

УДК 519.6

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

Ю. В. Власов, П. В. Дудай, А. И. Панов, А. В. Самодолов, С. С. Соколов  
(ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", г. Саров Нижегородской области)

С использованием методики ТИМ-2D проведено магнитогидродинамическое моделирование процесса коммутации тока взрывным размыкателем. Представлены результаты моделирования коммутации тока взрывными размыкателями двух типов: с разрывом проводника на ребристой преграде и с помощью кумулятивных диэлектрических струй. Численное моделирование проводилось в лагранжевых переменных с использованием неструктурированных счетных сеток с учетом упругопластических свойств и поврежденности материалов, диффузии магнитного поля.

*Ключевые слова:* взрывомагнитный генератор, взрывной размыкатель тока, магнитогидродинамическое моделирование, ребристая преграда, кумулятивные струи, электровзрыв, лагранжева методика.

### Введение

Для запитки различных экспериментальных нагрузок (лайнрные системы, камеры типа МАГО, "плазменный фокус" и т. д.) необходимы мегаамперные импульсы тока с микросекундным временем нарастания. При использовании в качестве источника энергии спиральных взрывомагнитных генераторов (СВМГ) [1] необходимо учитывать, что, хотя они способны формировать мегаамперные импульсы тока, длительность импульса составляет десятки микросекунд. В связи с этим возникает необходимость сокращения длительности (обострения) импульса тока до микросекундного диапазона.

Для сокращения времени нарастания тока в нагрузках взрывомагнитных генераторов применяется схема, в которой контур генератора и контур нагрузки подключены параллельно друг другу через размыкатель тока. При работе генератора ток через нагрузку не протекает. Переключение (коммутация) тока из СВМГ в нагрузку производится в момент окончания работы генератора или раньше, путем быстрого разрыва его электрического контура. Принцип действия размыкателя тока основан на его свойстве суще-

ственного возрастания сопротивления за короткое время. В процессе коммутации тока СВМГ в нагрузку формируется мегаамперный импульс тока с микросекундным временем нарастания.

Чаще всего обострение импульса тока СВМГ осуществляется взрывными размыкателями тока (ВРТ), в которых растяжение и последующее разрушение (разрыв) токоведущего проводника осуществляются с использованием взрывчатого вещества (ВВ). Наиболее широко используются конструкции ВРТ двух типов: 1) с разрушением проводника на диэлектрической ребристой преграде продуктами детонации заряда ВВ; 2) с разрушением проводника струями, формируемыми в диэлектрической пластине с кумулятивными выемками (струеформователе) под действием ударной волны, возникающей при детонации заряда ВВ [2, 3].

Численное моделирование коммутации тока взрывными размыкателями требует расчета растяжения проводника и последующего электровзрыва растянутых участков при их нагреве протекающим током. Кроме того, необходимо рассчитывать изменение токов генератора и нагрузки. Особенности геометрии ВРТ требуют

использования программ для двумерного магнитогидродинамического (МГД) моделирования. В данной работе для численного моделирования коммутации тока СВМГ взрывным размыкателем использовалась МГД-методика ТИМ-2D [4, 5].

### Основные МГД-уравнения и методы их решения

В расчетной методике ТИМ-2D используются дифференциальные уравнения магнитной гидродинамики с учетом упругопластики [6], записанные в переменных Лагранжа:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} &= -\rho \operatorname{div} \vec{U}; \\ \rho \frac{d\vec{U}}{dt} &= -\operatorname{grad} P + \operatorname{div} S + \frac{1}{c} (\vec{i} \times \vec{H}), \\ \vec{i} &= \frac{c}{4\pi} \operatorname{rot} \vec{H}; \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\vec{H}}{\rho} \right) &= \left( \frac{\vec{H}}{\rho} \nabla \right) \vec{U} - \frac{c}{\rho} \operatorname{rot} \vec{E}; \\ \operatorname{div} \vec{H} &= 0; \quad \vec{i} = \sigma \vec{E}; \\ \frac{d\varepsilon}{dt} &= -P \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho} \operatorname{Sp}(\mathbf{SD}) + \frac{\vec{i} \cdot \vec{E}}{\rho}; \quad \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{U}, \end{aligned}$$

где  $\rho$  — плотность вещества;  $\varepsilon$  — 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;  $\mathbf{S}$  — девиатор тензора напряжений;  $\mathbf{D}$  — тензор скоростей деформации;  $\operatorname{Sp}(\mathbf{SD})$  — первый инвариант тензора  $\mathbf{SD}$ .

Двумерное МГД-моделирование в методике ТИМ-2D осуществляется в цилиндрической системе координат. Для рассматриваемых задач с ВРТ магнитное поле имеет только одну азимутальную составляющую  $\vec{H} = H\vec{i}_\varphi$ . В этом случае влияние магнитного поля на движение вещества осуществляется через объемную электромагнитную силу:

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

В уравнение энергии добавляется объемный источник джоулева тепла

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

а уравнение индукции имеет вид

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

где  $X = \frac{c^2}{4\pi\sigma}$ ,  $c$  — скорость света. Граничные условия могут быть первого или второго рода. В первом случае в граничных точках задаются значения величины  $rH$ , во втором — значения величины  $\frac{X}{r^2} \frac{d(rH)}{d\vec{n}}$ .

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-проекторный способ аппроксимации дифференциальных операторов [7], в результате чего получается система разностных уравнений с симметричной положительно определенной матрицей.

Для более адекватного моделирования движения твердых материалов в рассматриваемых конструкциях под действием импульсных нагрузок использовались упругопластические модели сдвиговой прочности материалов [8] и модель кинетики зарождения и развития поврежденности [9]. 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 [10]. Расчеты проводились на неструктурированных сетках, состоящих из произвольных несамопересекающихся многоугольных ячеек (не обязательно выпуклых), с произвольным числом выходящих из узлов ребер.

Особое внимание в численных расчетах уделялось поддержанию качества расчетной сетки. Со временем изначально тонкий разрываемый проводник (фольга) сильно растягивается, затем на растянутых участках происходит электровзрыв, который сопровождается резким разбуханием проводника. Для моделирования подобных процессов в лагранжевых координатах необходимо использовать адаптивные сетки с переменным числом счетных ячеек. Поэтому для описания происходящих процессов применялись алгоритмы локальных перестроек сетки путем дробления и объединения ячеек [11], а также алгоритмы коррекции, основанные на методике наложения дифференцируемых связей [12].

