

9. Кимерлинг Л. Точечные дефекты в твердых телах. – М.: Мир, 1979. – 238 с.
10. Карпов В.Г., Клиггер М.И. Ионизационный механизм усиления диффузии в полупроводниках // Письма в ЖТФ. – 1980. – Т. 6. – № 23. – С. 1436–1442.
11. Винецкий В.Л., Чайка Г.Е. Теория рекомбинационно-стимулированных атомных скачков в кристаллах // Физика твердого тела. – 1986 – Т. 28. – № 11. – С. 3489–3495.
12. Ленченко В.М. Об активации смещений при релаксации электронных возбуждений в твердых телах // Физика твердого тела. – 1969. – Т. 11. – № 3. – С. 799–805.
13. Степанов В.А. Радиационно-стимулированная диффузия в твердых телах // Журнал технической физики. – 1998. – Т. 68. – № 8. – С. 67–72.
14. Инденбом В.Л. Новая гипотеза о механизме радиационно-стимулированных процессов // Письма в ЖЭТФ. – 1979. – Т. 5. – № 6. – С. 489–492.
15. Алукер Э.Д., Гаврилов В.В., Дейч Р.Г., Чернов С.А. Быстропротекающие радиационно-стимулированные процессы в щелочно-галогидных кристаллах. – Рига: Зинатне, 1987. – 186 с.
16. Оксенгендлер Б.Л. Инверсон-дефектон нового типа // Письма в ЖЭТФ. – 1976. – Т. 24. – № 1. – С. 1215–1218.
17. Мак Б.Т. Радиационная перезарядка примесей в полупроводниках // Журнал технической физики. – 1993. – Т. 63. – № 3. – С. 173–176.
18. Лушик Ч.Б., Лушик А.Ч. Распад электронных возбуждений с образованием дефектов в твердых телах. – М.: Наука, 1989. – 264 с.
19. Лидьярд А. Ионная проводимость кристаллов. – М.: Иностранная литература, 1962. – 222 с.
20. Beniere F. Diffusion in ionic crystals / In: Defects in Insulating Crystals. Proc. of the Intern. Conf. – Riga: Zinatne, 1981. – P. 657–674.
21. Физика электролитов / Под ред. Дж. Хладик. – М.: Мир, 1978. – 555 с.
22. Анненков Ю.М., Франгулян Т.С., Возняк А.В. Радиационно-ускоренное спекание порошков // Порошковая металлургия. – 1991. – № 8. – С. 15–17.
23. Анненков Ю.М., Франгулян Т.С., Столяренко В.Ф. Разрушение радиационных дефектов при электронном облучении КВг // Журнал технической физики. – 1986. – Т. 56. – № 6. – С. 1206.
24. Бакий А.С., Лазарев В.А. О влиянии звука на диффузию в твердых телах // Физика твердого тела. – 1984. – Т. 26. – № 8. – С. 2504–2508.

УДК 533.9

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ВВОДА ЭНЕРГИИ (ИНДУКТИВНОСТИ КОНТУРА) НА ГЕНЕРАЦИЮ УДАРНОЙ ВОЛНЫ И ИМПУЛЬСА ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ ФОЛЬГИ

А.Н. Григорьев\*, \*\*, А.В. Павленко\*

\*РФЯЦ – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск

\*\*НИИ высоких напряжений при ТПУ

E-mail: alex\_nick@mail.ru

*Экспериментально исследовалось влияние скорости ввода энергии (за счет изменения индуктивности контура) в электрически взрываемую фольгу на профиль (амплитуда, фронт, длительность) генерируемой ударной волны и импульса перенапряжения. Обнаружен физический ( $P_m \approx 1,17$  ГПа) предел для роста импульса давления: при уменьшении индуктивности контура, начиная с  $\sim 91$  нГн, профиль импульса давления остается постоянным. Для импульса перенапряжения данной закономерности обнаружено не было. Выявлено наличие связи между импульсами давления и перенапряжения.*

### Введение

Явление электрического взрыва проводников (ЭВП) известно уже более 230 лет [1]. Многогранность и необычность явления стимулировали в XX в. его детальные исследования с самых различных точек зрения. В настоящее время ЭВП представляет значительный интерес для физики конденсированного состояния, физики плазмы, высоковольтной электротехники и смежных областей науки [2, 3]. Это обусловлено тем, что вещество проводника успевает пройти все фазовые состояния – от твердого до плазменного за короткий промежуток времени. При этом процессы, которыми сопровождается взрывообразное разрушение проводника (быстрая потеря проводимости, импульс перенапряжения, ударные волны, диспергирование проводника в на-

нопорошок) и последующая стадия разряда по продуктам взрыва (пинч-эффект, импульс рентгеновского излучения) позволяют широко использовать ЭВП в различных областях науки и техники [2–9].

