

Литература

1. Бахтин В. А., Клинов М. С., Крюков В. А. и др. Расширение DVM-модели параллельного программирования для кластеров с гетерогенными узлами // Вестник Южно-Уральского университета. Сер. Математическое моделирование и программирование. 2012, № 18 (277). Вып. 12. С. 82–92.
2. Kazemi H., Vestal C. R., Shank G. D. An Efficient Multicomponent Numerical Simulator // Soc. Pet. Eng. J. 1978. October. P. 355–368.
3. Fussell D. D., Yanosik J. L. An Iterative Sequence for Phase-Equilibria Calculations // Soc. Pet. Eng. J. 1978, June. P. 173–182.
4. Королев А. В. Моделирование фазовых равновесий многокомпонентных систем с использованием уравнений состояния // Сб. трудов ВНИИ. 1984, № 87. С. 78–87.
5. Бахтин В. А., Клинов М. С., Колганов А. С. и др. Автоматическое отображение Фортран-программ на кластеры с ускорителями. Научный сервис в сети Интернет // Труды Международной суперкомпьютерной конференции. Новороссийск, 22–27 сентября 2014. М.: Изд-во МГУ, 2014. С. 17–22.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУМЕРНЫХ МГД ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЛАГРАНЖЕВЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК НА ПРИМЕРЕ РАСЧЕТОВ ВЗРЫВНЫХ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ ТОКА

Ю. В. Власов, П. В. Дудай, А. И. Панов, А. В. Самодолов, С. С. Соколов

Российский Федеральный Ядерный Центр –
Всероссийский НИИ Экспериментальной Физики, г. Саров

Для исследования работы различных экспериментальных нагрузок (лайнрные системы, камеры типа МАГО, «Плазменный фокус» и т. д.) необходимо формировать импульсы тока определенной формы и амплитуды. При использовании в качестве источника энергии спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ) чаще всего формирование импульсов тока в нагрузке осуществляется взрывными размыкателями тока (ВРТ), использующими принцип разрыва проводника кумулятивными струями или на ребристой преграде с помощью заряда взрывчатого вещества (ВВ) [1, 2].

Численное моделирование процесса коммутации тока взрывными размыкателями требует расчета растяжения проводника под действием продуктов детонации, а также электровзрыва растянутых участков фольги. Кроме того, необходимо рассчитывать изменение токов в ветвях схемы коммутации. Особенности геометрии взрывных размыкателей требуют использования программ для двумерного магнитогиродинамического (МГД) моделирования.

Для моделирования процесса коммутации тока СВМГ взрывным размыкателем использовалась двумерная МГД методика ТИМ [3, 4]. В этой методике имеется возможность расчета процесса детонации как заряда ВВ системы инициирования, так и разрывного заряда размыкателя. Можно также рассчитать конфигурацию проводника и распределение его параметров по пространству к моменту начала коммутации тока, исходя либо из расчета по схеме коммутации при известных зависимостях индуктивности и сопротивления генератора от времени, либо из известной зависимости тока генератора от времени.

Анализ конструкций кумулятивных размыкателей и размыкателей на ребристой преграде показывает, что все они представляют периодическую структуру, состоящую из повторных элементов. Они отличаются друг от друга лишь способом разрушения проводника. Поэтому, исходя из периодической структуры конструкции ВРТ, в качестве расчетной области используется один полупериод этой структуры.

Описание методики ТИМ-2D

В расчетной методике ТИМ-2D используются дифференциальные уравнения магнитной гидродинамики с учетом упругопластики [5], записанные в переменных Лагранжа:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\rho}{dt} = -\rho \operatorname{div} \vec{U}; \\ \rho \frac{d\vec{U}}{dt} = -\operatorname{grad} P + \operatorname{div} S + \frac{1}{c} [\vec{i} \times \vec{H}]; \quad \vec{i} = \frac{c}{4\pi} \operatorname{rot} \vec{H}; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{H}}{\rho} \right) = \left(\frac{\vec{H}}{\rho} \nabla \right) \vec{U} - \frac{c}{\rho} \operatorname{rot} \vec{E}; \\ \operatorname{div} \vec{H} = 0; \quad \vec{i} = \sigma \vec{E}; \\ \frac{d\varepsilon}{dt} = -P \frac{d1/\rho}{dt} + \frac{1}{\rho} S_p(SD) + \frac{(\vec{i}, \vec{E})}{\rho}; \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{U}, \end{array} \right.$$

где ρ – плотность вещества, ε – внутренняя энергия, \vec{U} – вектор скорости, \vec{r} – радиус-вектор, P – давление, \vec{H} – напряженность магнитного поля, \vec{E} – напряженность электрического поля, \vec{i} – плотность тока, $\sigma = \sigma(\rho, \varepsilon)$ – электропроводность среды, S – девиатор тензора напряжений, D – тензор скоростей деформации, $S_p(SD)$ – первый инвариант тензора SD.

Влияние магнитного поля на движение вещества осуществляется через объемную электромагнитную силу:

$$\vec{F} = \frac{1}{c} [\vec{i} \times \vec{H}] = -\frac{1}{8\pi r^2} \operatorname{grad}(rH)^2.$$

Кроме этого, в уравнение энергии добавляется объемный источник джоулева тепла

$$Q = (\vec{i}, \vec{E}) = \frac{X}{4\pi r^2} \operatorname{grad}^2(rH),$$

а уравнение индукции имеет вид

$$\rho \frac{d}{dt} \left(\frac{\vec{H}}{r\rho} \right) = \operatorname{div} \frac{X}{r^2} \operatorname{grad}(rH),$$

где $X = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$, c – скорость света.