Процесс коммутации тока осуществляется за счет диффузии магнитного поля через разрываемый проводник. Чтобы правильно описать данный процесс, в фольге по толщине должно быть не менее пяти счетных точек. Лагранжев подход позволяет путем дробления и объединения ячеек поддерживать приемлемыми и их число, и размеры в подвижной фольге на протяжении всего времени счета задачи.

### Моделирование коммутации тока генератора ВМГ-200 взрывным размыкателем с ребристой преградой

Схематичное изображение ВРТ для обострения импульса тока генератора ВМГ-200 и схема коммутации тока представлены на рис. 1, а, б. В начале работы СВМГ ключ 8 (обозначение К на схеме коммутации — см. рис. 1, б) разомкнут, нагрузка 9 не подключена. В процессе работы генератора ток  $I_G$  протекает по прямому токопроводу 10 и по проводнику (фольге) 3 размыкателя. В момент окончания работы генератора (или немного раньше) производится подключение нагрузки с помощью ключа 8 и начинается процесс растяжения и разрушения (разрыва) фольги 3. При этом ее сопротивление  $R_p$  (см. рис. 1, б) растет, в результате чего растет ток  $I_H$  в контуре нагрузки, образованном фольгой и обратным токопроводом 11.

Разрыв фольги в данном ВРТ осуществляется за счет того, что при воздействии продуктов де-

тонации заряда ВВ (4 на рис. 1, а) участки проводника под пазами преграды 2 приобретают более высокую скорость, чем участки проводника под ребрами преграды. Инициирование данного заряда ВВ осуществляется ударной волной, образующейся после окончания детонации цилиндрического заряда 6. Инициирование этого заряда производится одновременно по оси устройства электродетонаторами 7.

Из рис. 1, а видно, что ВРТ имеет периодическую структуру, образуемую повторяющимися элементами. В качестве расчетной области достаточно брать половину одного элемента этой структуры — на рис. 1, а она выделена пунктиром.

В процессе коммутации фольга размыкателя претерпевает изменения от твердого до плазменного состояния, что описывается комплексом уравнение состояния — уравнение проводимости [13]. В [14] показано, что данная модель достаточно точно описывает коммутацию тока СВМГ размыкателем с ребристой преградой. Другие процессы, которые могут влиять на работу размыкателя (теплопроводность и лучистый теплоперенос, проводимость в воздушных областях под действием ударных волн, проводимость продуктов детонации), не учитывались. В [15] показано, что в задачах диффузии магнитного поля влиянием теплопроводности можно пренебречь. Учет влияния остальных перечисленных факторов представляет интерес и будет рассматриваться в дальнейшем.

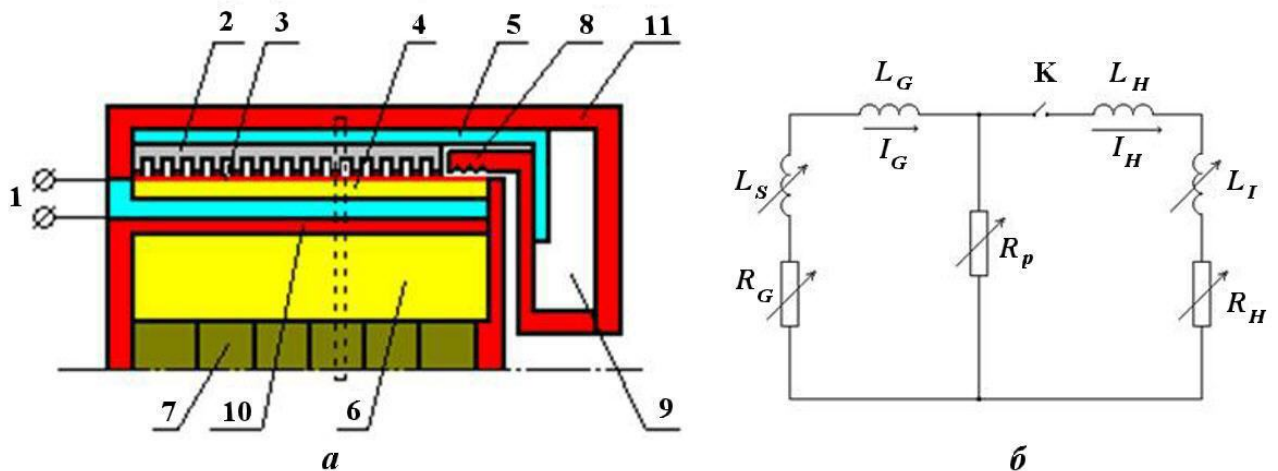


Рис. 1. ВРТ для обострения импульса тока СВМГ (а) и схема коммутации тока (б): 1 — выход СВМГ; 2 — ребристая преграда; 3 — проводник ВРТ (фольга); 4 — заряд ВВ; 5 — изолятор; 6 — заряд ВВ; 7 — электродетонаторы; 8 — замыкающий ключ; 9 — нагрузка; 10 — металлический цилиндр (прямой токопровод); 11 — корпус нагрузки (обратный токопровод)

При работе генератора фольга ВРТ нагревается протекающим током и смещается в пазы преграды под действием магнитного давления. Эти процессы учитываются по известной из эксперимента зависимости тока СВМГ от времени. Начиная с некоторого момента после инициирования ВВ, расчет проводится согласно схеме (см. рис. 1, б), в которой зависимости от времени буферной индуктивности и сопротивления генератора  $L_S$  и  $R_G$ , а также буферная индуктивность нагрузки  $L_I$  считаются известными. Предполагается, что ключ К срабатывает мгновенно в заданный момент времени, а сопротивление нагрузки  $R_H = 0$ .

На границах проводников на каждом временном шаге рассчитывается магнитное поле, определяемое моделированием работы электрических цепей генератора и нагрузки. Уравнения цепи имеют следующий вид:

$$\frac{d(L_S + L_G) I_G}{dt} + I_G R_G + \int_G \vec{E} d\vec{l} = 0;$$

$$\frac{d(L_I + L_H) I_H}{dt} + I_H R_H + \int_H \vec{E} d\vec{l} = 0,$$

где  $L_G$ ,  $L_H$  — индуктивность под фольгой ВРТ и над ней, определяемые по геометрии на каждом шаге; интегрирование осуществляется по границам проводников в контурах генератора ( $G$ ) и нагрузки ( $H$ ) соот-

ветственно. Тем самым учитывается не только диффузия магнитного поля через фольгу, но и потери магнитного потока на других участках токопроводов. При этом  $\int_C \vec{E} d\vec{l} = - \int_C \frac{X}{r} \text{grad}(rH) \vec{n} dl$ , а значения магнитного поля внутри контуров определяются по формулам  $H_G = 2I_G/r$ ,  $H_H = 2I_H/r$ . До замыкания ключа К решается только первое уравнение цепи, а ток в нагрузке полагается равным нулю. После срабатывания ключа решается система из двух уравнений.

