Список литературы

- Альтшулер Л В УФН 85 197 (1965) [Al'tshuler L V Sov. Phys. Usp. 8 52 (1965)]
- Альтшулер Л В, Крупников К К, Бражник М И ЖЭТФ 34 886 (1958) [Al'tshuler L V, Krupnikov K K, Brazhnik M I Sov. Phys. JETP 7 614 (1958)]
- Альтшулер Л В и др. ЖЭТФ 34 874 (1958) [Al'tshuler L V Sov. Phys. JETP 7 606 (1958)]
- 4. Альтшулер Л В и др. *ФТТ* **5** 279 (1963)
- 5. Альтшулер Л В и др. УФН **166** 575 (1996) [Al'tshuler L V *Phys. Usp.* **39** 539 (1996)]
- Трунин Р Φ УΦΗ 164 1215 (1994) [Trunin R F Phys. Usp. 37 1123 (1994)]
- Трунин Р Ф, в сб. Ударные волны и экстремальные состояния вещества (Под ред. В Е Фортова и др.) (М.: Наука, 2000) с. 76
- 8. Трунин Р Ф УФН 171 387 (2001) [Trunin R F Phys. Usp. 44 371 (2001)]
- 9. Трунин Р Ф, Панов Н В, Медведев А Б Хим. физ. 14 (2-3) 97 (1995)
- Трунин Р Φ, Панов Н В, Медведев А Б Письма в ЖЭТФ 62 572 (1995) [Trunin R F, Panov N V, Medvedev A B JETP Lett. 62 591 (1995)]
- 11. Трунин Р Ф и др. ЖЭТФ **102** 1433 (1992) [Trunin R F *JETP* **75** 777 (1992)]
- Трунин Р Ф и др. ЖЭТФ 103 2189 (1993) [Trunin R F JETP 76 1095 (1993)]
- Трунин Р Ф и др. ЖЭТФ 108 851 (1995) [Trunin R F JETP 81 464 (1995)]
- Трунин Р Ф ТВТ 35 901 (1997) [Trunin R F High Temp. 35 888 (1997)]
- Трунин Р Φ и др., в сб. Экспериментальные данные по ударноволновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ (Под ред. Р Φ Трунина) (Саров: РФЯЦ– ВНИИЭФ, 2001)
- Зельдович Я Б ЖЭТФ 32 1577 (1957) [Zel'dovich Ya B Sov. Phys. JETP 5 1287 (1957)]
- Крупников К К, Бражник М И, Крупникова В П ЖЭТФ 42 675 (1962) [Кгирпікоv К К, Brazhnik M I, Krupnikova V P Sov. Phys. JETP 15 470 (1962)]
- Кормер С Б и др. ЖЭТФ 42 686 (1962) [Kormer S B et al. Sov. Phys. JETP 15 477 (1962)]
- Трунин Р Ф, Симаков Г В ЖЭТФ 103 2180 (1993) [Trunin R F, Simakov G V JETP 76 1090 (1993)]
- 20. Трунин Р Ф и др. ЖЭТФ **96** 1024 (1989) [Trunin R F et al. *JETP* **69** 580 (1989)]
- 21. Трунин Р Ф, Симаков Г В, Панов Н В *TBT* **39** 430 (2001) [Trunin R F, Simakov G V, Panov N V *High Temp.* **39** 401 (2001)]
- 22. Симаков Г В, Трунин Р Φ Изв. АН СССР. Физ. Земли (11) 72 (1991)
- 23. Трунин Р Ф и др. *ТВТ* **37** 732 (1999) [Trunin R F et al. *High Temp.* **37** 702 (1999)]
- 24. Трунин Р Ф, Панов Н В *ТВТ* **38** 754 (2000) [Trunin R F, Panov N V *High Temp.* **38** 728 (2000)]
- Трунин Р Ф, Симаков Г В, в сб. *Труды РФЯЦ ВНИИЭФ* (Под ред. Р И Илькаева) (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 2003) с. 234
- Зубарев В Н и др., в сб. Докл. 1-го Всесоюз. симпозиума по импульсным давлениям Т. 1 (М.: ВНИИФТРИ, 1974) с. 61
- Трунин Р Ф и др. ЖЭТФ 95 631 (1989) [Trunin R F Sov. Phys. JETP 68 356 (1989)]
- Медведев А Б Вопр. атом. науки и тех. Теор. и прикл. физ. (1) 23 (1990)
- 29. Медведев А Б Вопр. атом. науки и тех. Теор. и прикл. физ. (1) 12 (1992)
- 30. Da Silva L B et al. Phys. Rev. Lett. 78 483 (1997)
- 31. Collins G W et al. *Phys. Plasmas* **5** 1864 (1998)
- 32. Knudson M D et al. Phys. Rev. Lett. 87 225501 (2001)
- 33. Knudson M D et al. Phys. Rev. B 69 144209 (2004)
- 34. Boriskov G V et al. Phys. Rev. B 71 092104 (2005)
- 35. Трунин Р Ф и др. ЖТФ **76** (7) 90 (2006) [Trunin R F et al. *Tech. Phys.* **51** 907 (2006)]
- Трунин Р Ф, Урлин В Д, Медведев А Б УФН 180 605 (2010) [Trunin R F, Urlin V D, Medvedev A B Phys. Usp. 53 577 (2010)]
- Копышев В П Теория уравнений состояния (Саров: ΦГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2009)