До настоящего времени физическая интерпретация электрического взрыва проводников, несмотря на усилия многих исследователей, является приближенной, и многие процессы, сопровождающие явление ЭВП не могут найти достаточного объяснения в рамках известных физических моделей. В этой связи экспериментальные исследования различных процессов, сопровождающих ЭВП при различных режимах взрыва (различных параметрах RLC-контур), являются актуальными как с научной (для установления физики процессов), так и с практической (для оптимального управления процессами) точек зрения. Одним из таких процессов является генерация ударной волны при ЭВП.

Ударные волны (УВ), инициируемые ЭВП в газовых и, особенно, в конденсированных средах, находят широкое применение в технике и технологии благодаря возможности целенаправленно управлять их характеристиками в широких диапазонах путем изменения как параметров RLC-контура, так и размеров и материала взрываемого проводника. Для примера можно отметить работы по формообразованию различных материалов, сварке металлов, разрушению горных пород, исследованию динамических характеристик материалов и изделий, дефектоскопии и т.д. [2, 7]. Для создания УВ плоской или сложной формы в конденсированных средах используется электрический взрыв фольги (ЭВФ) [9]. Достоинством данного метода является формирование ударной волны с равномерно-распределенным профилем давления по поверхности объекта. При этом сам образец может иметь сложную геометрическую форму.

Влияние параметров RLC-контура (параметров, определяющих скорость ввода в проводник энергии) на генерацию УВ экспериментально практически не изучено. Определенные попытки были предприняты авторами монографий [6–8], но постановка решаемых ими практических задач не предполагала записи профиля ударной волны и изучения влияния на него скорости ввода энергии. Следует указать на работы [9, 10], в которых по экспериментальным измерениям величины удельного импульса давления при различных условиях ЭВФ, рассчитывался профиль и импульс давления. Задача решалась в одномерном магнитогидродинамическом приближении. Наличие большого разброса и погрешности в экспериментальных результатах по измерению удельного импульса давления ( $\pm 25...40\%$ ), а также сам расчет по этим данным профиля и импульса давления снижает достоверность полученных количественных результатов.

Целью данной работы является экспериментальное изучение влияния индуктивности контура (состоящей из индуктивности фольги и балластной индуктивности) на профиль ударной волны и на импульс перенапряжения при электрическом взрыве фольги.

#### Методики и описание эксперимента

Для изучения влияния скорости ввода энергии во взрываемую фольгу использовался RLC-контур (рис. 1) [11]. Схематическое изображение экспериментального стенда для измерения профиля УВ приведено на рис. 2. Емкость конденсаторной батареи  $C_0$  составляла 79 мкФ (ИК-50-3). Скорость ввода энергии во взрываемую фольгу изменяли путем увеличения или уменьшения индуктивности контура  $L_c$ . Варьирование индуктивности контура  $L_c$  осуществлялось за счет изменения индуктивности нагрузки (ЭВФ)  $L_f$  и за счет включения в контур дополнительной балластной индуктивности  $L_b$  ( $L_c=L_f+L_b$ ) (рис. 1). Под балластной индуктивностью понималась сумма индуктивностей, состоя-

щая из индуктивности контура без нагрузки (индуктивность кабелей, коллектора, токопроводов, конденсаторной батареи) и дополнительно включенной индуктивности. В случае отсутствия дополнительной индуктивности, под балластной индуктивностью понималась только оставшаяся индуктивность контура без нагрузки. Для коммутации электрической цепи использовался коммутатор со скользящим разрядом по поверхности твердого диэлектрика в воздухе (рис. 2) [11].