Постановка опыта по коммутации тока СВМГ со статором диаметром 200 мм (ВМГ-200) [1] и опубликованные по нему экспериментальные и расчетные данные приведены в [16]. Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 2.

При достижении энергии сублимации меди ( $\approx 5,6$  кДж/г) происходит электровзрыв проводника. На рис. 3 (см. также цветную вкладку) показана динамика растяжения и электровзрыва растянутых участков медной фольги. Для того чтобы отобразить область электровзрыва, шкала внутренней энергии ограничена энергией сублимации меди.

На рис. 4, 5 представлены зависимости от времени тока СВМГ и тока в нагрузке, а также зависимость сопротивления проводника от времени.

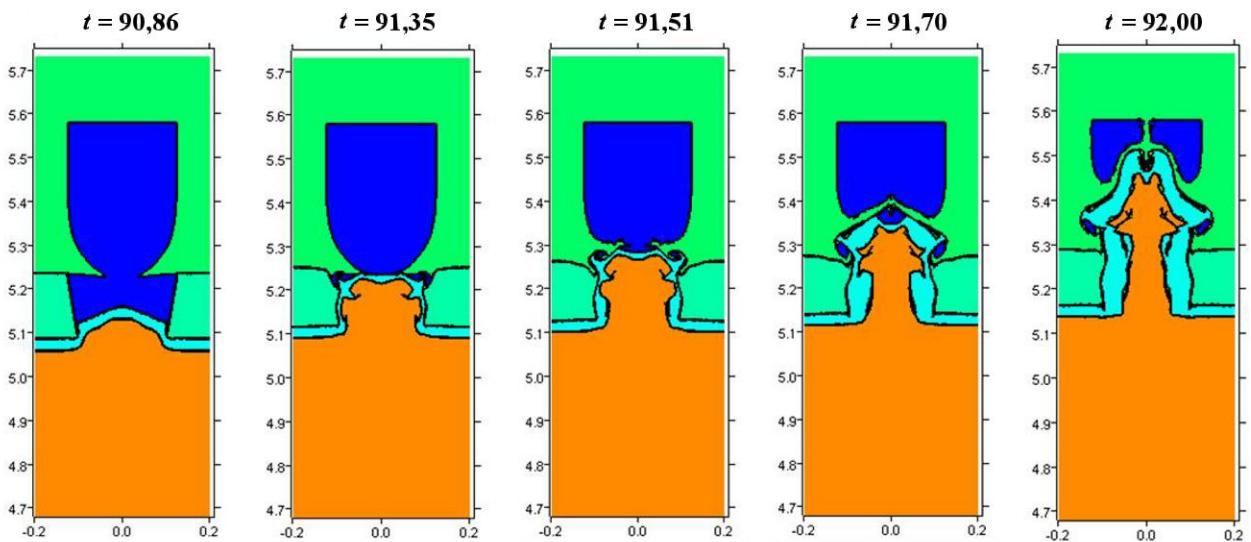


Рис. 2. Динамика разрушения проводника ВРТ продуктами детонации заряда ВВ при коммутации тока генератора ВМГ-200

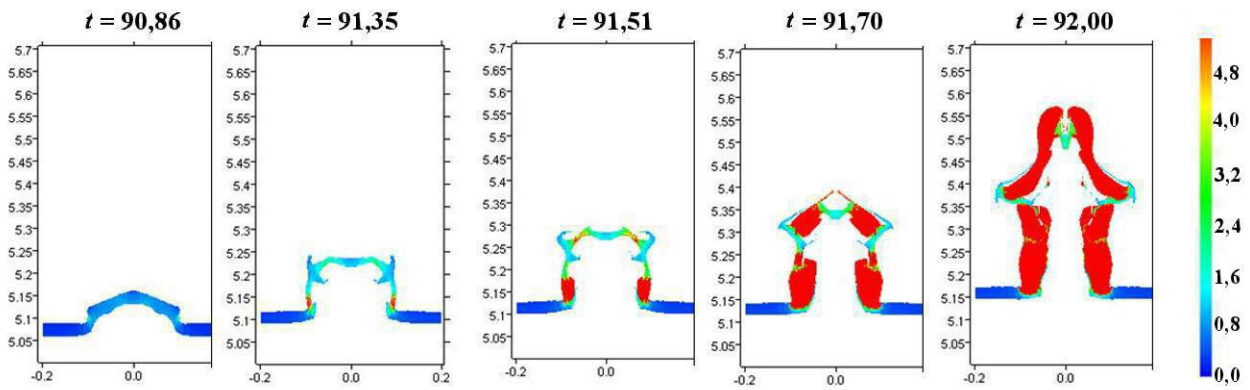


Рис. 3. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге ВРТ при коммутации тока генератора ВМГ-200

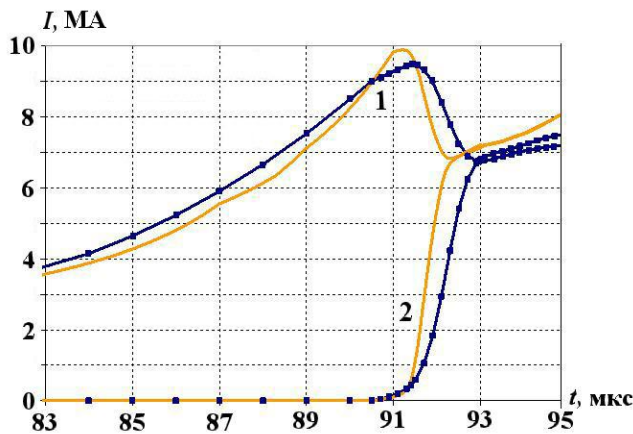


Рис. 4. Зависимости от времени тока генератора ВМГ-200 (1) и тока в нагрузке (2): — расчет; —■— эксперимент

