

12

## Влияние толщины электрически взрывающейся фольги на однородность формирования импульса давления

© А.Н. Григорьев<sup>1,2</sup>, Н.А. Лубенченко<sup>1,2</sup>, А.В. Павленко<sup>1</sup><sup>1</sup> Российский федеральный ядерный центр — Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, Снежинск, Челябинская обл., Россия<sup>2</sup> Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета „МИФИ“, Снежинск, Челябинская обл., Россия

E-mail: a.n.grigoryev@outlook.com

Поступило в Редакцию 6 мая 2026 г.

В окончательной редакции 27 июня 2026 г.

Принято к публикации 2 июля 2026 г.

Представлены результаты экспериментов, свидетельствующие о влиянии толщины плоской электрически взрывающейся фольги на неоднородность и разновременность ее взрыва. В экспериментах с фольгами алюминия, меди, титана и никелевого сплава 80НХС измерены амплитудно-временные профили давления в центральной и краевой областях плоской фольги. Из полученных результатов следует, что с увеличением толщины фольги происходит увеличение неоднородности и разновременности взрыва.

**Ключевые слова:** фольга, толщина, электрический взрыв, однородность давления.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.20.63604.20762

Электрический взрыв фольги (ЭВФ) используется как инструмент получения плоской ударной волны большой площади [1,2]. Также эксперименты с взрывающимися фольгами используются для исследования теплофизических свойств металлов и сплавов [3,4].

В работах [5–7] было установлено, что при электрическом взрыве плоской фольги имеет место „неплоскостность“ волны давления: формируется пространственно неоднородный импульс давления (взрыв начинается с краев фольги). Недавние эксперименты [8] по электрическому взрыву плоских медных пластин и фольг (ток  $\sim 1.6$  МА с фронтом нарастания  $\sim 100$  ns) с радиационными магнитогидродинамическими расчетами показали более ранний взрыв торцевых граней пластины (фольги). При этом на оптических [8] и рентгеновских [8,9] снимках четко видно различие состояний осевой и краевой областей взрывающейся фольги.

Тем не менее при ЭВФ все же имеется возможность создать плоскую ударную волну большой площади. Это, как было показано в работах [6,7], может быть достигнуто путем использования фольг низкопроводящих металлов, таких как титан, свинец, сталь 08КП, никелевый сплав 80НХС.

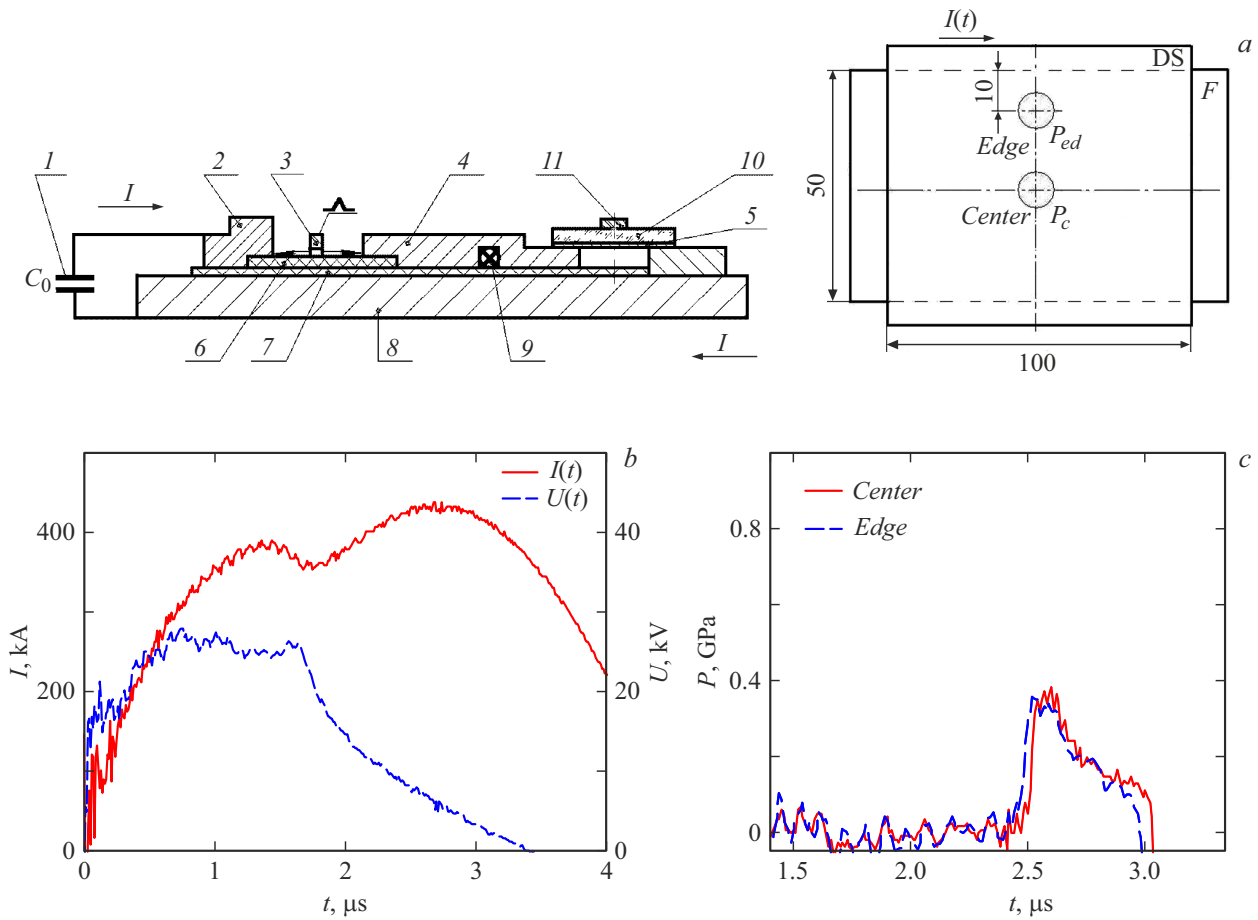
Одним из важных в практическом отношении факторов, который влияет на амплитуду и длительность формируемого давления, является толщина взрывающейся фольги. Исходя из предположения о влиянии скин-эффекта на неоднородность взрыва следует ожидать, что с увеличением толщины фольги неоднородность взрыва будет расти.