PACS numbers: 84.30.Ng, **84.70. + p**, **85.70. - w** DOI: 10.3367/UFNr.0181.201104k.0422

Взрывомагнитные генераторы энергии и их применение в научных экспериментах

- Б.Е. Гриневич, В.А. Демидов,
- А.В. Ивановский, В.Д. Селемир

1. Введение

Поиски источников энергии, которые по энергозапасу приближались бы к взрывчатым веществам (BB), неизбежно приводят к мысли об использовании электрического или магнитного полей. Однако запас удельной энергии в диэлектриках ($\varepsilon_0 \varepsilon E^2/2$) и магнетиках ($\mu_0 \mu H^2/2$) обычно невелик — порядка 100 Дж л⁻¹.

В результате оказывается, что создание конденсаторных батарей, способных аккумулировать энергию в диапазоне нескольких десятков мегаджоулей, — задача весьма сложная и дорогостоящая. Для ВВ удельная энергия составляет $\rho D^2/16 \approx 10$ МДж π^{-1} (где ρ — плотность ВВ, D — скорость волны детонации). Можно попытаться перевести эту энергию в энергию магнитного поля, одновременно увеличивая концентрацию энергии. Впервые эту идею высказал А.Д. Сахаров [1] в 1951 г. Он указал, что при сохранении магнитного потока путём быстрого уменьшения индуктивности контура с током, сближая с помощью взрыва прямой и обратный проводники, энергию ВВ можно преобразовать в энергию магнитного поля, причём 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 [2]. Существует два основных ограничения, накладываемых на скорость сжатия магнитного потока. Во-первых, сжатие должно быть достаточно быстрым, для того чтобы выполнялось условие $dL/dt \gg R$ и нагрузка не повреждалась действием пондеромоторных сил. Во-вторых, поскольку при быстром изменении потока Ф появляется высокое электрическое напряжение U = -L dI/dt, требуется обеспечить достаточно прочную электрическую изоляцию, предохраняющую от электрических пробоев. Для эффективной работы генератора необходимо поддерживать напряжение постоянным на максимально допустимом уровне. При отсутствии потерь потока это может быть достигнуто при экспоненциальном законе вывода индуктивности.

2. Принцип работы и основные характеристики дискового взрывомагнитного генератора

На рисунке 1 схематически изображён дисковый взрывомагнитный генератор (ДВМГ). Когда магнитный поток в генераторе достигает заданной величины, контур генератора замыкается, захватывая таким образом введённый магнитный поток. В тот же момент с помощью

Б.Е. Гриневич, В.А. Демидов, А.В. Ивановский, В.Д. Селемир. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт

экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ E-mail: ivanovsky@elph.vniief.ru



Рис. 1. Дисковый взрывомагнитный генератор.

системы инициирования подрываются в синхронном режиме заряды BB по оси. Под действием продуктов взрыва токопроводящие пластины, схлопываясь, сжимают магнитный поток во всех полостях одновременно и вытесняют его из полостей сжатия через передающую линию в нагрузку. Форма токопроводящих пластин выбрана таким образом, чтобы сжатие осуществлялось по экспоненциальному закону.