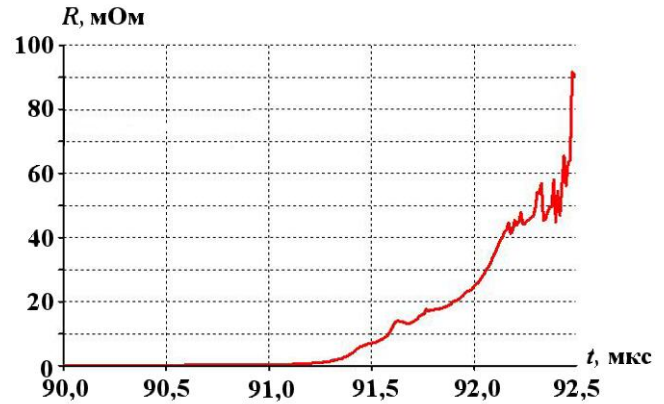


Рис. 5. Зависимость сопротивления проводника от времени при коммутации тока генератора ВМГ-200

### Моделирование работы ВРТ с ребристой преградой из эксперимента "Росуюн"

Ранее в [17] была описана серия расчетов экспериментов "Росуюн" [18]. Здесь приводятся основные результаты расчетов работы ВРТ с ребристой преградой, выполненных на сгущающихся сетках. На рис. 6 представлено схематичное изображение ВРТ. Ребристая преграда выполнена из тефлона, разрываемый проводник — из алюминиевой фольги, заряд ВВ выполнен из состава РВХ 9501.

В расчете использовалась электрическая цепь, аналогичная приведенной на рис. 1, б, но без ключа К, так как в соответствующих работах информация по ключу отсутствует.

На рис. 7 (см. также цветную вкладку) представлены зависимости расчетных и экспериментальных токов в цепях генератора и нагрузки от времени. Результаты расчета на грубой сет-

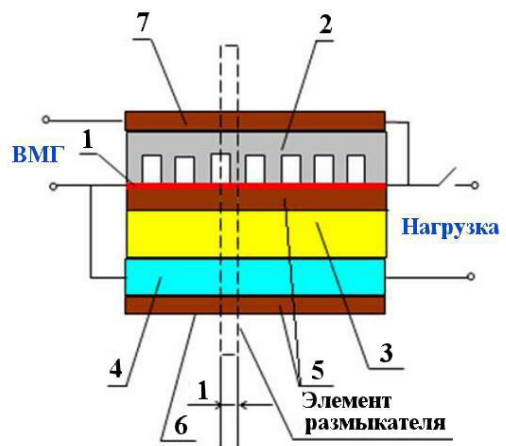


Рис. 6. ВРТ с ребристой преградой из эксперимента "Росуюн": 1 — фольга; 2 — ребристая преграда; 3 — тефлон; 4 — внутренний токопровод; 5 — аксиально инициируемый заряд; 6 — поверхность, по которой инициируется заряд; 7 — корпус

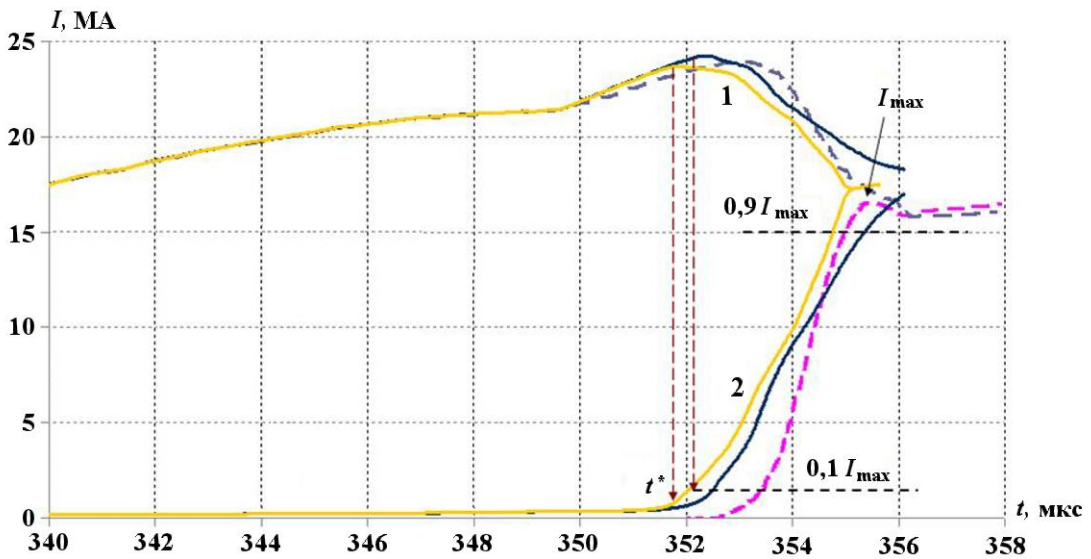


Рис. 7. Зависимости тока СВМГ (1) и тока в нагрузке (2) от времени для эксперимента "Procyon": — — расчет 1; — — расчет 2; - - ток в нагрузке, эксперимент; - - ток генератора, эксперимент

ке обозначены как расчет 1, результаты расчета на подробной сетке — как расчет 2. Увеличение счетных точек в задаче несколько приближает время переброски тока из одной цепи в другую к экспериментальным значениям. Если за время переброски  $\Delta t$  принять время нарастания тока от  $0,1I_{\max}$  до  $0,9I_{\max}$  ( $I_{\max}$  — максимальное значение тока в нагрузке), то в первом расчете  $\Delta t = 2,8$  мкс, а во втором  $\Delta t = 2,6$  мкс. Через  $t^*$  на рис. 7 обозначено время достиже-

ния в алюминиевой фольге энергии сублимации ( $\approx 12,1$  кДж/г).

На рис. 8 приведена динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ.