Для проверки данного предположения были проведены эксперименты для фольг различной толщины, изготовленных из одного металла при фиксированных

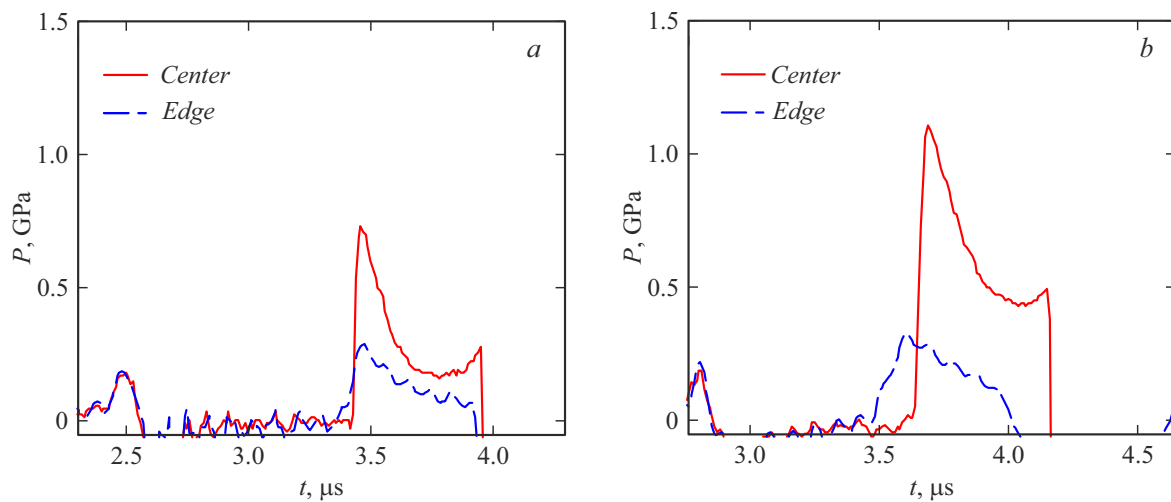
длине  $l_f$  и ширине  $b_f$  фольги, а также при фиксированной введенной в фольгу относительной энергии  $w/w_c$  ( $w$  — введенная в фольгу тепловая энергия,  $w_c$  — энергия сублимации взрывающегося металла).

