

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗРЫВНЫХ РАЗМЫКАТЕЛЕЙ ТОКА НА ЛАГРАНЖЕВЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТКАХ В МГД-ПРИБЛИЖЕНИИ

Н. А. Беляева, П. В. Дудай, А. В. Ивановский, И. М. Куцык, А. И. Панов, А. В. Самодолов, С. С. Соколов, J. H. Goforth¹, R. E. Reinovsky¹, C. L. Rousculp¹, D. G. Tasker¹

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

¹Los Alamos National Laboratory, New Mexico 87545, USA

Представлено описание расчетной модели взрывных размыкателей тока с разрывом проводника на ребристой преграде и с помощью диэлектрических струй. Приводится постановка и результаты гидродинамических расчетов по методике ТИМ-2D с учетом упругопластических свойств и поврежденности материалов, диффузии магнитного поля, работы электрической цепи. Численное моделирование проводилось в лагранжевых переменных с использованием неструктурированных счетных сеток. Проведен сравнительный анализ результатов МГД-расчетов взрывных размыкателей тока различной конструкции с экспериментальными данными ВНИИЭФ и ЛАНЛ.

Введение

Для исследования работы различных экспериментальных нагрузок (лайнрные системы, камеры типа МАГО и «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]. Для прогнозирования параметров импульсов тока в нагрузке без проведения предварительных экспериментов необходимы расчетные модели, способные описать процесс коммутации тока из разрываемого контура в цепь нагрузки.

Расчетные модели ВРТ должны позволять описывать процесс растяжения и разрушения проводника с током с помощью кумулятивных струй или на ребристой преграде, а также учитывать и воздействие на проводник протекающего по нему тока, определять зависимость изменения сопротивления. Для определения формы импульса тока в нагрузке также требуется знать электротехнические параметры разрываемого контура и цепи нагрузки.

Далее приведены постановки задач и результаты расчетов разрыва проводников, полученные с помощью лагранжевой методики ТИМ-2D [3, 4].

Описание методики ТИМ-2D

В расчетной методике ТИМ-2D используется дифференциальные уравнения гидродинамики (с учетом упругопластики [5] и магнитного поля), записанные в переменных Лагранжа в цилиндрической системе координат:

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

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:

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

Кроме этого, в уравнение энергии добавляется объемный источник джоулева тепла

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

а уравнение индукции имеет вид

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

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-проекционный 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.

Во всех расчетах используются упругопластические модели сдвиговой прочности материалов. Расчеты проводились на неструктурированных сетках, состоящих из произвольных многоугольников (необязательно выпуклых, с произвольным числом ребер выходящих из узла). Численное моделирование работы рассматриваемых конструкций ВРТ проводилось в режиме мелкоблочного распараллеливания на распределенной памяти. В расчетах на каждом шаге на границах проводников задается магнитное поле, определяемое моделированием работы электрических цепей нагрузки и генератора. Уравнения цепи имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \{ (L_s + L_G) \cdot I_G \} + \int E dl \Big|_G = 0 \\ \frac{d}{dt} \{ (L_l + L_N) \cdot I_N \} + \int E dl \Big|_N = 0 \end{cases},$$

где L_G, L_N – индуктивности генератора и нагрузки, определяемые по геометрии на каждом шаге, $L_s(t)$ и L_l – буферные индуктивности (заданные величины), I_G, I_N – токи в цепи ВМГ и цепи нагрузки.

Моделирование работы ВРТ кумулятивного типа

Ранее в докладе [7] была описана серия расчетов экспериментов «R-Damage» [8], где использовался размыкатель тока кумулятивного типа. В частности в этом докладе приводятся результаты расчетов, выполненных на сгущающихся сетках, которые показывают, что с увеличением количества счетных точек временные зависимости токов в генераторной цепи и в цепи нагрузки приближаются к экспериментальным значениям (рис. 1). Дальнейший анализ показал, что численные результаты также зависят и от выбора способа расчета УРСа для используемого в экспериментах полиэтилена. Так после замены уравнения состояния, основанного на аппроксимации модели Томаса – Ферми, на уравнение состояния, основанное на полуэмпирическом уравнении состояния твердых тел с переменной теплоемкостью, результаты расчета приблизились к экспериментальным данным. Это видно из рис. 2, на котором приведены кривые экспериментальных токов в сравнении с кривыми токов из двух расчетов, проведенных с одинаковым числом счетных ячеек, но с различными уравнениями состояния для полиэтилена.