На рис. 9 (см. также цветную вкладку) показаны растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге. Области фольги, где достигнуты значения энергии сублимации, обозначены красным цветом. Видно,

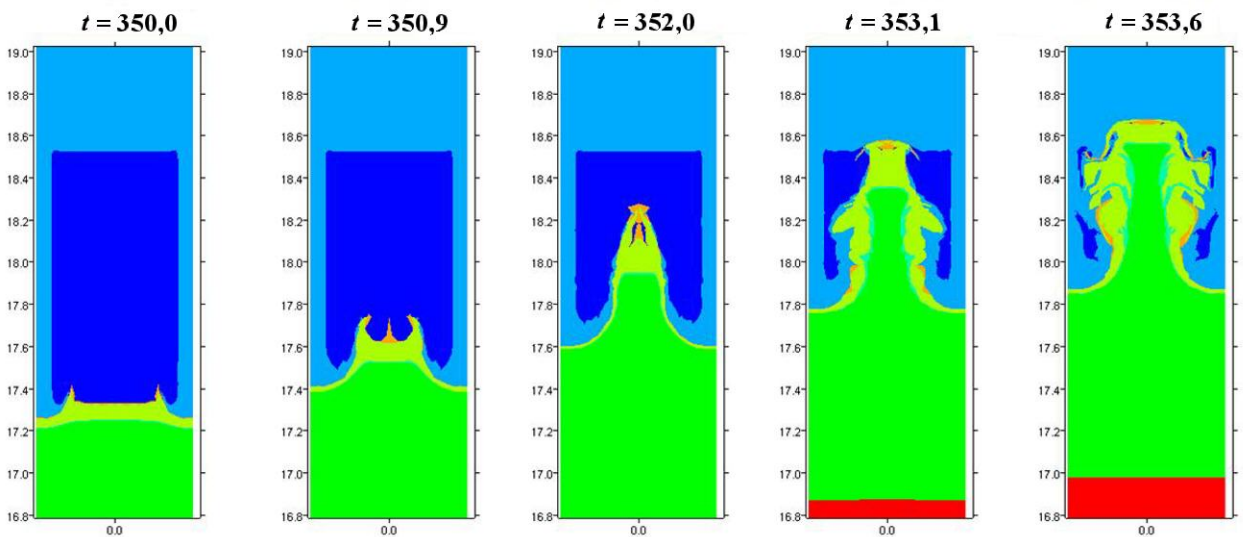


Рис. 8. Динамика разрушения проводника ВРТ продуктами детонации заряда ВВ, полученная в расчетах эксперимента "Procyon"

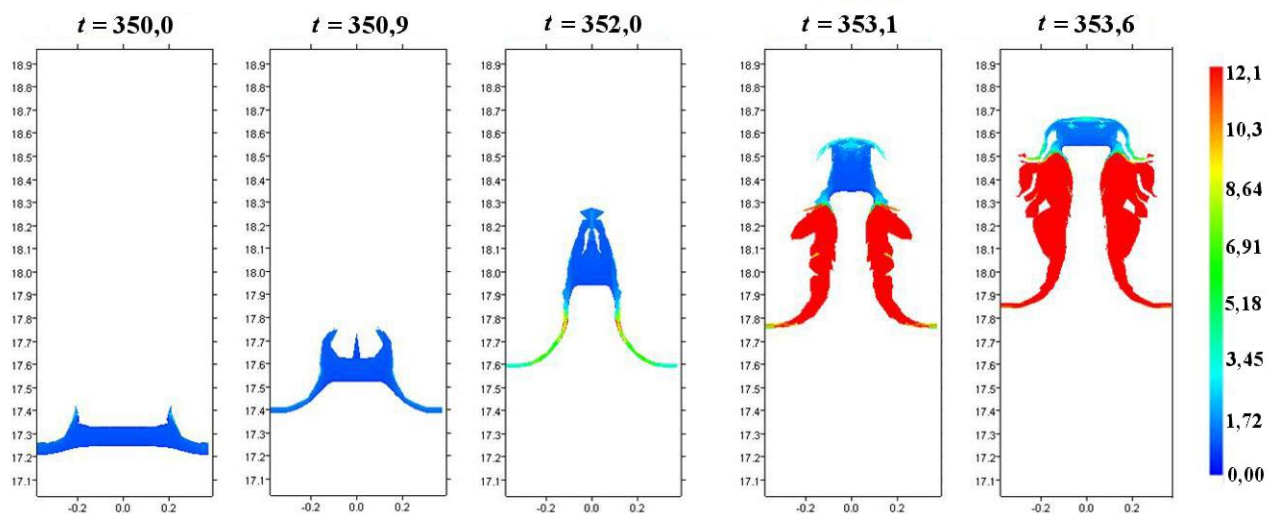


Рис. 9. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге ВРТ, полученные в расчетах эксперимента "Procyon"

что они находятся в местах наибольшего растяжения фольги на ребрах преграды. Шкала внутренней энергии на рис. 9 ограничена энергией сублимации алюминия.

### Моделирование работы ВРТ кумулятивного типа

На рис. 10 приведена схема ВРТ кумулятивного типа. Постановка эксперимента с этим ВРТ и полученные экспериментальные данные опубликованы в [17].

Разрыв наружного проводника размыкателя производится диэлектрическими кумулятивными струями, образующимися при схлопывании

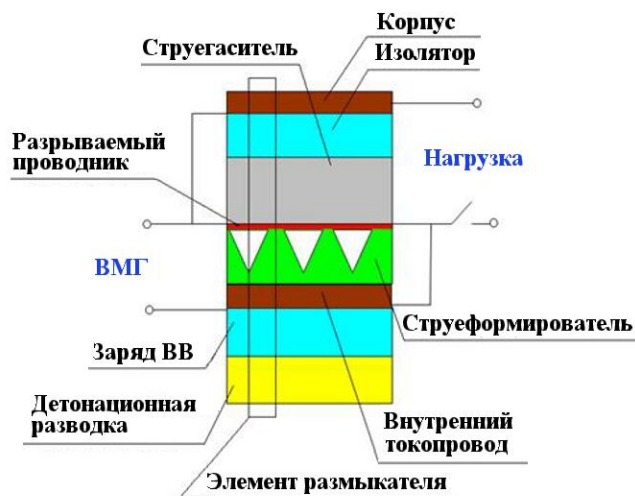


Рис. 10. Цилиндрический кумулятивный ВРТ

стенок кольцевых кумулятивных выемок, выполненных на внешней поверхности полиэтиленового струеформирователя, при прохождении по нему ударной волны.

На рис. 11 показано распределение веществ в ВРТ с алюминиевой фольгой на различные моменты времени, демонстрирующее процесс формирования кумулятивной струи и состояние фольги при перебросе тока.

На рис. 12 (см. также цветную вкладку) приведены растровые изображения распределения внутренней энергии в алюминиевой фольге. Шкала внутренней энергии ограничена энергией сублимации алюминия.

На рис. 13 (см. также цветную вкладку) показаны расчетные зависимости тока от времени в сравнении с экспериментальными данными.