Уравнения газодинамики и упругопластики в методике ТИМ-2D решаются по явной схеме, а уравнения диффузии магнитного поля – по неявной. При построении разностной схемы для уравнения диффузии используется дифференциально-проеекционный способ аппроксимации дифференциальных операторов [6], в результате чего получается система разностных уравнений с симметричной положительно определенной матрицей. Система линейных алгебраических уравнений решается с использованием библиотек решателей.

Для более адекватного моделирования движения твердых материалов в рассматриваемых конструкциях под действием импульсных нагрузок использовались упругопластические модели сдвиговой прочности материалов [7] и модель кинетики зарождения и развития поврежденности [8]. Для описания процессов детонации ВВ, оказывающих влияние на формирование и развитие ударно-волновых воздействий в элементах рассматриваемых конструкций, использовалась модель кинетики возбуждения и развития взрывчатого превращения ВВ [9]. Расчеты проводились на неструктурированных сетках, состоящих из произвольных несамопересекающихся многоугольников (не обязательно выпуклых), с произвольным числом ребер, выходящих из узлов. В численных расчетах на каждом временном шаге на границах проводников рассчитывается магнитное поле, определяе-

мое моделированием работы электрических цепей генератора и нагрузки. Уравнения цепи имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d(L_S + L_G)I_G}{dt} + \int_G \mathbf{E}d\mathbf{l} = 0, \\ \frac{d(L_I + L_H)I_H}{dt} + \int_H \mathbf{E}d\mathbf{l} = 0, \end{cases}$$

где L_G , L_H - индуктивности генератора и нагрузки, определяемые по геометрии на каждом шаге, L_S и L_I - буферные индуктивности (заданные величины), I_G , I_H - токи в цепи ВМГ и в цепи нагрузки.

Особое внимание в численных расчетах уделялось поддержанию качества расчетной сетки. В процессе расчета изначально тонкий разрываемый проводник (фольга) сильно растягивается, затем на растянутых участках происходит электровзрыв, который сопровождается резким разбуханием проводника, таким образом, количество счетных ячеек в фольге сильно меняется. Поэтому для описания происходящих процессов был задействован весь аппарат поддержания качества расчетной сетки, это алгоритмы локальных перестроек сетки путем дробления и объединения ячеек [11] и алгоритмы коррекции, основанные на методике наложения дифференцируемых связей [12].

Процесс переброски тока осуществляется за счет диффузии магнитного потока через разрываемый проводник. Чтобы правильно описать данный процесс в фольге по толщине, должно быть не менее пяти точек. Лагранжевый подход позволяет путем дробления и объединения ячеек поддерживать необходимое число ячеек по толщине в подвижной растягиваемой фольге на протяжении всего времени счета задачи.

Моделирование работы ВРТ с ребристой преградой на основе ВМГ-200

Постановка этого опыта и опубликованные по нему экспериментальные и расчетные данные приведены в [13]. Эскиз спирального ВМГ с взрывным размыкателем представлен на рис. 1. Из эскиза видно, что ВРТ представляет собой периодическую структуру, состоящую из повторных элементов, поэтому в качестве расчетной области используется один полупериод этой структуры. На рис. 1 пунктиром выделен элемент размыкателя, являющийся расчетной областью для МГД расчета. Разрыв проводника в данном ВРТ осуществляется за счет того, что при воздействии продуктов детонации заряда ВВ участки проводника под пазами преграды приобретают большую скорость, чем участки проводника под ребрами преграды.

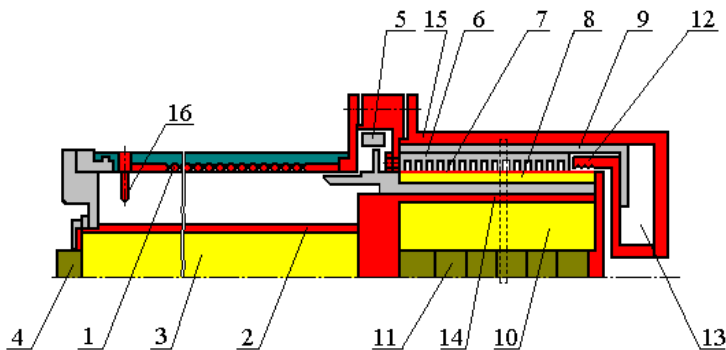


Рис. 1. Эскиз спирального ВМГ с взрывным размыкателем (а): 1 – спираль, 2 – центральная труба, 3 – заряд ВВ, 4 – электродетонатор (ЭД), 5 – измерительный датчик, 6 – ребристая преграда с металлическими вставками на ребрах, 7 – фольга, 8 – заряд ВВ, 9 – изолятор, 10 – заряд ВВ, 11 – ЭД, 12 – замыкающий ключ, 13 – нагрузка, 14 – металлический цилиндр (прямой токопровод), 15 – корпус нагрузки (обратный токопровод), 16 – замыкающий ключ для шунтирования источника начального тока

Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 2.