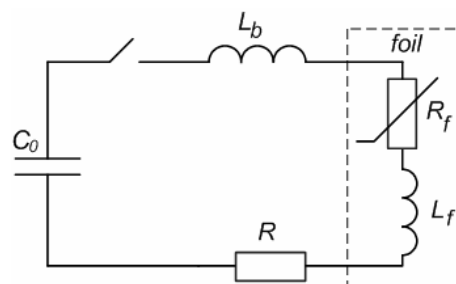


Рис. 1. RLC-контур при электрическом взрыве фольги

Эксперименты проводились при зарядном напряжении накопителя 30 кВ. Индуктивность фольги – 5 варьировалась за счет изменения расстояния до обратного токопровода – 8 (рис. 2). Медная фольга – 5 толщиной 18 мкм имела размеры 100×100 мм. Расстояние от ЭВФ до обратного токопровода – 8 изменялось в диапазоне 15...40 мм (соответственно, индуктивность фольги  $L_f$  составляла 19...76 нГн). Дополнительная индуктивность включалась между коллектором – 4 и взрываемой фольгой – 5 (на рис. 3 дополнительная индуктивность не показана). Величина балластной индуктивности  $L_b$  составляла 16, 190, 500 и 1530 нГн. Считалось, что индуктивность  $L_f$  фольги не зависит от времени  $t$  до момента собственно взрыва. Расчетная величина индуктивности фольги практически полностью совпала с экспериментально измеренной (по результатам опыта короткого замыкания с эквивалентной медной пластиной [11]). Коллектор – 4 представляет собой стальную плиту с канавкой, в которой размещали самоинтегрирующий пояс Роговского – 9 для измерения тока в контуре. Падение напряжения на фольге  $U_f(t)$  измерялось с помощью омического делителя напряжения. Регистрация сигналов проводилась с помощью четырехканального осциллографа Tektronix TDS 2024. Погрешность измерений составляла 10 %.

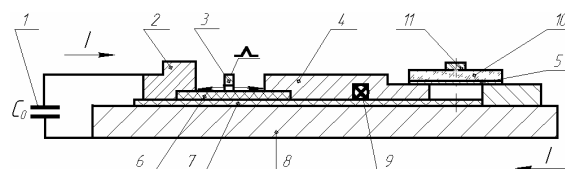


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментального стенда для измерения профиля УВ: 1) емкостной накопитель энергии, 2) высоковольтный электрод, 3) управляющий электрод, 4) коллектор, 5) ЭВФ, 6) диэлектрик, 7) изоляция, 8) обратный токопровод, 9) пояс Роговского, 10) пластина (подложка) из полиметилметакрилата, 11) датчик давления

Для регистрации импульса давления использовался цилиндрический кварцевый датчик давления в режиме дифференцирования [12]. Для этого на фольгу с одной стороны наклеивалась пластина (подложка) из полиметилметакрилата – 10 толщиной 3 мм, на свободную поверхность которой крепился датчик давления – 11. Диаметр датчика давления составлял 30 мм, толщина (высота) – 5 мм. Время регистрации датчиком импульса давления составляло 0,85 мкс.

### Результаты экспериментов

На рис. 3 приведены профили генерируемой при электрическом взрыве фольги ударной волны при различных индуктивностях контура  $L_c$ . Для наглядности начала волн давления сведены в одну точку – к моменту времени 2,45 мкс. Зависимость амплитуды генерируемой УВ от индуктивности контура  $L_c = L_f + L_b$  приведена на рис. 4, а. Как видно из рис. 3 и 4, а амплитуда УВ с уменьшением  $L_c$  растет до определенного предела  $P_m \cong 1,17$  ГПа. Длительность фронта импульса давления  $t_{рф}$  также сохраняется неизменной (рис. 3 и 4, б). Полученное «насыщение» по амплитуде и форме ударной волны при значениях индуктивности контура  $L_c = 35,5 \dots 91$  нГн (рис. 3), очевидно, свидетельствует о реализации предельно возможной скорости физических процессов разрушения проводника (физическое ограничение роста УВ).