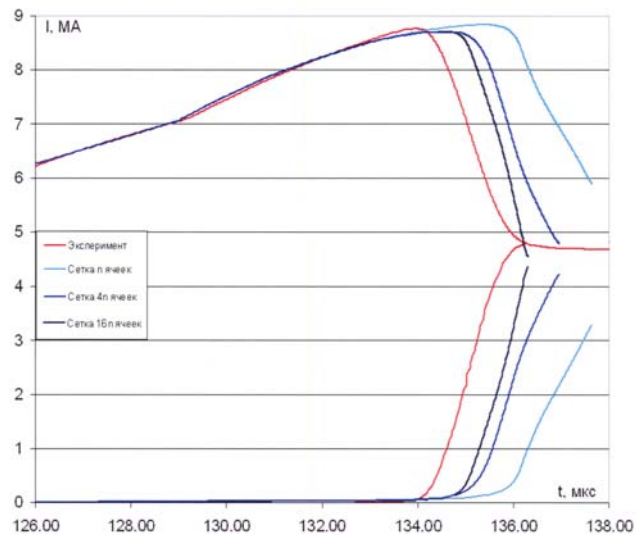


Рис. 1. Временные зависимости тока в цепях генератора и нагрузки в расчетах кумулятивного ВРТ на сгущающихся сетках



Рис. 2. Временные зависимости тока в цепях генератора и нагрузки в расчетах кумулятивного ВРТ с различными УРС для полиэтилена

На рис. 3 приведена схема другого эксперимента с ВРТ кумулятивного типа, выполненного в электрофизическом отделении ВНИИЭФ. Постановка этого опыта и опубликованные по ним экспериментальные данные были использованы нами для валидации методики применительно к моделированию работы ВРТ.

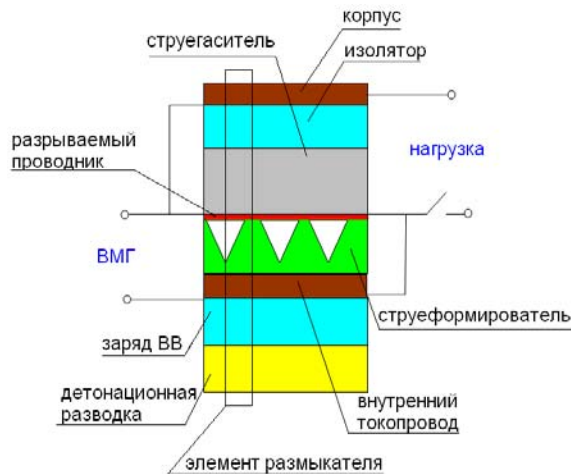


Рис. 3. Цилиндрический кумулятивный ВРТ

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. Конструктивные отличия данного кумулятивного ВРТ от рассмотренного в докладе [7] заключаются в следующем:

- разрываемый ток – 12 МА;
- длина коаксиала токового контура размыкателя составляет 800 мм;

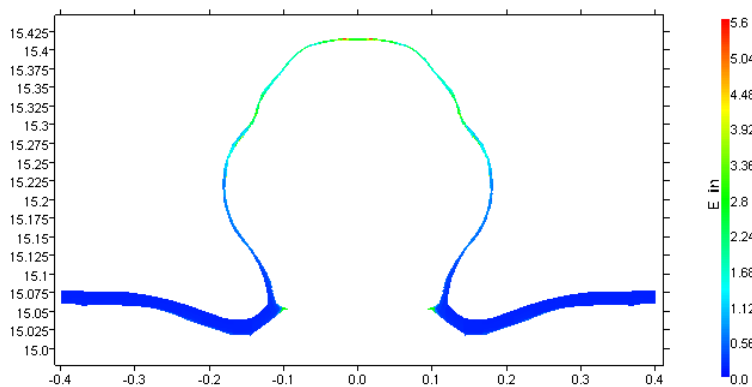


Рис. 4. Растровое изображение распределения внутренней энергии в медной фольге на момент времени близкий к достижению $\epsilon = 5,6$ кДж/г (time ~16,0 мкс)