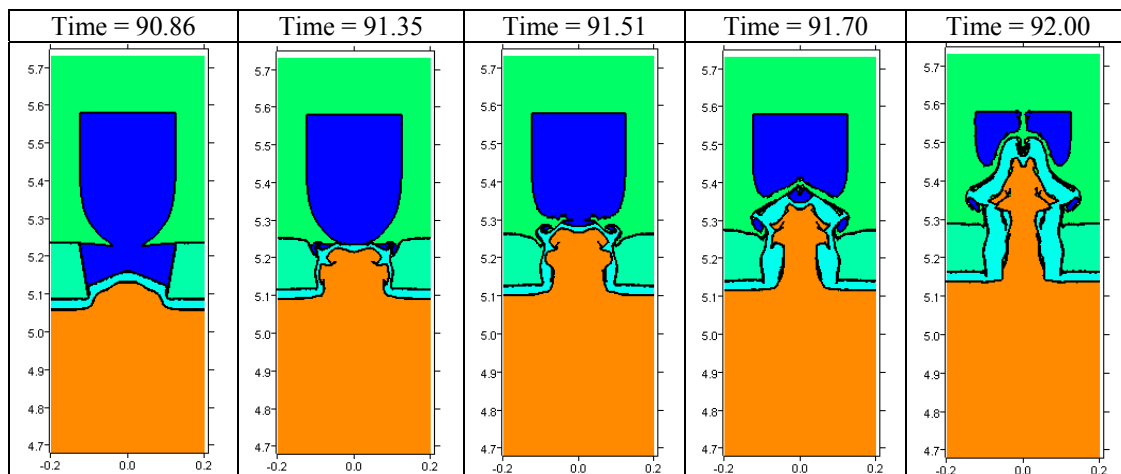


Рис. 2. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

При достижении энергии сублимации меди ($\approx 5,6$ кДж/г) происходит электровзрыв проводника. На рис. 3 показана динамика растяжения и электровзрыв растянутых участков медной фольги.

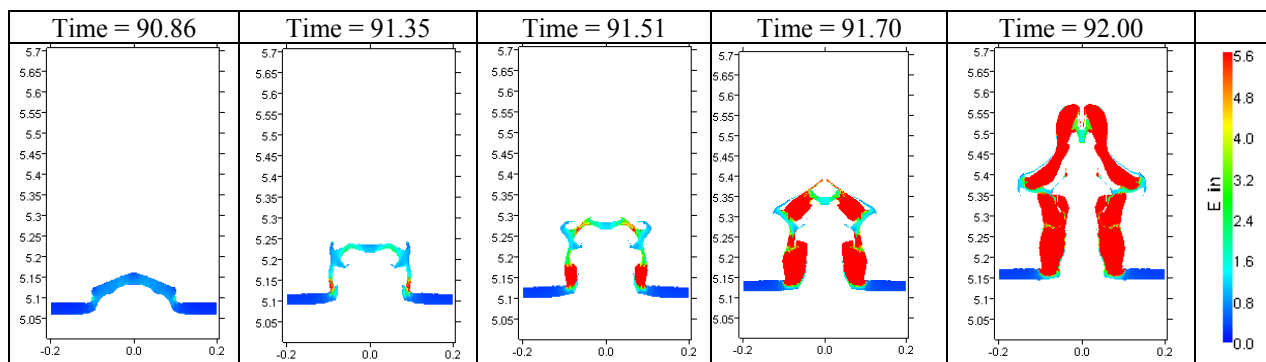


Рис. 3. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге

На рис. 4 представлены зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке.

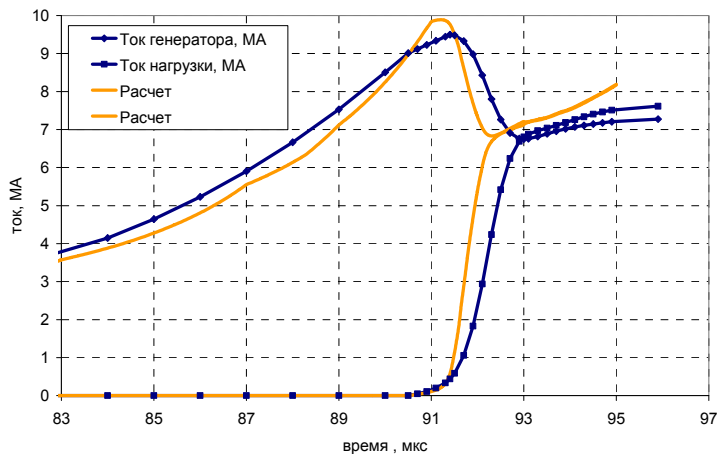


Рис. 4. Расчетные зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке и их сравнение с экспериментальными данными

Моделирование работы ВРТ с ребристой преградой из эксперимента «R-Damage»

Ранее в [10] была описана серия расчетов экспериментов «R-Damage» [14]. Здесь мы приводим основные результаты расчетов ВРТ с ребристой преградой, выполненных на сгущающихся сетках. На рис. 5 представлено схематичное изображение ВРТ. Ребристая преграда выполнена из тефлона. Разрываемый проводник выполнен из алюминиевой фольги. Заряд ВВ выполнен из состава PBX 9501.

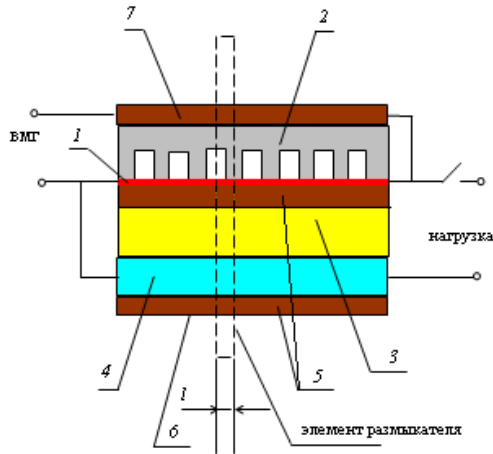


Рис. 5. Схема эксперимента с ВРТ на ребристой преграде: 1 – фольга, 2 – ребристая преграда, 3 – тефлон, 4 – внутренний токопровод, 5 – аксиально инициируемый заряд, 6 – поверхность, по которой инициируется заряд, 7 – корпус

На рис. 6 представлены зависимости расчетных и экспериментальных токов в цепях генератора и нагрузки от времени.