Приведём результаты испытаний [3] одного из первых ДВМГ диаметром 400 мм, созданного по схеме, приведённой на рис. 1. Устройство состояло из двухкаскадного взрывомагнитного генератора (ВМГ) и индуктивной нагрузки Lload.

В эксперименте при начальном магнитном потоке ≈ 1 Вб, введённом в контур устройства с помощью конденсаторной батареи, предусилителем формировался начальный импульс тока с амплитудой 6,5 МА, который затем усиливался ДВМГ до 90 МА. Получен высокий коэффициент сохранения магнитного потока $\eta \approx 0.6$. В ДВМГ запасена энергия ≈ 10 МДж.

Возможность увеличения энергии в полезной нагрузке путём наращивания числа элементов в ДВМГ была проверена в эксперименте с десятимодульным ДВМГ диаметром 400 мм. При конечной индуктивности ДВМГ 4,7 нГн энергия магнитного поля составила 25 МДж, из них 15 МДж — в нагрузке.

К настоящему времени создано семейство ДВМГ с зарядами ВВ диаметром от 240 мм до 1000 мм (см. таблицу). В работах с ДВМГ достигнуты следующие параметры [4-15]: коэффициент усиления энергии 10-30; характерное время 3-10 мкс; удельная энергия 600 Дж см⁻³; выходная энергия 200 МДж; скорость лайнера массой 1 г 50 км с⁻¹ [16], массой 0,25 кг —



Рис. 2. Спиральный взрывомагнитный генератор: 1 — электродетонатор, 2 — заряд BB, 3 — лайнер, 4 — соленоид (статор), 5 замыкающий штырь (кроубар), 6 — изолятор, 7 — нагрузка, С конденсатор, К — разрядник.

15 км с⁻¹ [17], а также экспериментально подтверждена возможность квазисферического схлопывания лайнера под действием аксиально симметричного магнитного поля [11].

Россия (Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ВНИИЭФ)) обладает монополией на ДВМГ. Усилия по созданию ДВМГ. многократно предпринимавшиеся за рубежом, к успеху не привели.

3. Спиральные взрывомагнитные генераторы

Спиральные взрывомагнитные генераторы (СВМГ), имея существенно бо́льшие индуктивность и скорость её вывода (уменьшения), по сравнению с таковыми в других типах взрывомагнитных генераторов, могут эффективно работать с нагрузкой с широким диапазоном индуктивности и сопротивления (рис. 2). Основными элементами СВМГ являются расположенные коаксиально цилиндрический соленоид и металлическая труба с зарядом ВВ, электрически соединённые друг с другом через нагрузку. Магнитный поток, создаваемый в объёме генератора внешним источником энергии, сжимается центральной трубой, которая при инициировании заряда BB с противоположного от нагрузки торца разлетается под действием продуктов детонации в виде конуса, перемещающегося вдоль оси устройства со скоростью детонации [1, 2]. Центральная труба изготовляется из мягкой меди или мягких сплавов алюминия.

Эффективность СВМГ сильно зависит от распределения витков по длине соленоида. Генераторы с возрастающим шагом витков в направлении нагрузки обеспечивают значительно больший ток и более высокое усиление энергии, чем СВМГ с постоянным шагом.

T ------

Гаолица. Результаты экспериментов с ДВМП								
Диаметр заряда ВВ, мм	Число элементов	Масса ВВ в одном элементе, кг	Ток запитки, МА	Индуктив- ность нагрузки, нГн	Ток в нагрузке, МА	Магнитная энергия в нагрузке, МДж	Характерное время нарастания тока в нагрузке, мкс	Литература
240	3	2	5,2	1,5	60	2,7	$\approx 3,5$	[12]
250	3	0,9	6,1	1,14	62,6	2,25	4,4	[13]
400	10	6,7	6,1	4,7	102	24,7	≈ 5	[14]
480	5	16	8,1	6,8	90	28	$\approx 6,5$	[15]
1000	5	38	10	4	225	90	≈ 10	[14]
1000	5	54	14,6	5,8	265	205	12	[9]

Распределение витков вдоль оси статора должно обеспечивать постоянство максимального напряжения в генераторе [18]. Электрическая прочность изоляции витков должна быть не ниже 100 кВ мм⁻¹ [19].