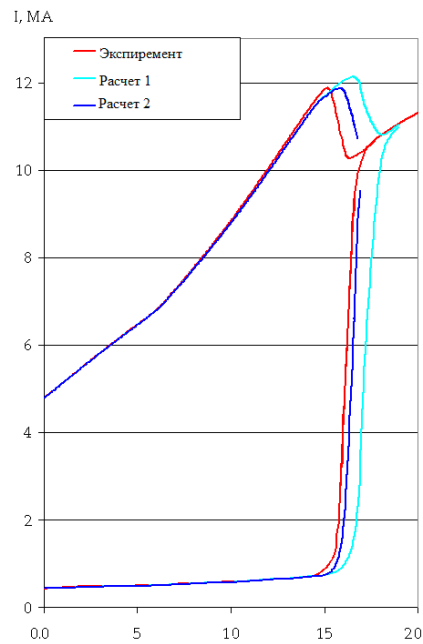


Рис. 5. Временные зависимости тока в цепи генератора и нагрузки в расчетах на сгущающихся сетках, мкс

- в качестве разрываемого проводника выбрана медная фольга толщиной 0.2 мм;
- толщина заряда ВВ – 45 мм.

Удельная теплота сублимации меди равна 5,6 кДж/г. При достижении внутренней энергией этой величины происходит электровзрыв меди. На рис. 4 представлено растровое изображение распределения внутренней энергии в медной фольге на момент времени близкий к достижению $\epsilon = 5,6$ кДж/г. На рис. 5 изображены зависимости величины тока от времени в генераторной цепи и в цепи нагрузки. В данной постановке были проведены расчеты на двух сетках: с количеством ячеек 1000 (расчет 1) и 4000 (расчет 2). Результаты расчетов на сгущающихся сетках показывают, что с увеличением количества счётных точек более адекватно прописывается формируемая кумулятивная струя, и расчетные зависимости тока в цепях генератора и нагрузки приближаются к экспериментальным значениям. Видно, что время основной переброски тока из цепи генератора в цепь нагрузки происходит на момент электровзрыва меди. Также необходимо отметить, что данный расчет проводился с использованием полуэмпирического УРС полиэтилена.

На рис. 6 представлено распределение плотности в ВРТ с медной фольгой на различные моменты времени, показывающее процесс формирования кумулятивной струи и состояние фольги в момент переброса тока.