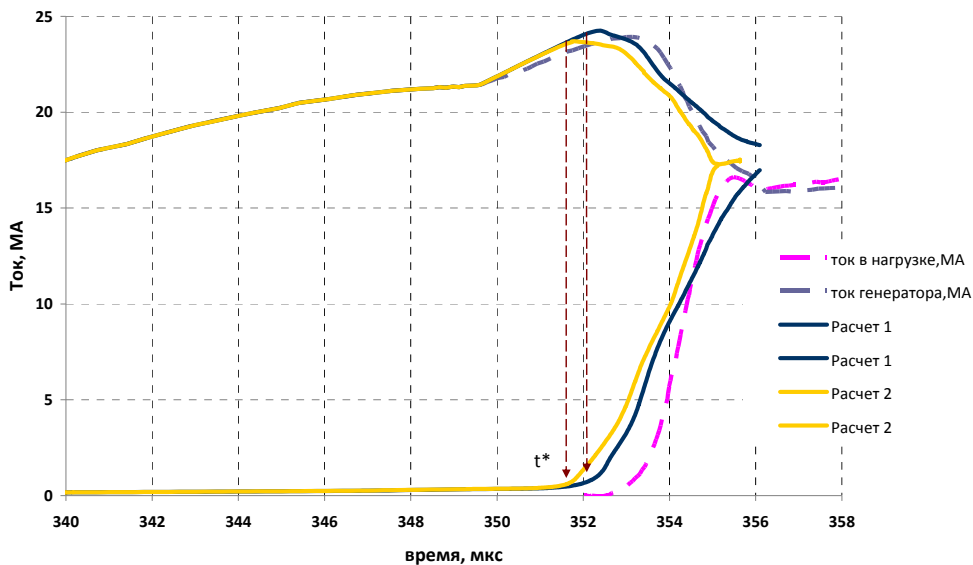


Рис. 6. Графики зависимости токов от времени

На рис. 6 обозначены результаты расчета на грубой сетке как «Расчет 1» и как «Расчет 2» – результаты расчета на подробной сетке. Видно, что увеличение счетных точек в задаче приближает время переброса тока из одной цепи в другую к экспериментальным значениям. Также на рис. 6 че-

рез t^* обозначено время достижения в алюминиевой фольге энергии сублимации ($\approx 12,1$ кДж/г). Далее на рис. 7 приведена динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ.

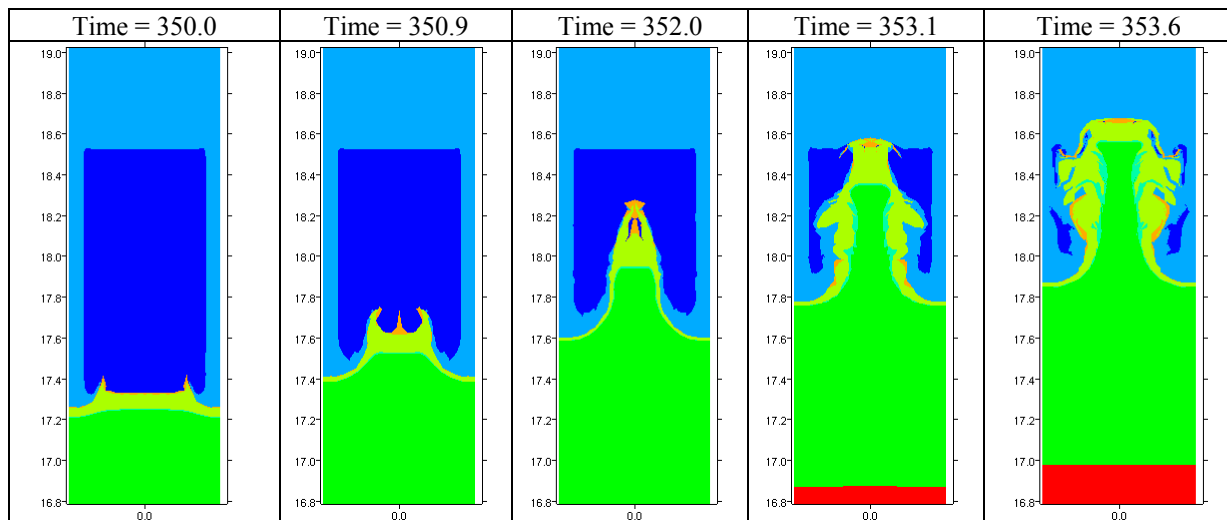


Рис. 7. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

На рис. 8 приведены растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге. Области фольги, где достигнуты значения энергии сублимации, обозначены красным цветом. Видно, что они находятся в местах наибольшего растяжения фольги на ребрах преграды.