Электровзрыв осуществлялся на низкоиндуктивном ( $\sim 60$  нН) стенде [7,10] с накопительной емкостью  $C_o = 23$  или  $79 \mu\text{F}$  (рис. 1, а). Расстояние между взрывающейся фольгой 5 и обратным токопроводом 8 составляло 22 мм. Расчет выделившейся в фольге энергии и использованные для этого электротехнические диагностики аналогичны применявшимся в работах [5,7]. Изменение зарядного напряжения  $U_o$  (22–44.7 кВ) позволило вводить в фольги разной толщины (той же марки материала) одинаковую относительную энергию  $w/w_c$ , а также получать результаты для одних и тех же фольг при различных  $w/w_c$ . В качестве взрывающейся фольги использовались фольги никелевого сплава 80НХС (на  $\sim 95$  mass % состоит из никеля и железа, из которых более 80 % составляет никель; в расчетах использовалось значение  $w_c = 7.3$  кДж/г), меди ( $w_c = 5.3$  кДж/г), алюминия ( $w_c = 11.9$  кДж/г) и титана ( $w_c = 9.8$  кДж/г), длина которых составляла  $l_f = 100$  мм, а ширина  $b_f = 50$  мм ( $b_f = 40$  мм для алюминиевых фольг толщиной 14 и  $100 \mu\text{m}$ ). Толщина фольг  $d_f$  варьировалась от 14 до  $100 \mu\text{m}$ .

Регистрация тока  $I(t)$  в контуре и падения напряжения  $U(t)$  на взрывающейся фольге осуществлялась соответственно с помощью пояса Роговского и омического делителя напряжения. Измерения амплитудно-временных профилей давления в различных областях взрывающейся фольги проводились с помощью двух цилиндрических кварцевых датчиков давления, работающих в токовом режиме [11]. Погрешность измерений не превышала 8 %.



**Рис. 1.** *a* — схематическое изображение (разрез) экспериментального стенда и расположение датчиков давления на подложке в опытах с электрическим взрывом фольги. *I* — накопительная емкость, 2 — высоковольтный электрод, 3 — управляющий электрод, 4 — коллектор, 5 — взрываема фольга (*F*), 6 — диэлектрик, 7 — изоляция, 8 — обратный токопровод, 9 — пояс Роговского, 10 — диэлектрическая подложка из полиметилметакрилата (DS), 11 — датчик давления (2 pcs). *b* — амплитудно-временные профили тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  при взрыве титановой фольги толщиной  $50\text{ }\mu\text{m}$ . *c* — импульсы давления, зарегистрированные датчиками при электрическом взрыве фольги титана BT1-00 толщиной  $50\text{ }\mu\text{m}$  ( $U_o = 44\text{ kV}$ ,  $w = 1.08w_c$ ).



**Рис. 2.** Импульсы давления, зарегистрированные датчиками давления при электрическом взрыве фольги алюминия АД1М толщиной  $30\text{ }\mu\text{m}$  ( $U_o = 27.3\text{ kV}$ ,  $w = 1.14w_c$ ) (*a*) и толщиной  $50\text{ }\mu\text{m}$  ( $U_o = 36.4\text{ kV}$ ,  $w = 1.18w_c$ ) (*b*). Предымпульс является электромагнитной наводкой от взрыва фольги на датчик давления.

Введенная в фольгу энергия рассчитывалась по осциллограммам тока и напряжения:  $W(t) = \int U_a(t)I(t)dt$ , где  $U_a(t) = U(t) - L_f dI/dt$  — активное падение напряжения на взрывающейся фольге. Считалось, что индуктивность фольги  $L_f$  постоянна и не зависит от времени. Для примера на рис. 1, *b* приведены амплитудно-временные профили тока  $I(t)$  и напряжения  $U(t)$  при взрыве титановой фольги толщиной  $50 \mu\text{m}$ . Удельная (на единицу массы взрывающейся фольги) энергия определялась как  $w(t) = W(t)/m_f$ , где  $m_f$  — масса взрывающейся фольги. Удельная энергия рассчитывалась до момента времени, соответствующего минимуму тока в процессе его обрыва (полувысоте спада импульса перенапряжения), и сравнивалась с удельной энергией сублимации взрывающегося металла  $w_c$ .

Кварцевые цилиндрические датчики давления размещали на свободной поверхности диэлектрической

подложки (полиметилметакрилат толщиной  $3 \text{ mm}$ ), подклеенной к взрывающейся фольге. Размеры датчиков составляли (диаметр/толщина)  $10/3 \text{ mm}$  или  $8/2.5 \text{ mm}$ , что позволяло регистрировать импульс давления длительностью  $\sim 0.5 \mu\text{s}$ . Расположение датчиков давления показано на рис. 1, *a*.

Количественно неоднородность взрыва фольги характеризуют коэффициент неоднородности  $K_n$

$$K_n = \frac{P_{m.c}}{P_{m.ed}} \quad (1)$$

и разновременность максимумов давления

$$\Delta t_p = t_{m.c} - t_{m.ed}, \quad (2)$$

где  $P_{m.c}$  и  $t_{m.c}$  — амплитуда импульса давления, зарегистрированного центральным датчиком, и соответствующее ему время;  $P_{m.ed}$  и  $t_{m.ed}$  — амплитуда импульса давления, зарегистрированного крайним датчиком, и соответствующее ему время.