Генерирование магнитной энергии в СВМГ происходит за счёт работы, совершаемой разлетающейся центральной трубой против давления магнитного поля. Выражение для мощности СВМГ в общем случае имеет вид

$$P = \frac{\mu_0}{2} \int_S H^2(t) V_\perp(t) \,\mathrm{d}S$$

где H — напряжённость магнитного поля на поверхности трубы, S — площадь поверхности трубы, V_{\perp} — радиальная скорость стенки трубы.

Отсюда видно, что для увеличения мощности СВМГ необходимо в конце его работы обеспечить максимальные значения H, V_{\perp} и S. Магнитное поле в реальных генераторах ограничивается величиной порядка 1 МГс. Скорость радиального разлёта трубы V_{\perp} связана с энергетическими свойствами ВВ. Площадь деформирующегося участка центральной трубы зависит от начальной геометрии трубы и заряда ВВ на конечном участке генератора, а также от способа инициирования заряда на этом участке.

В [20] для рационального использования ВВ предложена труба с коническим расширением в сторону нагрузки. Для повышения мощности СВМГ в [21, 22] толщина стенки конусной части центральной трубы равномерно уменьшается в направлении расширения трубы.

Важнейшим фактором, ограничивающим энергию и мощность СВМГ, является осевое смещение крайних со стороны нагрузки витков под действием магнитного поля. В результате чего изоляция разрушается и витки перемыкаются, что приводит к большим потерям магнитного потока. Этот эффект необходимо учитывать при конструировании СВМГ [22].

Одним из самых мощных СВМГ, созданных во ВНИИЭФ, является генератор с внутренним диаметром витков 240 мм [23]. При начальной энергии \approx 40 кДж он обеспечивает в нагрузках 50–120 нГн ток до 15 МА, магнитную энергию \approx 8 МДж. Характеристики генератора превосходят мировой уровень по удельной энергии в 2–3 раза, по коэффициенту усиления энергии в 10–20 раз и быстроходности примерно в 2 раза.

4. Проблемы формирования токового импульса

Время накопления энергии в ВМГ сравнительно велико (несколько десятков микросекунд), что, в частности, затрудняет их использование в экспериментах по нагреванию высокотемпературной плазмы путём сжатия её тонкими лайнерами. Это связано с развитием неустойчивостей. Для сокращения времени протекания тока до микросекундного уровня применяют схему коммутации, в которой накопительный контур ВМГ и нагрузка включены параллельно через размыкатель тока (рис. 3). Этот способ формирования токового импульса позволяет существенно увеличить крутизну импульса тока в нагрузке.

Во ВНИИЭФ разработаны размыкатели тока нескольких видов: взрывные с использованием ВВ [24, 25], электровзрывные [26–28] и лайнерные [29].



Рис. 3. Электрическая схема с размыкателем тока: *L*_c, *L*_r, *L*_{load} — индуктивности конечного контура ВМГ, цепи разрыва и нагрузки соответственно; *R*_r, *R*_{load} — сопротивления размыкателя и нагрузки; К — ключ (разрядник); *I*_c, *I*_r, *I*_{load} — токи в разрываемом контуре, размыкателе и нагрузке соответственно.

Принцип действия взрывного размыкателя тока (ВРТ) основан на механическом разрушении фольги с помощью заряда ВВ. Применение десяти параллельно включённых ВРТ позволило получить в нагрузке индуктивностью $\approx 1,5$ нГн импульс тока амплитудой ≈ 50 МА с производной $\approx 4 \times 10^{13}$ A с⁻¹. Величина разрываемого тока при этом составила около 85 МА [30]. С помощью ВРТ в нагрузке индуктивностью 10–15 нГн был сформирован импульс тока амплитудой 20 МА со временем нарастания фронта ≈ 2 мкс [31]. В [12] от СВМГ с ВРТ в нагрузке 20 нГн получен импульс тока 6,6 МА с длительностью нарастания фронта 0,4 мкс. В [32] показана возможность использования ВРТ для обострения импульса тока ДВМГ.

Принцип действия электровзрывного размыкателя тока (ЭВРТ) основан на многократном возрастании сопротивления металлической фольги или проволоки при электрическом взрыве. Этот тип размыкателя широко используется в различных электрофизических установках. Такой размыкатель на основе медной фольги цилиндрической формы был применён во ВНИИЭФ в экспериментах с ДВМГ при токах 60–90 МА и мощности до ≈ 10 ТВт [27].