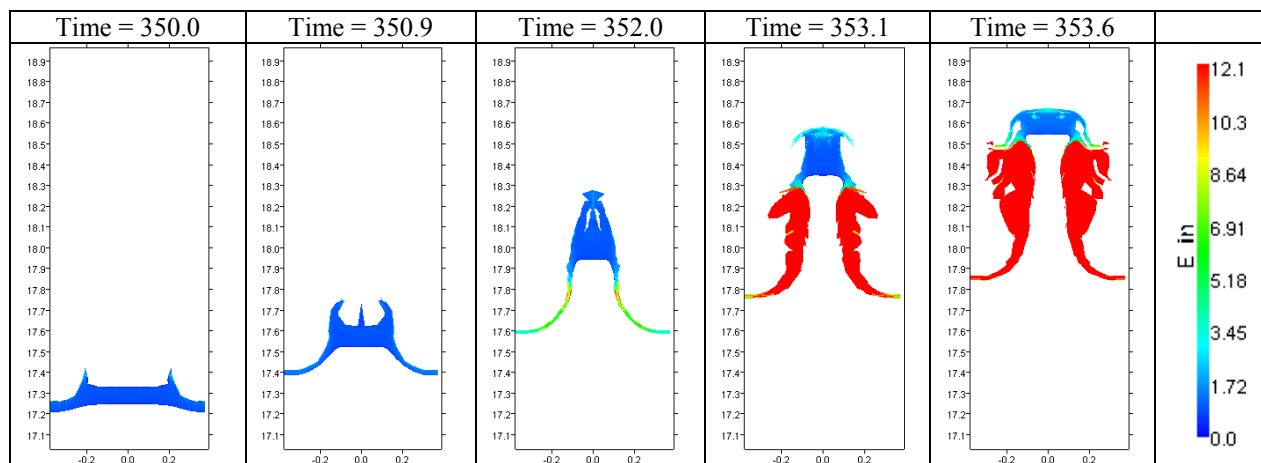


Рис. 8. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге

Моделирование работы ВРТ кумулятивного типа

На рис. 9 приведена схема эксперимента с ВРТ кумулятивного типа. Постановка этого опыта и опубликованные по нему экспериментальные данные были использованы нами для валидации методики ТИМ применительно к моделированию работы ВРТ [10].

Разрыв наружного проводника размыкателя производится диэлектрическими кумулятивными струями, образующимися при схлопывании стенок кольцевых кумулятивных выемок, выполненных на внешней поверхности полиэтиленового струеформирователя при прохождении по нему ударной волны.

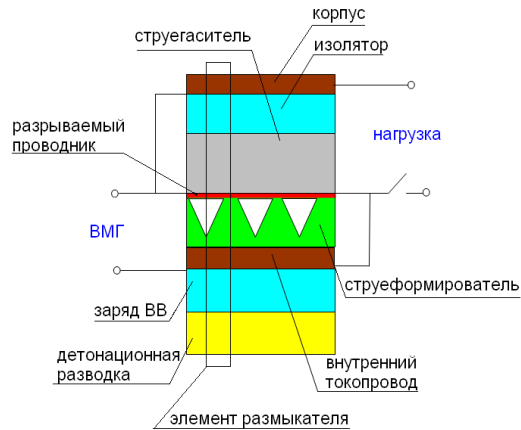


Рис. 9. Цилиндрический кумулятивный ВРТ

На рис. 10 представлено распределение веществ в ВРТ с алюминиевой фольгой на различные моменты времени, показывающее процесс формирования кумулятивной струи и состояние фольги в момент переброса тока.

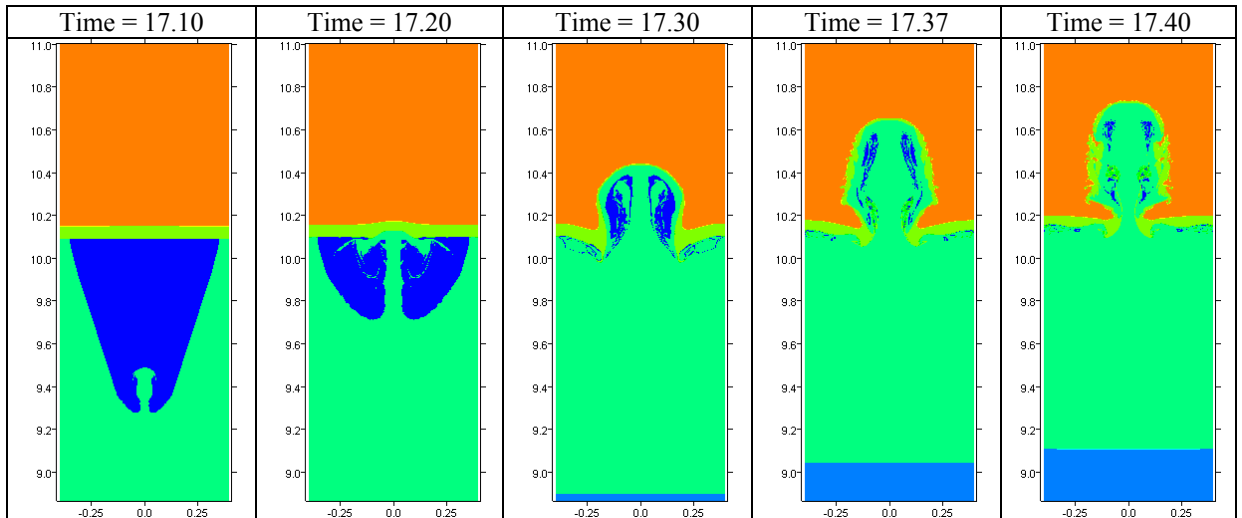


Рис. 10. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

На рис. 11 приведены растровые изображения распределения внутренней энергии в алюминиевой фольге.