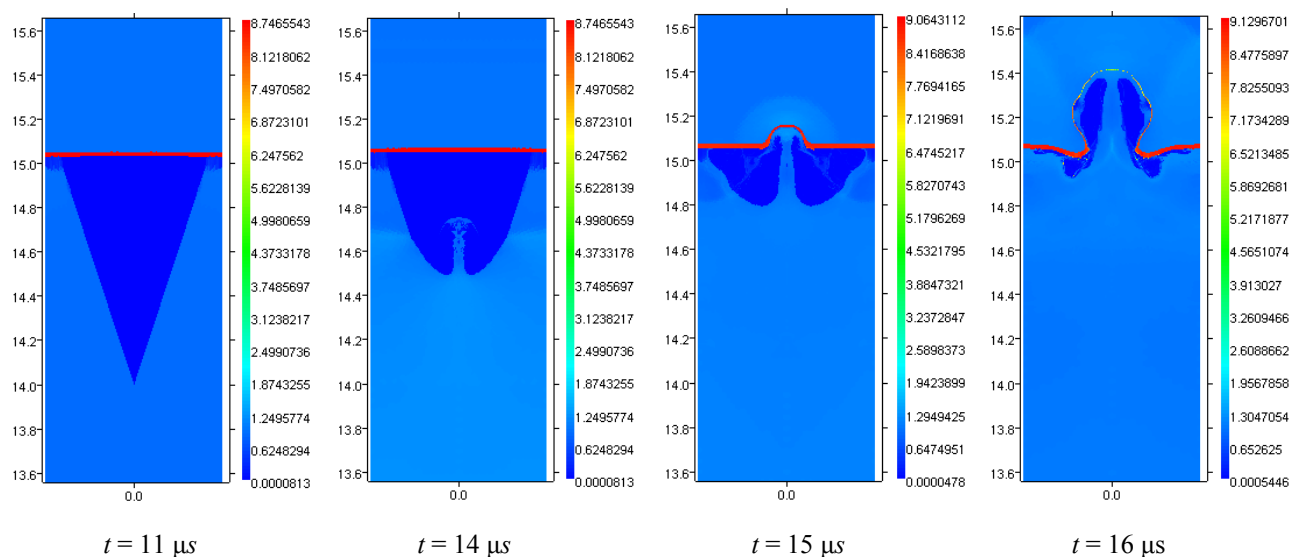


Рис. 6. Распределение плотности в ВРТ с медной фольгой на различные моменты времени, г/см³

Моделирование работы конструкций ВРТ с ребристой преградой

В Лос-Аламосской лаборатории для формирования импульса тока в нагрузке в системе «Процион» использовались ВРТ с фольгой и ребристой преградой [9–11]. Разрыв проводника в данных 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. Постановки этих опытов и опубликованные по ним экспериментальные данные, представляющие собой три варианта экспериментов системы «Процион», также были использованы для создания методики моделирования работы ВРТ. На рис. 7 представлено схематичное изображение первых двух вариантов, которые отличаются друг от друга только геометрическими размерами и параметрами разрываемого тока. Электрическая схема представлена на рис. 8.

Ребристая преграда выполнена из тефлона. Разрываемый проводник выполнен из алюминиевой фольги. Заряд ВВ выполнен из состава РВХ 9501.

На рис. 9 представлены зависимости расчетных и экспериментальных токов в цепях генератора и нагрузки от времени.

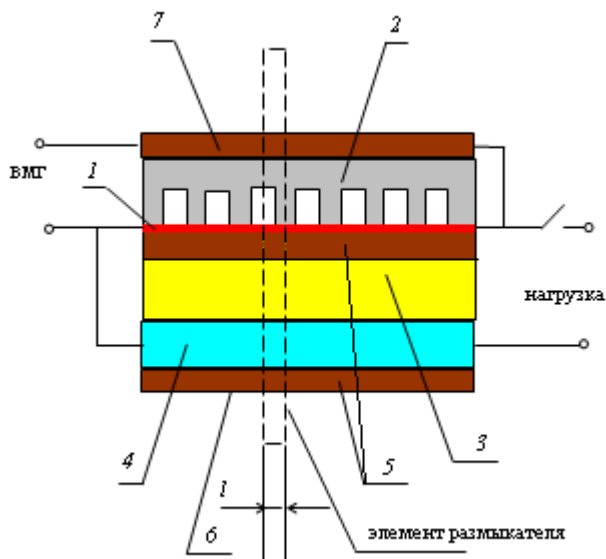


Рис. 7. Схема эксперимента с ВРТ на ребристой преграде (Вариант 1, 2): 1 – фольга, 2 – ребристая преграда, 3 – тефлон, 4 – внутренний токопровод, 5 – аксиально инициируемый заряд, 6 – поверхность, по которой инициируется заряд, 7 – корпус.

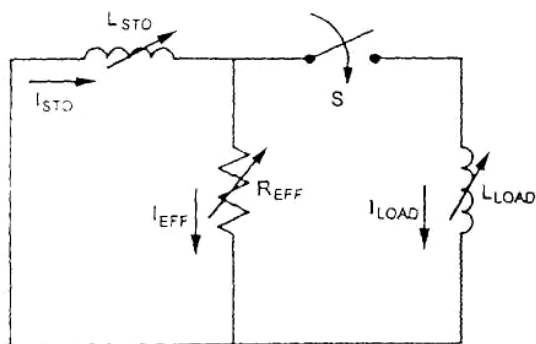


Рис. 8. Упрощенная электрическая схема экспериментов [9]