Лайнерный размыкатель в опыте с ДВМГ при токе ≈ 70 МА передал в нагрузку более 2 МДж энергии за время около 1 мкс [29].

В опытах с размыкателями достигнуты следующие максимальные параметры: линейная плотность тока ≈ 0.9 MA см⁻¹ (лайнерный размыкатель); переданные в нагрузку энергия и мощность ≈ 10 MДж и ≈ 10 TBT (ЭВРТ); полный ток ≈ 85 MA (10 взрывных размыкателей); минимальное время нарастания фронта импульса тока в нагрузке, сформированного ВРТ, 0,3 мкс [12].

5. Применение взрывомагнитных генераторов

Одним из применений СВМГ является запитка дисковых генераторов. При этом очень важно, что для снижения теплового и механического воздействия тока на элементы ДВМГ спиральный генератор должен быть быстроходным, т.е. иметь малое характерное время нарастания тока [33].

Рассмотрим другие области использования СВМГ. Для работы камеры МАГО (МАГнитное Обжатие), включающей в себя два отсека, соединённых соплом Лаваля и заполненных дейтерий-тритиевой смесью, требуются два СВМГ, первый из них производит предварительную запитку камеры, по завершению которой включается источник быстрой запитки, состоящий из СВМГ и обострителя тока. В первом отсеке камеры



Рис. 4. Схема работы камеры МАГО.

возникает разряд в газе, в результате чего магнитное поле вмораживается в плазму. Образовавшаяся плазма под действием магнитного поля перетекает из первого отсека во второй через сопло. При быстром нарастании магнитного поля течение плазмы на выходе из сопла переходит в сверхзвуковой режим и во втором отсеке формируется ударная волна, в которой происходит торможение и нагрев плазмы [34, 35]. Схема работы камеры МАГО приведена на рис. 4. В камере было получено 5×10^{13} нейтронов за импульс. В [36, 37] предложен СВМГ, совмещающий в себе функции предварительной и быстрой запиток камеры МАГО.

На основе высокоиндуктивного СВМГ со статором диаметром 80 мм и камеры с плазменным фокусом создан взрывомагнитный импульсный нейтронный источник (ВМИНИ) [38]. При токе ≈ 1 МА ВМИНИ с высокой временной и амплитудной стабильностью генерировал около 10^{12} нейтронов за импульс.

Спиральный ВМГ диаметром 200 мм с ВРТ, формирующим ток более 5 МА с длительностью нарастания фронта 400 нс, применялся для запитки Z-пинча, при этом зафиксирована генерация импульса мягкого рентгеновского излучения (МРИ) с энергией ≈ 180 кДж и временем на полувысоте 20 нс [39]. Во ВНИИЭФ спиральные ВМГ впервые были применены для запитки сверхвысокочастотных генераторов [40].

СВМГ нашли применение для разгона твердотельных лайнеров до высоких скоростей. Наиболее известна серия из семи экспериментов *R-Damage*, проведённых совместно ВНИИЭФ и Лос-Аламосской национальной лабораторией (ЛАНЛ), по изучению динамического разрушения в сходящейся геометрии с использованием взрывомагнитного устройства в качестве драйвера цилиндрического алюминиевого лайнера, создающего осесимметричное ударное воздействие на исследуемую мишень [41]. Целью экспериментов являлось исследование особенностей зарождения и развития откольного разрушения, а также компактирования повреждённости в экструдированном алюминии марки "Alcan".

Серия экспериментов *R-Damage* продемонстрировала перспективность применения импульсных источников мощности на основе ВМГ для создания в конструкционных материалах импульсных нагрузок с контролируемой амплитудой и длительностью. В частности, простота реализации режима с двумя последовательными нестационарными ударными волнами в мишени открывает широкие возможности исследования особенностей процесса откольного разрушения и компактирования реальной повреждённой среды.

Результатом серии *R-Damage* стали полученная впервые информация о компактировании и верификация модели компактирования.

К преимуществам представленной методики, по сравнению с нагружением с помощью BB, 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.

При запитке током высокоимпедансных нагрузок на первое место выдвигается проблема генерации высоких энергий в конечном контуре ВМГ и передача её с помощью повышающих трансформаторов в нагрузку. Одной из задач, решаемых с помощью ВМГ по этой схеме, являлась накачка неодимового и фотодиссоционного лазеров [42, 43]. Энергия лазерного излучения составляла около 100 кДж.