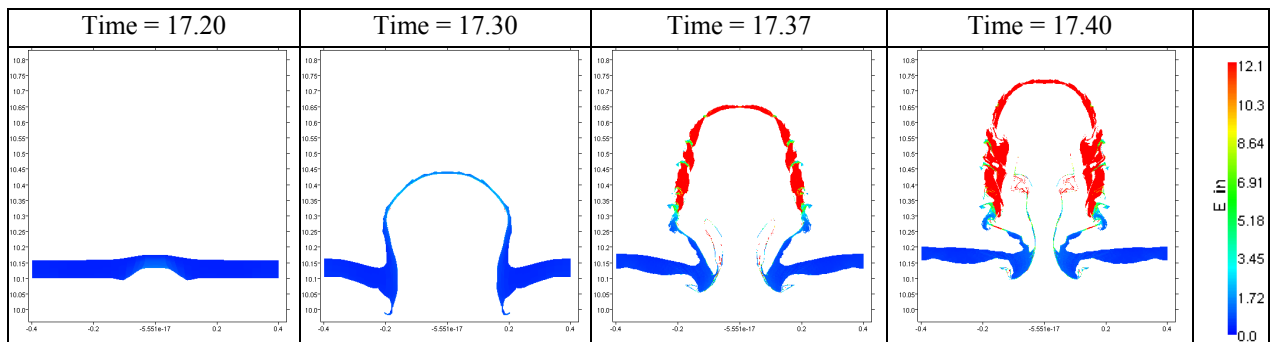


Рис. 11. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге

На рис. 12 изображены зависимости величины тока от времени.

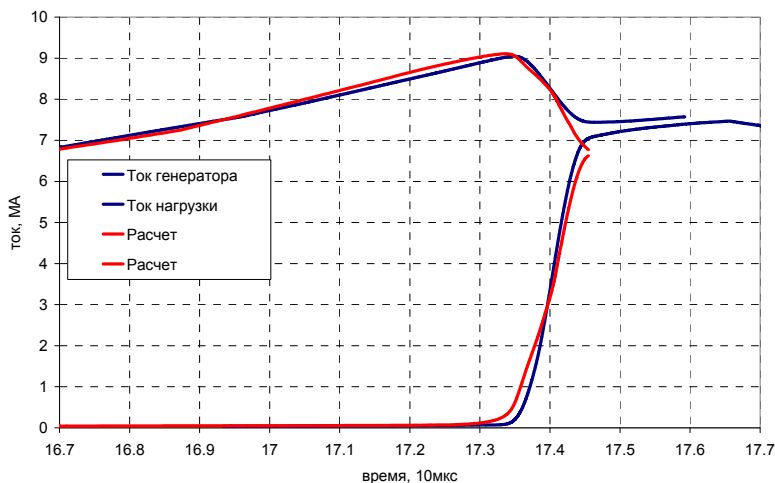


Рис. 12. Расчетные зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке и их сравнение с экспериментальными данными

Моделирование работы конструкций ВРТ с проволочным соленоидом

Эскиз размыкателя с проволочным соленоидом в составе источника энергии в виде генератора ВМГ-100 с индуктивной нагрузкой представлен на рис. 13 [15]. Размыкатель содержит разрушаемый проводник 5, по разные стороны от которого расположены заряд взрывчатого вещества 6 и проволочный соленоид 8, прилегающие к разрушаемому проводнику. Витки соленоида выполняют функцию упоров, задерживающих движение проводника в радиальном направлении. Цилиндрический проводник 5 выполнен из фольги. Под воздействием продуктов детонации заряда ВВ происходит ускорение участков фольги в зазорах между витками соленоида. При вылете этих участков фольги за пределы витков ПС происходит многократное (по числу размыкающих ячеек) разрушение (разрыв) проводника.

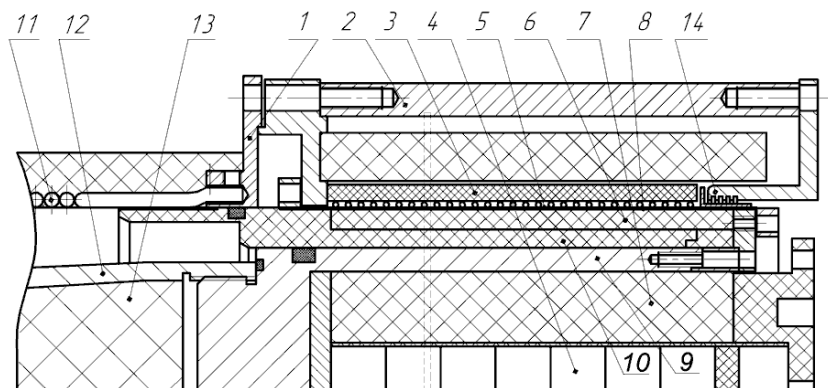


Рис. 13. Эскиз размыкателя в составе ВМГ: 1 — фланец ВМГ, 2 — корпус нагрузки (обратный токопровод), 3 — диэлектрическая подложка, 4 — цепочка электродетонаторов, 5 — фольга, 6 — разрывной заряд ВВ, 7 — заряд ВВ системы инициирования, 8 — проволочный соленоид, 9 — прямой токопровод, 10 — изолятор, 11 — спираль ВМГ, 12 — центральная труба, 13 — заряд ВВ, 14 — замыкающий ключ. Пунктиром выделен элемент размыкателя

Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 14.