### Моделирование работы ВРТ с проволочным соленоидом

Схематичное изображение размыкателя с проволочным соленоидом [19] представлено на рис. 14. Размыкатель содержит разрушаемый проводник ВРТ (фольгу) 1, по разные стороны от которого расположены прилегающие к нему заряд ВВ 2 и проволочный соленоид 3. Витки соленоида выполняют функцию упоров (ребер ребристой преграды), задерживающих движение проводника в радиальном направлении. Цилиндрический проводник выполнен из медной фольги. Заряд ВВ инициируется одновременно

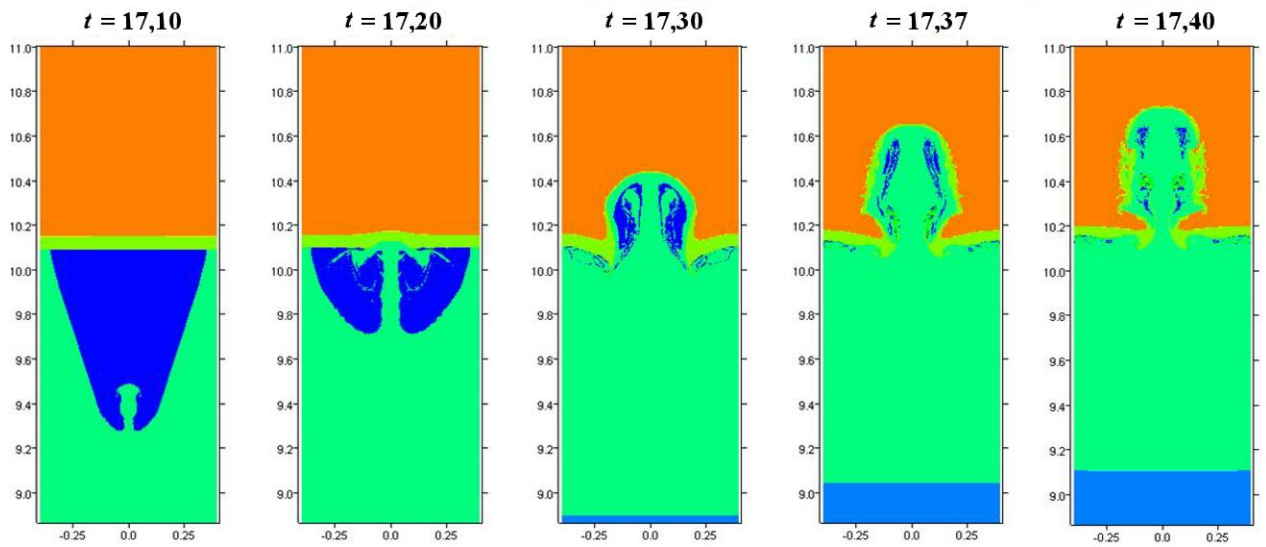


Рис. 11. Динамика разрушения проводника ВРТ кумулятивного типа

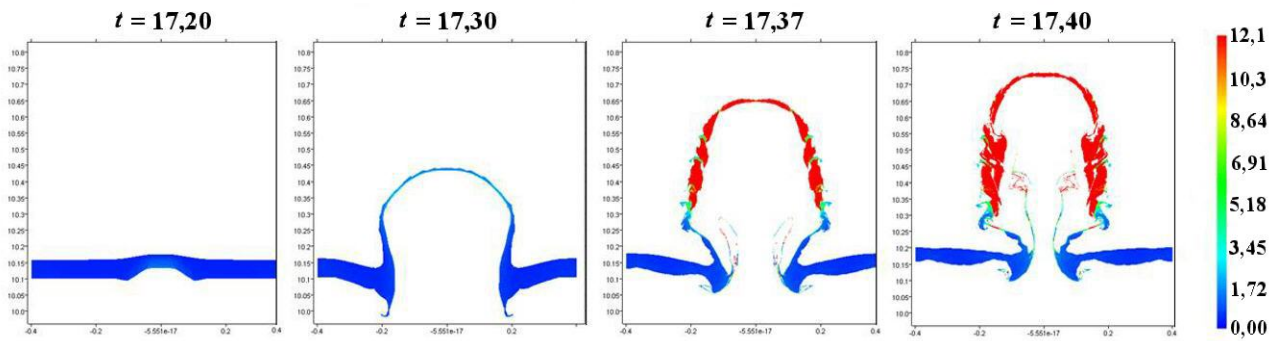


Рис. 12. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге ВРТ кумулятивного типа

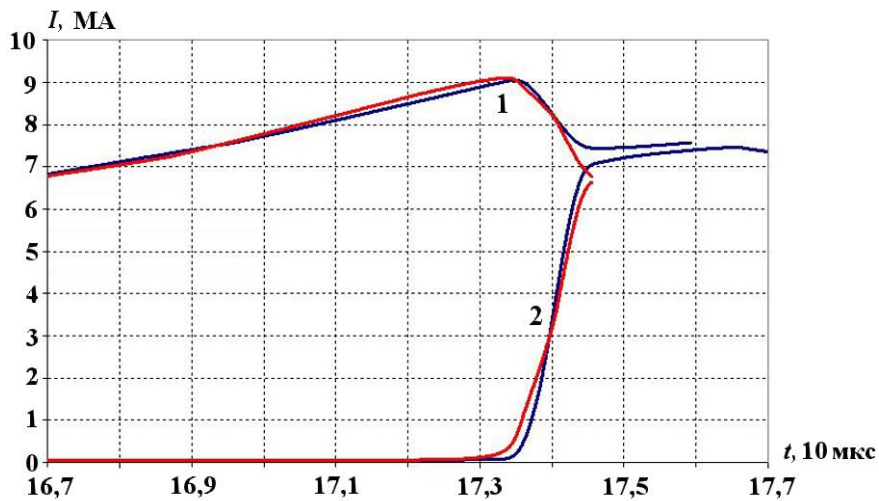


Рис. 13. Зависимости от времени тока СВМГ (1) и тока в нагрузке (2) при коммутации тока с помощью кумулятивных струй: — расчет; — эксперимент



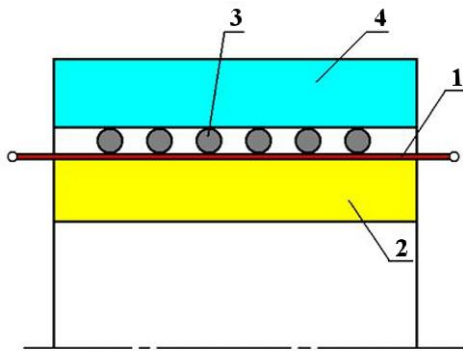


Рис. 14. ВРТ с проволочным соленоидом: 1 — разрушаемый проводник ВРТ (фольга); 2 — заряд ВВ; 3 — проволочный соленоид; 4 — подложка

по всей его внутренней поверхности. Под воздействием продуктов детонации заряда ВВ происходит ускорение участков фольги в зазорах между витками соленоида. При выбросе этих участков фольги за пределы витков проволочного соленоида происходит многократное (по числу размыкающих ячеек) разрушение (разрыв) проводника. В качестве подложки 4 используется низкоплотный диэлектрик (например, пенопласт).