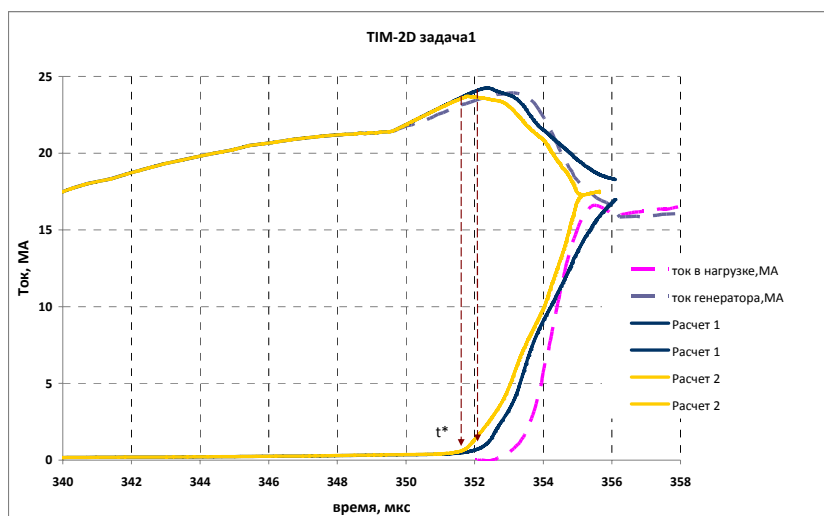
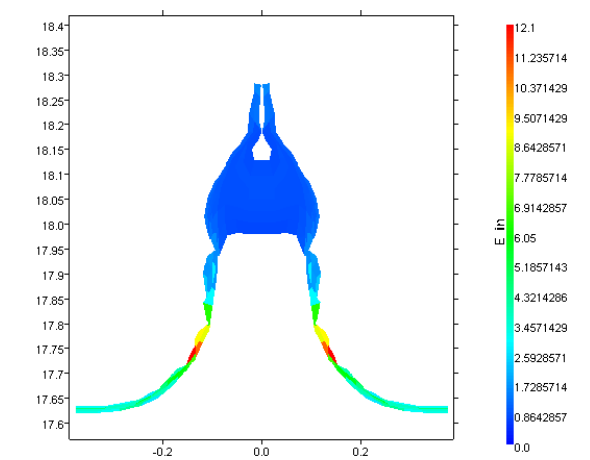


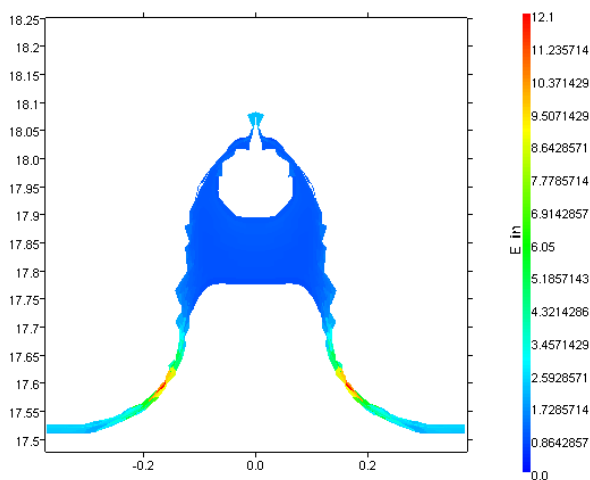
Рис. 9. Графики зависимости токов от времени

На рис. 9 через t^* обозначено время достижения в алюминиевой фольге $\varepsilon = 12,1$ кДж/г (энергия сублимации алюминия). Для расчета 1 время $t^* \sim 352,1$ мкс, для расчета 2 время $t^* \sim 351,6$ мкс. Начало переброса тока в расчетах происходит на 1 мкс раньше, чем в эксперименте. Также необходимо отметить, что форма расчетных кривых тока в нагрузке заметно отличается от эксперимента. Увеличение счетных точек в задаче приближает время переброса тока из одной цепи в другую к экспериментальным значениям.

На рис. 10 приведены растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге на эти моменты времени достижения энергии сублимации. Области фольги, где достигнуты значения энергии сублимации, обозначены красным цветом. Видно, что они находятся в местах наибольшего растяжения фольги на ребрах преграды.