Спирально-коаксиальный ВМГ диаметром 160 мм с кабельным трансформатором обеспечивает в нагрузке 12-15 мкГн энергию до 2 МДж. Максимальное выходное напряжение достигало ≈ 200 кВ.

Возможность создания полностью автономных СВМГ позволяет применять их для испытания грозозащищённости важных промышленных объектов. В экспериментах по воспроизведению на защитном заземлении токового импульса молнии впервые зарегистрировано возникновение и развитие вдоль поверхности грунта мощных искровых каналов длиной до 30 м. В этих экспериментах при токе ~ 70 кА активное сопротивление заземлителя уменьшилось более чем на порядок [44].

ДВМГ среднего класса (диаметр заряда BB 400 мм) был успешно применён в серии совместных экспериментов ВНИИЭФ и ЛАНЛ RHSR (Russian High Strain Rate) [45] по исследованию динамической прочности материалов методом роста возмущений при скоростях деформаций $d\epsilon/dt = 10^5 - 10^6 \text{ c}^{-1}$ в режиме безударного нагружения. Трёхслойный цилиндрический лайнер состоял из токонесущего алюминия, полиэтилена или воды и исследуемого материала (меди) (Al-H₂O (полиэтилен)–Cu). На внешней поверхности меди на двух последовательных участках были возбуждены осесимметричные синусоидальные возмущения с длинами волн $\lambda = 2$ и 4 мм.

В результате серии экспериментов 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 обусловлен стабильной работой системы импульсной мощности на основе ДВМГ — погрешность воспроизведения импульса тока составила $\leq 3\%$.

Одним из направлений инерционного термоядерного синтеза (ИТС) является генерирование мощных импульсов МРИ с энергией до ≈ 10 МДж за время ≈ 10 нс и обжатие этим излучением термоядерной мишени [46– 48]. В проекте "Эмир" [48] для генерации МРИ используются одно- и двухкаскадные лайнеры из вольфрамовых проволок диаметром $\approx 0,01$ мм с запиткой их от ВМГ. На начальном этапе исследований применялись



Рис. 5. (а) Установка "Atlas" (Невада, США), создающая ток амплитудой до 30 МА за время ≈ 5 мкс; скорострельность — один эксперимент в две недели (стоимость капитальных затрат 43 млн долларов США). (б) СВМГ с ВРТ: ток 20 МА за 1–2 мкс (стоимость изготовления около 150 тыс. долларов США). (в) ДВМГ семейства "Поток": диаметр 400 мм, ток 100 МА за 6 мкс (стоимость изготовления около 250 тыс. долларов США). (г) ДВМГ семейства "Поток": диаметр 1000 мм, ток 300 МА за 10 мкс.

спиральные ВМГ диаметром 100 и 200 мм с ВРТ. В этих экспериментах токовые импульсы имели амплитуду 2,5– 5,5 МА и длительность нарастания фронта 300–400 нс. Зарегистрирован выход МРИ до \approx 180 кДж длительностью \approx 20 нс и температурой \approx 50 эВ [49]. При использовании 10-элементного ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 240 мм и ЭВРТ в лайнерах были получены токи на уровне 14 МА с характерным временем нарастания 1,1 мкс. Энергия МРИ составляла \approx 0,8 МДж [39]. На сегодня это самый мощный источник МРИ в России. В дальнейшем планируется применение ДВМГ с зарядами ВВ диаметром 480 мм с числом элементов от 5 до 15 и ВРТ. Ожидаемые токи в лайнере до \approx 50 МА с временем нарастания \approx 0,5 мкс. По расчётам энергия МРИ при таких параметрах тока должна составлять более 10 МДж.

Среди размыкателей, принципиально способных сформировать импульсы тока в несколько десятков мегаампер за время около 100 нс, следует отметить: электровзрывные, плазменные и плазменно-потоковые. Электровзрывные являются наиболее изученными и простыми. Вероятно, ответ на вопрос о возможности зажигания быстрее и дешевле удастся получить, используя ДВМГ диаметром 1000 мм, способный с применением электровзрывного фольгового размыкателя тока в виде змейки создать импульс тока амплитудой ≈ 150 МА с временем нарастания 1–2 мкс в нагрузке ≈ 10 нГн. Работоспособность электровзрывного размыкателя такого типа проверена в опыте с 10-элементным ДВМГ диаметром 250 мм [50].