Динамика разрушения проводника размыкателя продуктами детонации заряда ВВ показана на рис. 15.

При достижении энергии сублимации меди происходит электровзрыв. На рис. 16 (см. также цветную вкладку) показана динамика растяжения и электровзрыва растянутых участков мед-

ной фольги. Шкала внутренней энергии ограничена энергией сублимации меди.

На рис. 17 (см. также цветную вкладку) представлены зависимости от времени тока СВМГ и тока в нагрузке, на рис. 18 — зависимость сопротивления проводника от времени.

## Заключение

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.

Численное моделирование коммутации тока СВМГ взрывным размыкателем в рамках лагранжевой методики ТИМ позволяет 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 от времени.

Для обоснования возможности применимости рассмотренного подхода представлена серия валидационных расчетов экспериментов с размыкателями на основе кумулятивных струй и ребристой преграды. С использованием лагранжева подхода к моделированию ВРТ были получены расчетные характеристики, близкие к экспери-

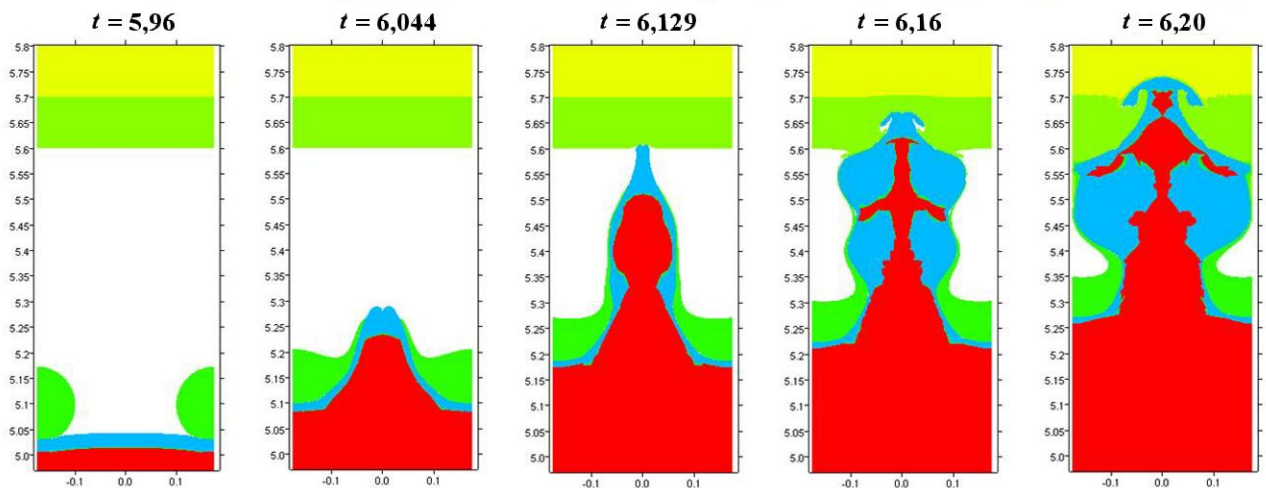


Рис. 15. Динамика разрушения проводника ВРТ с проволочным соленоидом продуктами детонации заряда ВВ

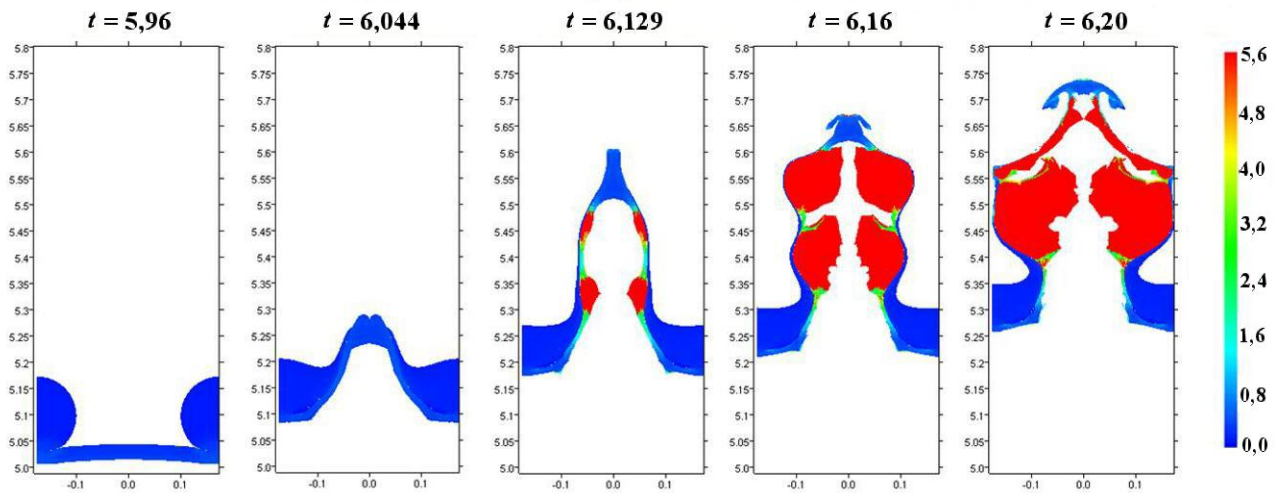


Рис. 16. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге ВРТ с проволочным соленоидом