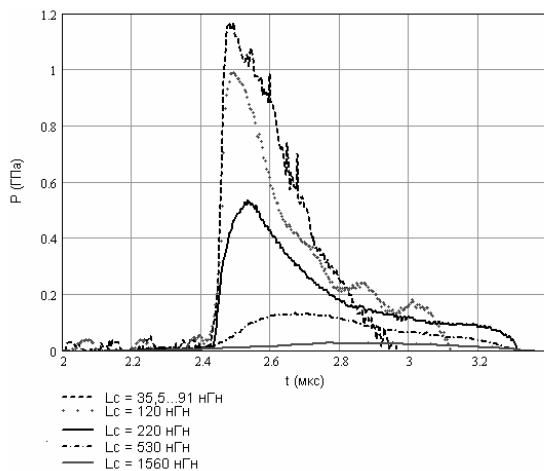
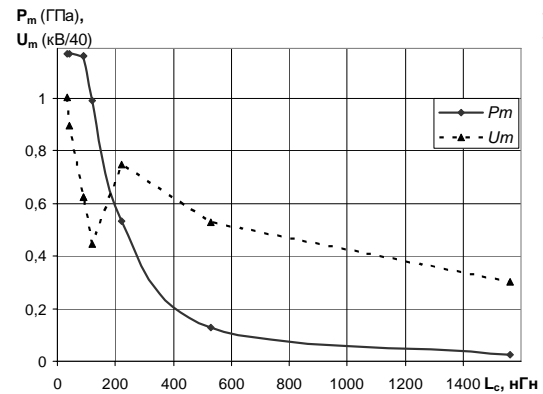


Рис. 3. Профиль волны давления при различных индуктивностях контура  $L_c$

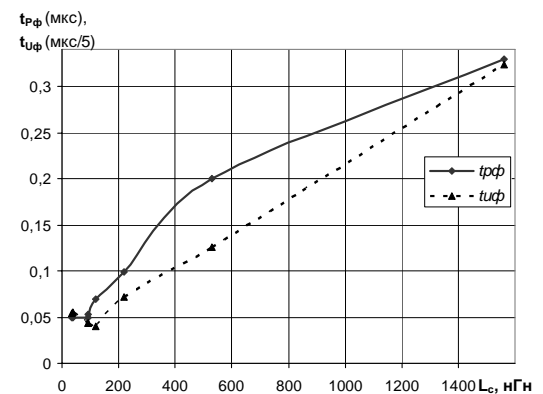
По иному ведет себя импульс перенапряжения (ПН) (рис. 4). В диапазоне варьируемых индуктивностей не удалось обнаружить насыщения по амплитуде импульса ПН (рис. 4, а). При увеличении индуктивности контура за счет  $L_f$  (первые четыре точки –  $L_c = 35,5; 40; 91; 120$  нГн) и  $L_b$  (остальные точки –  $L_c = 220; 530; 1560$  нГн), амплитуда импульса ПН, в отличие от импульса давления, изменяется неоднозначно. При увеличении  $L_c$  за счет включения в контур дополнительной балластной индуктивности  $L_b = 190$  нГн (при  $L_c = 220$  нГн) происходило увеличение импульса ПН (рис. 4, а). Таким об-

разом, импульс ПН неоднозначно связан с индуктивностью контура и зависит, помимо  $L_f$  и  $L_b$ , еще и от их соотношения. Тем не менее, из рис. 4 следует, что в случае изменения только  $L_f$  или только  $L_b$  между импульсами давления и перенапряжения существует корреляция.

Из рис. 4, б, видно, что зависимости длительностей фронтов импульсов давления  $t_{рф}$  и перенапряжения  $t_{уф}$  от индуктивности контура также коррелируют между собой – с ростом индуктивности контура  $L_c$  их длительности увеличиваются.



а)



б)

Рис. 4. Влияние индуктивности контура на: а) амплитуды и б) длительности фронтов импульсов давления и перенапряжения

Следует отметить, что в работе [13] при измерении импульсов давления и перенапряжения для цилиндрических проводников обнаружена линейная зависимость между амплитудой ударной волны и амплитудой импульса перенапряжения. При изменении материала проводника, его длины и диаметра изменяется только угол наклона линейной зависимости  $P_m = f(U_m)$ .

Наличие связи между амплитудами давления и перенапряжения, а также между длительностями их фронтов свидетельствует о протекании единого процесса разрушения, который определяет как импульс перенапряжения, так и импульс давления.