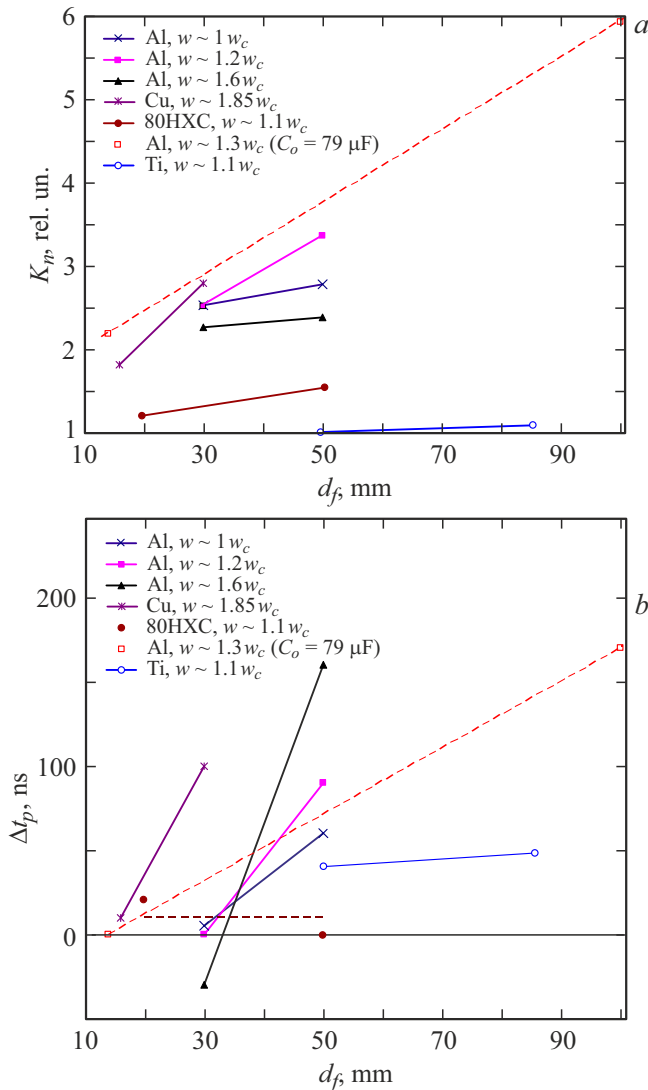
В экспериментах регистрировали амплитудно-временные профили давления, по которым определялся коэффициент неоднородности  $K_n$  и разновременность  $\Delta t_p$  взрыва. Амплитудно-временные профили давления при взрыве титановой и алюминиевой фольг приведены соответственно на рис. 1, *c* и 2.

На рис. 3, *a* изображены зависимости коэффициента неоднородности  $K_n$  от толщины взрывающейся фольги  $d_f$ , полученные на основе зарегистрированных амплитудно-временных профилей давления. Отдельно следует отметить, что в опытах с алюминиевыми фольгами толщиной  $14$  и  $100 \mu\text{m}$  при  $w \sim 1.3w_c$  ширина  $b_f$  была равна  $40 \text{ mm}$  и использовались датчики давления  $8/2.5 \text{ mm}$ . Данные обстоятельства могли послужить причиной повышения регистрируемой неоднородности взрыва.

Из рис. 3, *a* следует, что с увеличением толщины фольги  $d_f$  происходит увеличение коэффициента неоднородности  $K_n$ . Одновременно с этим также происходит существенное увеличение разновременности  $\Delta t_p$  взрыва от единиц наносекунд (для медной фольги толщиной  $16 \mu\text{m}$  и алюминиевой фольги толщиной  $14$ – $30 \mu\text{m}$ ) до  $\sim 100$ – $150 \text{ ns}$  (для медной фольги толщиной  $30 \mu\text{m}$  и алюминиевой фольги толщиной  $50$ – $100 \mu\text{m}$ ) (рис. 3, *b*). Эти факты косвенно подтверждают влияние динамики токораспределения [12,13] во взрывающейся фольге на неоднородность ее взрыва.

Наилучшая однородность имеет место при электро-взрыве как тонкой, так и толстой фольги из низкопроводящих металлов (для титана  $K_n \approx 1.03$ – $1.1$ , для сплава 80НХС  $K_n \approx 1.2$ – $1.6$ ): центральный и крайний датчики регистрируют близкие по форме импульсы давления (рис. 1, *c*). Таким образом, для фольг низкопроводящих металлов сравнительно большого размера может быть реализована возможность исследовать их теплофизические свойства методом ЭВФ с использованием низкоиндуктивных разрядных контуров.