Расчет 1, time= 352,1 мкс



Расчет 2, time= 351,6 мкс

Рис. 10. Растровые изображения распределения внутренней энергии в фольге на момент времени близкий к достижению $\varepsilon = 12,1$ кДж/г

На рис. 11 представлено сравнение расчетных и экспериментальных токовых кривых второго варианта ВРТ на ребристой преграде. Он отличается от первого варианта меньшими геометрическими размерами, меньшим разрываемым током и отсутствием нагрузки. Экспериментальная кривая обозначена синим цветом. На рис. 11 через t^* обозначено время достижения в алюминиевой фольге $\varepsilon = 12,1$ кДж/г (энергия сублимации алюминия), для расчета 1 - $t^* \sim 239,4$ мкс, для расчета 2 - $t^* \sim 238,8$ мкс. Основной качественной характеристикой расчета ВРТ является время переброса тока из одной цепи в другую, её можно оценить по углу наклона графиков после $t = 239$ мкс. Как видно из представленных результатов, данная характеристика хорошо согласуется с результатами эксперимента. Большое отличие расчетного времени начала переброса тока от экспериментального скорее всего объясняется недостаточной достоверностью начальной постановки задачи.

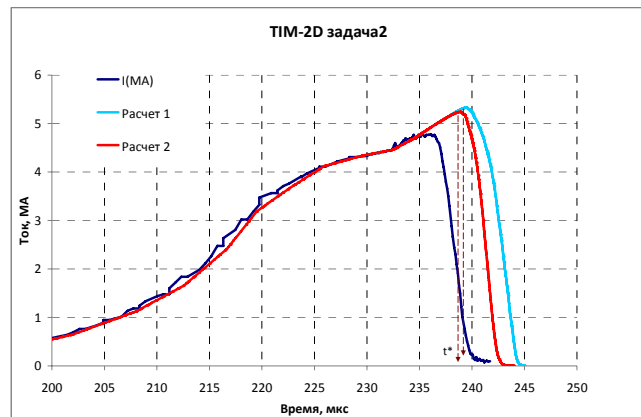
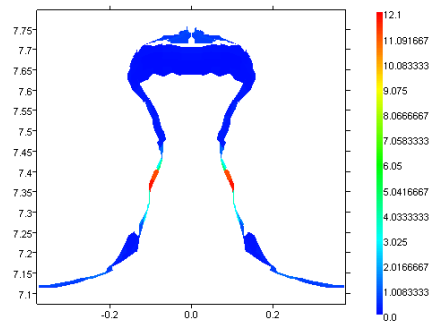


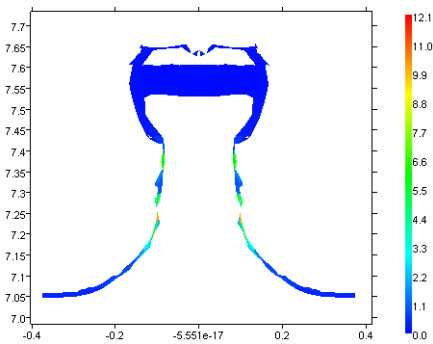
Рис. 11. Графики зависимости тока от времени

На рис. 12 приведены распределения внутренней энергии вблизи в фольге. Очевидно, что форма расположения фольги в пазах ребристой преграды в момент переброса тока отличается от описанной в варианте 1.



Расчет 1, time= 239.4 мкс

Рис. 12. Растровые изображения распределения внутренней энергии на момент времени близкий к достижению $\varepsilon = 12,1$ кДж/г в фольге ВРТ



Расчет 2, time= 238.8 мкс

Рис. 12. (Окончание)

На рис. 13 представлено схематичное изображение третьего варианта ВРТ, который отличается от предыдущих дополнительным зарядом ВВ, расположенным непосредственно под разрываемым проводником.