### Выводы

1. Для создания ударной волны плоской или сложной формы используется электрический

- взрыв фольги. Использование электрического взрыва как генератора ударной волны требует знания его оптимальных режимов. С увеличением индуктивности  $L_c$  разрядного RLC-контура, начиная с определенного значения  $L_c \cong 100$  нГн, происходит значительное снижение амплитуды генерируемой ударной волны.
2. Амплитуда ударной волны с уменьшением  $L_c$  растет до определенного предела  $P_m \cong 1,17$  ГПа. Длительность фронта импульса давления  $t_{pф}$  также сохраняется неизменной. Полученное «насыщение» по амплитуде и форме ударной волны при значениях индуктивности контура  $L_c = 35,5...91$  нГн свидетельствует о реализации предельно возможной скорости физических процессов разрушения проводника (физическое ограничение роста параметров ударной волны).
  3. Минимальная длительность фронта импульса давления составляет  $\sim 50$  нс, а длительность импульса на полувысоте  $\sim 230$  нс.
  4. Связи между амплитудами давления и перенапряжения, а также между длительностями их фронтов свидетельствуют о протекании единого процесса разрушения, который определяет как импульс перенапряжения, так и импульс давления.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nairne E. Electrical experiments by Mr. Edward Nairne // Phil. Trans. Roy. Soc. London. – 1774. – V. 6. – P. 79–89.
2. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.
3. Асиновский Э.И., Кириллин А.В. Нетрадиционные методы исследования термодинамических свойств веществ при высоких температурах. – М.: Янус-К, 1997. – 158 с.
4. Cho C., Murai K. e. a. Enhancement of energy deposition in pulsed wire discharge for synthesis of nanosized powders // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2004. – V. 32. – № 5. – P. 2062–2067.
5. Волков Г.С., Грабовский Е.В. и др. Методика рентгеновского зондирования излучением X-пинча плазмы многопроволочных сжимающихся лайнеров на установке “Ангара-5-1” // Приборы и техника эксперимента. – 2004. – № 3. – С. 110–124.
6. Наугольных К.А., Рой Н.А. Электрический разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с.
7. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
8. Кривицкий Е.В. Динамика электровзрыва в жидкости. – Киев: Наукова думка, 1986. – 208 с.
9. Острик А.В., Петровский В.П. Особенности откольного разрушения полимерных цилиндрических тел при неосесимметричном импульсном нагружении // Прикладная механика и техническая физика. – 1993. – № 1. – С. 133–137.
10. Зайцев А.Д., Петровский В.П., Сасиновский Ю.К., Холод С.В. Экспериментально-теоретические исследования параметров механических нагрузок, инициируемых электрическим взрывом фольг / <http://skh.chat.ru/science>
11. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И. Электрический разряд по поверхности твердого диэлектрика. Ч. 2. Исследование сильноточного коммутатора // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 79–82.
12. Graham R.A., Neilson F.W. Piezoelectric Current from Shock-Loaded Quartz – a Submicrosecond Stress Gauge // J. Appl. Phys. – 1965. – V. 36. – № 5. – P. 1775–1783.
13. Lee W.M., Ford R.D. Pressure measurements correlated with electrical explosion of metals in water // J. Appl. Phys. – 1988. – V. 64. – № 8. – P. 3851–3854.

УДК 621.039.55.001.4:621.3.014.6

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ СИСТЕМ

Ю.В. Бабушкин, В.П. Зимин, Е.А. Хомяков

Томский политехнический университет  
E-mail: zimmin@ido.tpu.edu.ru

*Представлена структура программного комплекса для исследования характеристик термоэмиссионных систем. Описан процесс расчета характеристик электрогенерирующей сборки, состоящий из трех этапов: подготовительный, расчетный и визуализации результатов. В качестве иллюстрации возможностей программного комплекса приведены результаты расчета аномальных характеристик электрогенерирующихборок.*

Практическая реализация технологии вычислительного эксперимента базируется на трех составляющих: модели, алгоритмы и программы. Во многих случаях для проведения вычислительных экспериментов достаточно использовать современные математические пакеты, в которых реализованы эффективные и проверенные временем численные методы решения типовых задач. При модели-

ровании сложных физических установок, к которым, безусловно, относятся термоэмиссионные системы, на этапе создания математического описания производится декомпозиция взаимосвязанных процессов по различным критериям, что приводит к созданию множества иерархических моделей [1] и алгоритмов [2] разной степени сложности. Необходимость учета влияния на исследуемые процессы