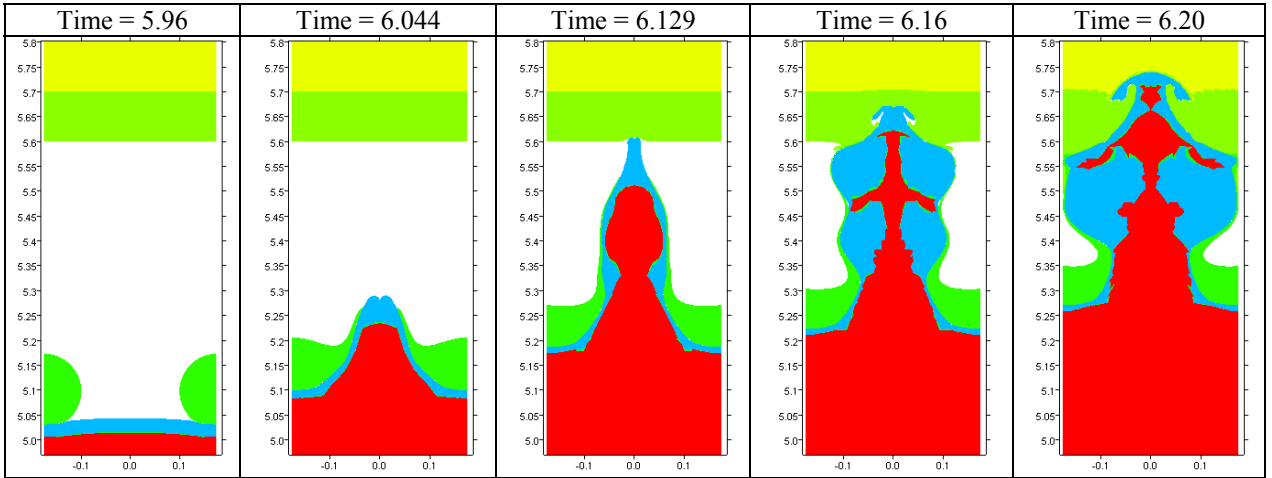


Рис. 14. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ

При достижении энергии сублимации меди происходит электровзрыв. На рис. 15 показана динамика растяжения и электровзрыва растянутых участков медной фольги.

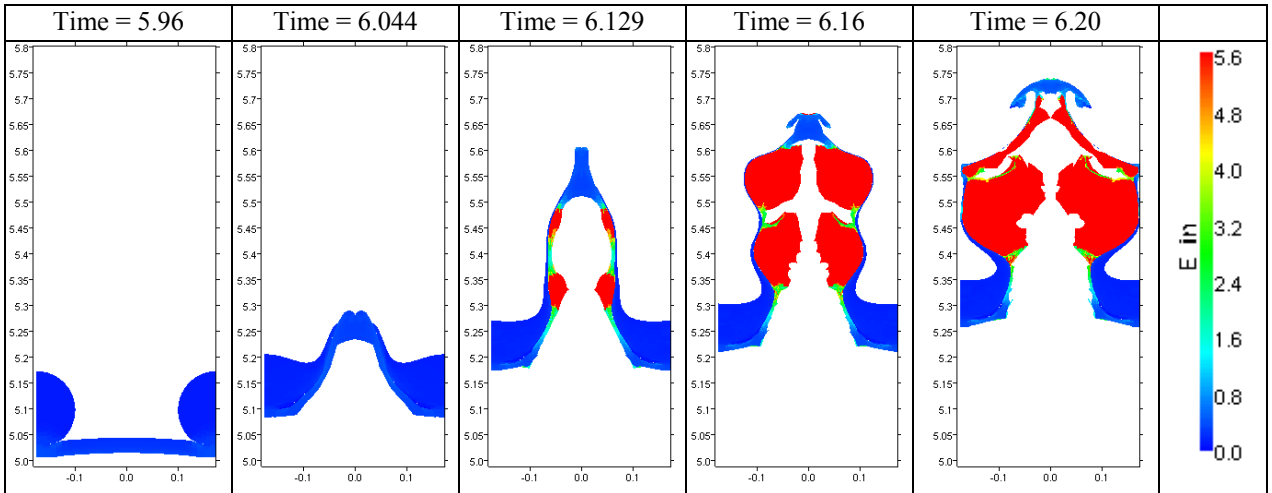


Рис. 15. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге

На рис. 16 представлены зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке.

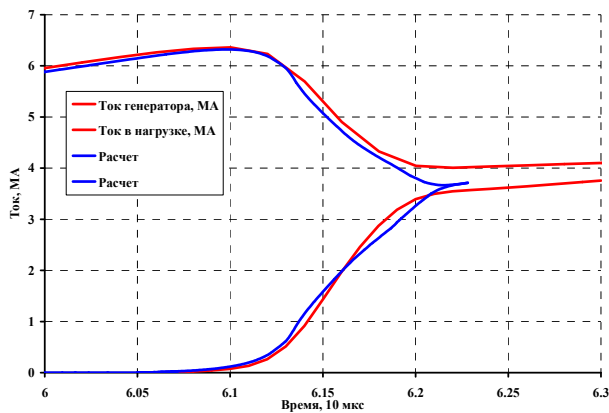


Рис. 16. Расчетные зависимости от времени тока ВМГ и тока в нагрузке и их сравнение с экспериментальными данными

Заключение

В работе рассмотрен один из возможных подходов для численного моделирования работы ВРТ, имеющих большое практическое значение для прогнозирования параметров импульсов тока в исследуемых нагрузках без проведения предварительных экспериментов. Используемые расчетные модели ВРТ, реализованные в лагранжевой методике ТИМ, позволяют в единой постановке описывать формирование и развитие ударно-волновых воздействий в конструкции и процессы сжатия, растяжения и разрушения проводника с током, учитывать воздействие на проводник протекающего по нему тока, определять зависимость изменения сопротивления проводника. Для обоснования возможности применимости рассмотренного подхода представлена серия валидационных расчетов экспериментов по размыкателям с кумулятивными струями и с ребристой преградой. С использованием лагранжевого подхода к моделированию ВРТ были получены расчетные характеристики близкие к экспериментальным. Это зависимости тока от времени в цепях генератора и нагрузки, времена нарастания тока в нагрузке и др. Расчеты показали, что одним из основных факторов быстрого переброса тока в нагрузку является электровзрыв, а не утончение проводника, как считалось ранее.