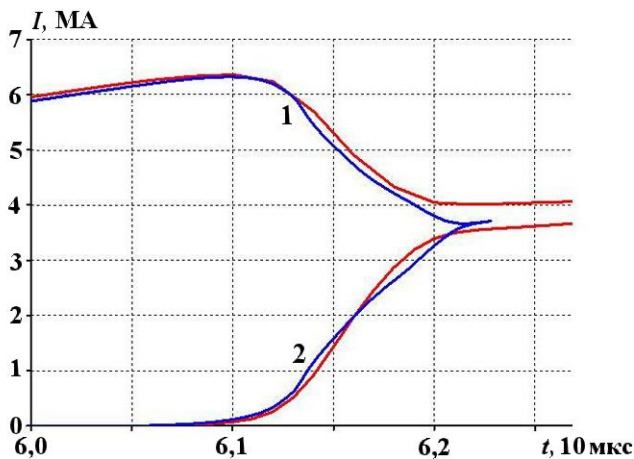


Рис. 17. Зависимости от времени тока СВМГ (1) и тока в нагрузке (2) при использовании ВРТ с проволочным соленоидом: — расчет; — эксперимент

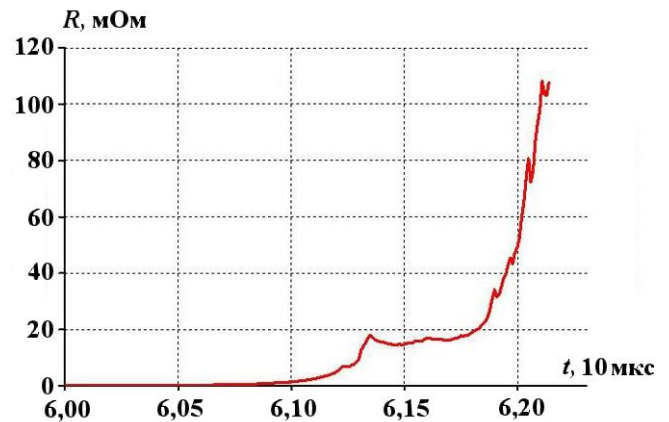


Рис. 18. Зависимость сопротивления проводника от времени при использовании ВРТ с проволочным соленоидом

ментальным. Это зависимости тока от времени в цепях генератора и нагрузки, времена нарастания тока в нагрузке и др.

### Список литературы

1. Магнитокумулятивные генераторы — импульсные источники энергии: Монография. В 2 томах. Том 1 / Под ред. В. А. Демидова, Л. Н. Пляшкевича, В. Д. Селемира. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011.
2. Chernyshev V. K., Volkov G. I., Ivanov V. A. et al. Explosives opening switches for fast-operating helical EMG // Proc. Ninth IEEE

Pulsed Power Conference. New Mexico, Albuquerque, 1993. P. 216—219.

3. Дудай П. В., Иванов В. А., Волков Г. И. и др. Основные типы взрывных размыкателей тока и их коммутационные характеристики // Тр. XII Межд. конф. по генерации мегагауссных магнитных полей и родственными экспериментам. Новосибирск, 13—18 июля 2008 г. С. 384—395.
4. Соколов С. С., Панов А. И., Воробинцев А. А. и др. Методика ТИМ расчета трехмерных задач механики сплошных сред на неструктурированных многогранных лагранжевых сетках // Вопросы атомной науки и тех-

- ники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2005. Вып. 2. С. 37–52.
5. 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 // Там же. 2006. Вып. 4. С. 29–43.
  6. Соколов С. С. Метод расчета двумерных нестационарных упругопластических течений на нерегулярных многоугольных лагранжевых сетках // Там же. 2004. Вып. 4. С. 62–82.
  7. Панов А. И. Методика решения уравнения теплопроводности на нерегулярной сетке // Там же. С. 27–40.
  8. Новиков А. Б., Глушак Б. Л. Сопротивление металлов пластической деформации при высокоскоростном сжатии // Хим. физика. 2000. Т. 19. С. 65–69.
  9. 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.
  10. Соколов С. С. Об одной феноменологической модели кинетики разложения гетерогенного ВВ на основе октогена // Там же. 2007. Вып. 2. С. 50–61.
  11. Новиков И. Г., Соколов С. С. Локальные перестройки нерегулярной сетки в методике ТИМ-2D // Сб. докл. VI науч.-тех. конф. "Молодежь в науке". Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2007.
  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. Гарантин С. Ф., Мамышев В. И. Остывание замагниченной плазмы на границе со взрывающейся металлической стенкой // ПМТФ. 1990. № 1. С. 30–37.
  14. Егоров Н. В., Барабанов В. Н., Власов Ю. В. Двумерная эйлерова методика МЭГ-2D и ее применение для расчета взрывного размыкателя тока // Мощная импульсная электрофизика. Межд. конф. "XIV Харитоновские тематические научные чтения". Сб. докл. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2013. С. 51–56.
  15. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля: Пер. с англ. М.: Мир, 1972.
  16. 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 // Мощная импульсная электрофизика. Межд. конф. "XVI Харитоновские тематические научные чтения". Саров, 21–25 апреля 2014 г. Сб. аннотаций. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2014. С. 39.
  17. Дудай П. В., Ивановский А. В., Иванов В. А. и др. Моделирование работы взрывного размыкателя тока в МГД-приближении // Мощная импульсная электрофизика. Межд. конф. "XIV Харитоновские тематические научные чтения". Сб. докл. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2013. С. 61–65.
  18. 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 // J. Appl. Phys. 2014. Vol. 115. P. 023516.
  19. Демидов В. А., Казаков С. А., Борискин А. С. и др. Размыкание мегаамперных токов взрывным размыкателем с преградой в виде проволочного соленоида // Мощная импульсная электрофизика. Межд. конф. "XIV Харитоновские тематические научные чтения". Сб. докл. Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2013. С. 208–212.

Статья поступила в редакцию 28.07.16.

SIMULATION OF 2D MHD PROCESSES USING LAGRANGIAN UNSTRUCTURED GRIDS BY THE EXAMPLE OF SIMULATING OPERATION OF EXPLOSIVE OPENING SWITCHES / Yu. V. Vlasov, P. V. Duday, A. I. Panov, A. V. Samodolov, S. S. Sokolov (FSUE "RFNC-VNIIEF", Sarov, Nizhny Novgorod region)

The TIM-2D code was used for the magnetohydrodynamic (MHD) simulation of the process of current switching by an explosive opening switch. The current switching simulation results are presented for the two types of explosive opening switches: breakage of a conductor on a ribbed barrier and breakage using cumulative dielectric jets. The numerical simulation was performed in Lagrangian variables using unstructured computational grids with regard to elastoplastic properties and damage of materials and diffusion of the magnetic field.

*Keywords:* magnetic explosion generator, explosive opening switch, magnetohydrodynamic simulation, ribbed barrier, cumulative jets, electric blasting, Lagrangian code.