Подводя итог, отметим, что при электровзрыве исследованных фольг (медь, алюминий, титан, никелевый



**Рис. 3.** Зависимости коэффициента неоднородности  $K_n$  (*a*) и разновременности  $\Delta t_p$  (*b*) от толщины взрывающейся фольги  $d_f$  для фольг алюминия, меди, никелевого сплава 80НХС и титана.

сплав 80НХС) независимо от материала и значения вложенной в фольгу относительной энергии  $w/w_c$  наблюдается рост неоднородности взрыва  $K_n$  с увеличением толщины взрывающейся фольги. Наряду с этим увеличение толщины взрывающейся фольги приводит к повышению разновременности формирования импульса давления.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] А.П. Байков, А.Е. Войтенко, А.М. Искольдский, Ю.Е. Нестерихин, Физика горения и взрыва, **9** (2), 323 (1973). [A.P. Baikov, A.E. Voitenko, A.M. Iskol'dskii, Yu.E. Nesterikhin, Combust. Explos. Shock Waves, **9** (2), 279 (1973). DOI: 10.1007/BF00814828].
- [2] D. Keller, J. Penning, *Exploding wires* (Plenum Press, N.Y., 1962), vol. 2, p. 259.
- [3] Е.М. Апфельбаум, А.М. Кондратьев, А.Д. Рахель, ЖЭТФ, **165** (6), 876 (2024). DOI: 10.31857/S0044451024060154
- [4] А.М. Kondratyev, V.N. Korobenko, A.D. Rakhel, J. Phys.: Condens. Matter, **34**, 195601 (2022). DOI: 10.1088/1361-648X/ac553d
- [5] А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, Е.И. Карнауков, Письма в ЖТФ, **40** (2), 45 (2014). [A.V. Pavlenko, A.N. Grigoriev, E.I. Karnaukhov, Tech. Phys. Lett., **40** (1), 69 (2014). DOI: 10.1134/S106378501401026X].
- [6] А.В. Павленко, А.Н. Григорьев, Е.И. Карнауков, Письма в ЖТФ, **40** (20), 62 (2014). [A.V. Pavlenko, A.N. Grigoriev, E.I. Karnaukhov, Tech. Phys. Lett., **40** (10), 913 (2014). DOI: 10.1134/S1063785014100265].
- [7] А.Н. Григорьев, Е.И. Карнауков, А.В. Павленко, В.С. Седой, ПМТФ, **56** (1), 162 (2015). [A.N. Grigoriev, E.I. Karnaukhov, A.V. Pavlenko, V.S. Sedoi, Appl. Mech. Tech. Phys., **56** (1), 136 (2015). DOI: 10.1134/S0021894415010204].
- [8] И.М. Дацко, Н.А. Лабетская, В.А. Ванькевич, С.А. Чайковский, В.И. Орешкин, Е.В. Орешкин, Физика плазмы, **51** (7), 696 (2025). DOI: 10.31857/S0367292125070029 [I.M. Datsko, N.A. Labetskaya, V.A. Van'kevich, S.A. Chaikovskii, V.I. Oreshkin, E.V. Oreshkin, Plasma Phys. Rep., **51** (7), 763 (2025). DOI: 10.1134/S1063780X25603487].
- [9] T.A. Shelkovenko, S.A. Pikuz, I.N. Tilikin, V.M. Romanova, S.N. Mishin, L. Atoyan, D.A. Hammer, IEEE Trans. Plasma Sci., **46** (11), 3741 (2018). DOI: 10.1109/TPS.2018.2852063
- [10] A.N. Grigoriev, A.V. Pavlenko, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., **14** (4), 964 (2007). DOI: 10.1109/TDEI.2007.4286534
- [11] R.A. Graham, F.W. Neilson, W.B. Benedick, J. Appl. Phys., **36** (5), 1775 (1965). DOI: 10.1063/1.1703126
- [12] А.Н. Григорьев, М.А. Борщевский, И.В. Матвеев, Н.А. Лубенченко, в сб. *Проблемы ускорительной техники и физики высоких плотностей энергии. Тр. Междунар. конф. „XXIV Харитоновские тематические научные чтения“* (РФЯЦ–ВНИИЭФ, Саров, 2024), с. 37–45.
- [13] А.Н. Григорьев, М.А. Борщевский, И.В. Матвеев, Н.А. Лубенченко, в сб. *Всерос. науч.-практ. конф. „Научная сессия НИЯУ МИФИ–2024“* (НИЯУ МИФИ, М., 2024), с. 92–101.