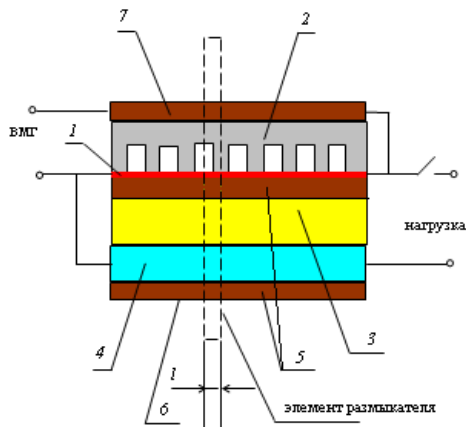


Рис. 13. Схема эксперимента с ВРТ на ребристой преграде (Вариант 3)

На рис. 14 представлены результаты расчета третьего варианта ВРТ на ребристой преграде. Экспериментальная кривая обозначена синим цветом. Как t^* обозначено время достижения в алюминиевой фольге $\epsilon = 12,1$ кДж/г (энергия сублимации алюминия), для расчета 1 $t^* \sim 220,5$ мкс, для расчета 2 $t^* \sim 220,2$ мкс.

Заметное различие расчетных и экспериментальной кривой наблюдается в процессе растяжения фольги до момента начала переброса тока. В данной конструкции ВРТ этот процесс определяется зарядом ВВ, расположенным под фольгой. Возможно, различие токовых кривых связано с недостаточно точными данными по свойствам, используемого ВВ. На рис. 15 приведены растровые изображения распределения внутренней энергии

вблизи фольги на эти моменты времени. Необходимо отметить, что форма расположения фольги в пазах ребристой преграды в этот момент неплохо совпадает с описанной в варианте 1.

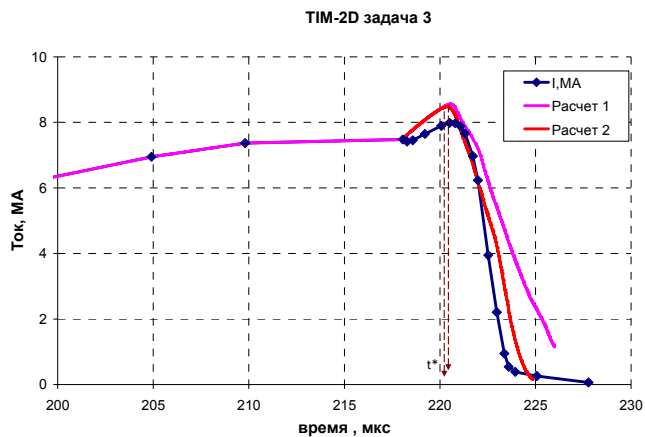
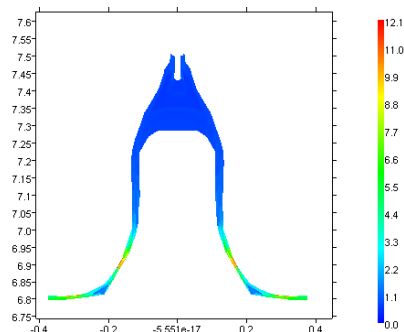
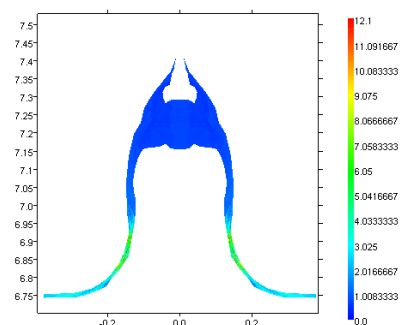


Рис. 14. Графики зависимости тока от времени



Расчет 1, time = 220,5 мкс



Расчет 2, time = 220.2 мкс

Рис. 15. Растровые изображения распределения внутренней энергии на момент времени близкий к достижению $\epsilon = 12,1$ кДж/г в фольге ВРТ

Из результатов расчетов видно, что увеличение числа счетных ячеек в разрываемом проводнике привело к более точному описанию времени переброски тока из цепи генератора.

Заключение

Мы исследовали один из возможных подходов для численного моделирования работы ВРТ в нескольких экспериментальных геометриях. Результаты расчётов показали хорошее согласие численного решения с экспериментальными данными работы размыкателя с разрывом проводника кумулятивными струями. Результаты расчетов также показали, что для используемой лагранжевой методики необходимо относительно высокое пространственное разрешение (относительно мелкая расчетная сетка), чтобы получить адекватное описание процессов, связанных как с развитием детонации, так и с формированием и развитием струйных течений и их последующего воздействия на проводник. Также было показано, что выбор более точного уравнения состояния для описания поведения диэлектрического материала, полиэтилена, для рассматриваемого диапазона давлений позволяет приблизить результаты расчета к экспериментальным данным.