Для проверки возможности обострения тока до ~ 100 нс были проведены расчёты тока в нагрузке. Показано, что ЭВРТ и нагрузку необходимо "развязать" на стадии электровзрыва. Это можно осуществить установкой разрядника. Результаты расчётов работы СВМГ с разрядником показали, что напряжение на ЭВРТ достигает ~ 400 кВ, ток в нагрузке — 5 МА за 130 нс. Бо́льших токов можно достичь при работе ЭВРТ с ДВМГ. Вакуумные низкоиндуктивные разрядники, коммутирующие импульсы тока при мегавольтных напряжениях за время < 10 нс, разработаны по программе "Байкал" [51].

Таким образом, современный уровень развития взрывной импульсной мощности и систем коммутации импульсов тока позволяет подвести к Z-пинчу энергию до 100 МДж и достичь условий термоядерного зажигания.

Сравнительные характеристики взрывомагнитных генераторов и стационарных источников импульсной мощности приведены на рис. 5. Показано преимущество ВМГ по ряду основных параметров.

6. Заключение

История магнитной кумуляции насчитывает почти 60 лет. За это время были хорошо исследованы вопросы диффузии сильных магнитных полей в металл. Создано и испытано много различных конструкций взрывных генераторов импульсов электромагнитной энергии. Созданы многоэлементные дисковые ВМГ с энергией более 100 МДж, высокоиндуктивные быстроходные спиральные ВМГ с коэффициентом усиления энергии до ≈ 1000 и разработаны различные размыкатели для обострения импульса тока ВМГ до уровня менее чем 1 мкс. Для запитки высокоимпедансных нагрузок (лазеров, защитных заземлений и т.д.) созданы специальные повышающие трансформаторы.

В последние годы вновь возник интерес к взрывным системам импульсной мощности в связи с проблемой термоядерного зажигания в режиме инерционного удержания. ВМГ дают возможность опробовать работоспособность многих привлекательных схем зажигания без капитальных затрат на строительство мощных электрофизических установок. ВМГ являются уникальными источниками импульсов тока, им нет альтернативы при проведении многих физических экспериментов.

Список литературы

- 1. Сахаров А Д и др. *ДАН СССР* **165** 65 (1965) [Sakharov A D et al. *Sov. Phys. Dokl.* **10** 1045 (1966)]
- Сахаров А Д УФН 88 725 (1966) [Sakharov A D Sov. Phys. Usp. 9 294 (1966)]
- Протасов М С и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 26
- Чернышев В К и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 23
- Pavlovskii A I et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 331
- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 347
- Fowler C M et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 337
- Павловский А И и др. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 347
- Шевцов В А и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 1997) с. 282
- Demidov V A et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 351
- 11. Мохов В Н и др. *ДАН СССР* **247** (1) 83 (1979) [Mokhov V N et al. *Sov. Phys. Dokl.* **24** 557 (1979)]
- Demidov V A et al., in Megagauss Magnetic Fields and High Energy Liner Technology (Eds G F Kiuttu, R E Reinovsky, P J Turchi) (Piscataway, NJ: IEEE, 2007) p. 245
 Aryutkin M Yu et al., in The 13th Intern. Conf. on Megagauss
- Aryutkin M Yu et al., in *The 13th Intern. Conf. on Megagauss* Magnetic Field Generation and Related Topics, Suzhou, China, 2010 (to be published)
- Чернышев В К и др. Вопр. атом. науки и тех. Мат. моделир. физ. процессов 4 33 (1992)
- 15. Selemir V D et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1762 (2010)
- Buyko A M et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power Systems* (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 743
- Гриневич Б Е и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ– ВНИИЭФ, 1997) с. 677
- Демидов В А и др. ПМТФ (6) 106 (1981) [Demidov V A et al. J. Appl. Mech. Tech. Phys. 22 829 (1981)]
- 19. Demidov V A IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1773 (2010)
- Павловский А И и др., Авт. свидетельство № 243103. МКИ H02N 11/00. Приоритет 28.11.67; Бюлл. изобрет. (33) (1969)
- Веселов В Н и др., Авт. свидетельство № 1409087. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 09.10.85; Бюлл. изобрет. (13) (2000)
- 22. Demidov V A IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1780 (2010)
- Селемир В Д и др., в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ – ВНИИЭФ, 1997) с. 248
- Chernyshev V K, Volkov G I, Vakhrushev V V, in *Megagauss* Physics and Technology (Ed. P J Turchi) (New York: Plenum Press, 1980) p. 663
- Павловский А И, Васюков В А, Руссков А С Письма в ЖТФ 3 789 (1977)
- Петрухин А А и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 384
- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 465
- Демидов В А, Скоков В И, в сб. Мегагауссная и мегаамперная импульсная технология и применение (Под ред. В К Чернышева, В Д Селемира, Л Н Пляшкевича) (Саров: РФЯЦ–ВНИИЭФ, 1997) с. 385
- Петрухин А А и др., в сб. Сверхсильные магнитные поля. Физика. Техника. Применение (Под ред. В М Титова, Г А Швецова) (М.: Наука, 1984) с. 406