Литература

1. Chernyshev V. K. et al. Explosives Opening Switches for Fast-Operating Helical EMG // Proc. Ninth IEEE Pulsed Power Conference, 1993, Albuquerque, New Mexico, USA, P. 216–219.
2. Дудай П. В., Иванов В. А. и др. Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // XII Международная конференция по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Новосибирск, 13–18 июля 2008. С. 57–62.
3. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. С. 37–52.
4. Соколов С. С., Воропинов А. А., Новиков И. Г. и др. Методика ТИМ-2D для расчета задач механики сплошной среды на нерегулярных многоугольных сетках с произвольным количеством связей в узлах // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2006. Вып. 4. С. 29–43.
5. Соколов С. С. Метод расчета двумерных нестационарных упругопластических течений на нерегулярных многоугольных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 62–82.
6. Панов А. И. Методика решения уравнения теплопроводности на нерегулярной сетке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2004. Вып. 4. С. 27–40.
7. Новиков А. Б., Глушак Б. Л. Сопротивление металлов пластической деформации при высокоскоростном сжатии // Хим. физика. 2000. Т. 19. С. 65–69.
8. Соколов С. С. Феноменологическая модель кинетики развития поврежденности в твердых материалах при импульсных воздействиях // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2012. Вып. 4. С. 13–26.
9. Соколов С. С. Об одной феноменологической модели кинетики разложения гетерогенного ВВ на основе октогена // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2007. Вып. 2. С. 50–61.
10. Дудай П. В., Ивановский А. В., Иванов В. А. и др. Моделирование работы взрывного размыкателя тока в МГД-приближении // XIV Международная конференция «Харитоновские чтения»: сб. докл. Саров, 2013. Р. 534.

11. Новиков И. Г., Соколов С. С. Локальные перестройки нерегулярной сетки в методике «ТИМ-2D» // VI научно-техническая конференция «Молодежь в науке»: сб. докл. Саров, 30 октября–1 ноября 2007 г.

12. Новиков И. Г., Панов А. И., Соколов С. С. Способ коррекции нерегулярной лагранжевой сетки методом наложения дифференцируемых связей // Журнал вычисл. мат. и мат. физ. 2005. Т. 45, № 8. С. 1487–1500.

13. Власов Ю. В., Панов А. И., Самодолов А. В., Соколов С. С. Магнитодинамическое моделирование устройства на основе взрывомагнитного генератора взрывного размыкателя тока по методике ТИМ-2D // XVI Международная конференция «Харитоновские чтения»: сб. докл. Саров, 21–25 апреля 2014. С. 131–137.

14. Kaul A. M., Ivanovsky A. V., Atchison W. L. et al. Damage growth and recollection in aluminum under axisymmetric convergence using a helical flux compression generator // Journal of Applied Physics. 2014. 115. 023516.

15. Власов Ю. В. Анализ результатов магнитодинамического моделирования коммутации тока взрывными размыкателями различного типа // Прикладная математика и техническая физика. 2015. Т. 56, № 1. С. 131–136.

УСКОРЕНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ НА НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ

К. Н. Волков, В. Н. Емельянов, И. В. Тетерина

Балтийский государственный технический университет
«ВОЕНМЕХ» им. Д. Ф. Устинова, г. Санкт-Петербург

Течения жидкостей и газов играют ключевую роль в рабочих процессах многих технических устройств. Математические модели газодинамических процессов основаны на фундаментальных законах сохранения массы, количества движения и энергии. В модели включаются также уравнения для термодинамических величин, уравнения состояния и уравнения для тепловых потоков. Турбулентность оказывает влияние на процессы смешения, горения, генерации шума, распространение излучения и перенос частиц дисперсной примеси.

К настоящему времени накоплен обширный фонд вычислительных алгоритмов, предназначенных для численного моделирования течений жидкости и газа, описываемых уравнениями Эйлера или Навье–Стокса. Широкое распространение получили многочисленные программные продукты, в том числе коммерческие. Достижения в создании универсальных вычислительных пакетов, предназначенных для решения широкого круга задач газодинамики и теплообмена, выглядят достаточно впечатляюще. Во многом этим они обязаны прогрессу в разработке современных вычислительных систем с параллельной обработкой данных, развитию математических моделей, а также разработке эффективных численных методов.

Универсальные коммерческие CFD-пакеты (например, Fluent, CFX, Star-CD и другие) и пакеты с открытым исходным кодом (например, OpenFOAM) представляют собой сложные многокомпонентные системы, имеющие трехступенчатую структуру: сеточный генератор, расчетный модуль, графический интерпретатор результатов. В пакеты включаются широкие наборы математических моделей управляющих физических процессов, конечно-разностных схем, методов решения систем разностных уравнений, из элементов которых конструируется решение той или иной задачи. Многие пакеты допускают эксплуатацию не только на персональных компьютерах и рабочих станциях, но и на многопроцессорных вычислительных системах.