По размыкателям с ребристой преградой было решено три задачи, которые в публикациях имеют названия Procyon II, «Slow» Switch и «Fast» Switch. По основной характеристике работы размыкателя, времени нарастания тока, получено удовлетворительное согласие с экспериментальными данными. Расчёты на сгущающихся сетках показывают лучшее согласие с экспериментальными данными, чем расчеты на крупной расчетной сетке, что, возможно, связано с более адекватным описанием процессов, связанных с зарождением и развитием поврежденности проводника и ребристой преграды при их взаимодействии. Значительные отличия наблюдаются в основном в момент времени начала переключения тока. Возможно, эти отличия объясняются моделью тефлона, применявшейся в расчетах, которая оказалась неподходящей при деформациях и скоростях деформации, наблюдавшихся в экспериментах ЛАНЛ, вариантах 1 и 2. Динамические рентгеновские снимки обеих (ВНИИЭФ и ЛАНЛ) геометрий в различные моменты времени могли бы обеспечить лучшее понимание гидродинамических процессов и, возможно, либо исключить гидродинамику в качестве причины расхождения, либо указать, где расчет начинает отличаться от эксперимента.

Представленные результаты валидационного тестирования на опытах с ВРТ дают основание для использования методики ТИМ-2D в качестве средства математического моделирования с целью прогнозирования работы источников тока, осна-

щенных взрывными размыкателями, а также оптимизации их конструкций.

Список литературы

1. Chernyshev V. K. et al. Explosives Opening Switches for Fast-Operating Helical EMG. In: 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 мегагауссовых магнитных полей и родственными экспериментам. Июль 13–18, 2008, Новосибирск, Россия.

3. Соколов С. С., Панов А. И., Воропинов А. А., Новиков И. Г., Соболев И. В., Ялозо А. В. 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 расчёта 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. Дудай П. В., Ивановский А. В., Иванов В. А., Зименков А. А., Кудрявцева Н. А., Куцык И. М., Панов А. И., Скобелев А. Н., Соколов С. С. Моделирование работы взрывного размыкателя тока в МГД-приближении. High-power pulsed electrophysics. International conference XIV Khariton's topical scientific readings. Digest of technical papers – Sarov: VNIIEF, 2013. P. 534

8. Васюков В. А., Глыбин А. М., Дудай П. В., Дудин В. И., Зименков А. А., Иванов В. А., Ивановский А. В., Краев А. И., Кузьяев А. И., Надежин С. С., Петрухин А. А., Скобелев А. Н., Тюпанова О. А., Atchison W. L., Holtkamp D. В.,

Kaul A. M., Reinovsky R. E., Rodrigues G., Tabaka L. J., Rouscalp C. L., Stone J. B., Oro D. M., Salazar M., Griego J. R., Payton J. R., Westley D. T. Исследование реологических свойств алюминия с применением взрывомагнитных генераторов. ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2013. Т. 448, № 3, с. 285–288.

9. Goforth J. H. et al. Review of the Procyon Explosive Pulsed Power System. Proc. 9 IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, New Mexico, 1993, p.36–43.

10. Goforth J. H., Lindemuth I. R., Marsh S. P., and Reinovsky R. E. "Experiments with Explosively Formed Fuse Opening Switches in Higher Efficiency Circuits," in Proceedings of the Seventh IEEE Pulsed Power Conference, 1989, B. H. Bernstein and J. P. Shannon, eds., pp. 479–482.

11. Goforth J. H., Lindemuth I. R., Marsh S. P., and Reinovsky R. E. "Experiments with Explosively Formed Fuse Opening Switches in Higher Efficiency Circuits," in Proceedings of the Seventh IEEE Pulsed Power Conference, 1989, B. H. Bernstein and J. P. Shannon, eds., pp. 479–482.