- Chernyshev V K et al., in *Megagauss Field and Pulsed Power* Systems (Eds V M Titov, G A Shvetsov) (New York: Nova Sci. Publ., 1990) p. 533
- Chernyshev V K et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 731
- 32. Demidov V A et al. IEEE Trans. Plasma Sci. 38 1768 (2010)
- Chernyshev V K et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 519
- Буйко А М н др. Вопр. атом. науки и тех. Методики и программы численного решения задач математической физики (3(14)) 30 (1983)
- 35. Буйко А М и др. *ДАН СССР* **344** 323 (1992)
- Веселов В Н и др., Авт. свидетельство № 1616386. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 14.03.88; Бюлл. изобрет. (22) (1995)
- Демидов В А и др., Авт. свидетельство № 1526480. МКИ Н02N 11/00. Приоритет 14.03.88; Бюлл. изобрет. (6) (1996)
- Demidov V A, Kazakov S A *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1758 (2010)
 Selemir V D, Demidov V A, Repin P B *IEEE Trans. Plasma Sci.* **38** 1754 (2010)
- 40. Бродский А Я и др. *ДАН СССР* **314** 846 (1990) [Brodskii A Ya et al. *Sov. Phys. Dokl.* **35** 876 (1990)]
- Vasyukov V A et al., in Proc. of the 13th Intern. Conf. on Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, 2010 (to be published)
- Павловский А И и др., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 969
- Павловский А И и др., in Megagauss Magnetic Field Generation and Pulsed Power Applications (Eds V Cowan, R B Spielman) (New York: Nova Sci. Publ., 1994) p. 977
- Selemir V D et al., in Proc. of the 15th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Monterey, Calif., 2005 (Eds J Maenchen, E Schamiloglu) p. 541
- Arinin V A et al., in Megagauss Magnetic Field Generation and Related Topics, Berlin, Germany, 2005 (Ed. M Von Ortenberg) p. 348
- Spielman R B et al., in Proc. of the 10th IEEE Intern. Pulsed Power Conf., Albuquerque, NM, USA, 1995 (Eds W Baker, G Cooperstein) p. 396
- 47. Дябилин К С и др. *ТВТ* **34** 479 (1996) [Dyabilin K S et al. *High Temp.* **34** 473 (1996)]
- Селемир В Д и др. Физ. плазмы 25 1085 (1999) [Selemir V D et al. Plasma Phys. Rep. 25 1000 (1999)]
- Селемир В Д и др. Физ. плазмы 33 424 (2007) [Selemir V D et al. Plasma Phys. Rep. 33 381 (2007)]
- Ивановский А В и др., в сб. VIII Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии (Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006) с. 563
- 51. Долгачёв Г И и др. ПТИ (2) 1 (2007)

PACS numbers: 07.35. + k, 47.40. - x, 61.05.C - DOI: 10.3367/UFNr.0181.2011041.0427

Импульсные рентгенографические исследования структуры веществ в ударных волнах

А.М. Подурец

При проведении ударно-волновых исследований, как правило, экспериментально измеряются физические величины, по которым можно лишь косвенно судить о структуре вещества за фронтом ударной волны (УВ). Поэтому необходимую информацию о структуре фаз высокого давления мы получаем в основном из экспери-

А.М. Подурец. ФГУП "Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров, Нижегородская обл., РФ E-mail: am.podurets@gmail.com