтеза является генерирование мощных импульсов мягкого рентгеновского излучения с энергией до  $\sim 10$  МДж за время  $< 10$  нс и обжатие этим излучением термоядерной мишени. Для этого необходимо сформировать импульсы тока в десятки мегаампер за время  $\sim 100$  нс. Среди размыкателей, принципиально способных достичь таких параметров, следует отметить в первую оче-



Рис. 11. Свечение над Фудзи

редь электровзрывные размыкатели, которые являются наиболее изученными и простыми.

Для проверки возможности обострения импульса тока до  $\sim 100$  нс были проведены расчеты тока в нагрузке. Показано, что электровзрывные размыкатели тока (ЭВРТ) и нагрузку необходимо «развязать» на стадии электровзрыва. Это можно сделать путем установки разрядника. Результаты расчетов работы СВМГ с разрядником показали, что напряжение на ЭВРТ достигает  $\sim 400$  кВ, ток в нагрузке — 5 МА за 130 нс. Больших токов можно достичь при работе ЭВРТ с ДВМГ. Конструкции вакуумных низкоиндуктивных разрядников, коммутирующих импульсы тока при мегавольтных напряжениях за время  $< 10$  нс, известны.

Дальнейшее направление работ отделения связано с повышением мощностных характеристик разрабатываемых приборов и удешевлением стоимости проведения экспериментов. Важной вехой на этом пути может явиться проведение опыта по получению импульса тока величиной 10 МА с фронтом нарастания  $\sim 100$  нс. В настоящее время активно ведутся работы в этом направлении. Существуют и другие направления: получение нейтронного выхода  $\sim 10^{16}$  нейтронов за импульс, эксперименты с плазменными мишенями и т. д.

Обладание уникальными возможностями проведения экспериментов в диапазоне энергий, не достижимых иным путем, кроме применения взрывомангнитных генераторов, позволяет надеяться на широкое международное сотрудничество с ведущими лабораториями мира. Сотрудники отделения уверенно смотрят в будущее.

**ГРИНЕВИЧ Борис Евгеньевич** —  
начальник отдела ЭФО РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор  
физ.-мат. наук, лауреат премии Правительства РФ

**ИВАНОВСКИЙ Андрей Владимирович** —  
начальник ЭФО РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат.  
наук, лауреат премии маршала Жукова