

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК И МЕХАНИЗМА ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ГРАФИТОВЫХ ПРОВОДНИКОВ. ЧАСТЬ II

*Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
пр. Октябрьский 43 А, г. Николаев, 54018, Украина*

Данная работа является продолжением [1].

Характеристики и особенности электровзрыва (ЭВ) цилиндрических стержней из прессованного поликристаллического графита (графитовых проводников) диаметром  $d = 0,3; 0,5$  и  $0,7$  мм, длиной  $l = 10 - 40$  мм при их удельной электропроводности  $\sigma_0$  более  $10^5$  См/м и изменении запасенной энергии конденсаторной батареи  $W_0$  от 12 до 570 Дж рассмотрены в [1].

Целью настоящей работы является определение особенностей, характеристик и механизма процесса ЭВ графитовых проводников при более низких значениях удельной электропроводности  $\sigma_0$  тех же размеров, что и в [1], а также более толстых ( $d = 2$  мм) проводников.

### 1. Особенности и характеристики ЭВ

Уменьшение  $\sigma_0$  от  $2 \cdot 10^5$  до  $2,6 \cdot 10^4$  См/м (при диаметре  $d = 0,7$  мм) и до  $8,6 \cdot 10^3$  См/м (при  $d = 0,5$  мм) привело к значительному увеличению начального сопротивления проводника  $R_0$ . Так, для проводника  $d = 0,5$  мм,  $l = 40$  мм сопротивление  $R_0$  возросло от 1 до 23,6 Ом, что существенно отразилось на осциллограммах разрядного тока  $I(t)$  и напряжения на разрядном промежутке  $U(t)$ .

Приведены (рис. 1) осциллограммы  $I(t)$  и  $U(t)$  ЭВ проводников  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м длиной от 10 до 40 мм при зарядном напряжении конденсаторов  $U_0 = 20$  кВ, запасенной энергии  $W_0 = 187$  Дж и индуктивности разрядного контура  $L = 2,3$  мкГн.

На приведенных в настоящей работе осциллограммах верхняя кривая – напряжение, нижняя – ток,  $m_t$ ,  $m_U$  и  $m_I$  – значения время, напряжение и ток соответственно.

Осциллограммы  $I(t)$  и  $U(t)$ , приведенные на рис. 1, а, б, соответствуют режиму, названному в [2] «режимом, подобным пробую». Осциллограммы  $U(t)$  похожи на полученные при электрическом разряде в жидкости с предпробивной стадией процесса, за время которой формировался канал разряда. В [2] полагалось, что ЭВ графитового проводника происходит путем нагрева, испарения и перехода в плазменное состояние углерода в локальной приэлектродной области. Постепенное расширение вдоль проводника этого процесса приводит к замыканию межэлектродного промежутка плазменным каналом, по которому затем проходит мощный импульс тока.

Увеличение нами чувствительности осциллографа по току, по сравнению с [2], для тех же режимов позволило установить, что «режим подобный пробую» есть не что иное, как ЭВ графитового проводника без пика напряжения с токовой паузой и наличием вторичного пробоя (см. [1]). Снижение напряжения  $U_0$  с 20 до 15 кВ привело к исчезновению вторичного пробоя. Тем не менее, проводник оказался полностью разрушенным. Следовательно, формирование плазменного канала при вторичном пробое происходит в уже разрушенном проводнике иным, по сравнению с предложенным в [2] механизмом.

В табл. 1 приведены характеристики ЭВ графитовых проводников, соответствующие осциллограммам, представленным на рис. 1. Высокое сопротивление  $R_0$  при меньшей электропроводности  $\sigma_0$  привело к более высокому напряжению начала токовой паузы  $U_{ост}$  (напряжению «обрыва» тока канала разряда). Так, для  $d = 0,5$  мм,  $l = 40$  мм,  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м напряжение  $U_{ост}$  в 3,5 раза больше, чем при  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м, и близко к  $U_0$ , в то время как для  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м отношение  $U_{ост}/U_0 \cong 0,2$ . Максимальные значения тока  $I_1$ , мощности  $N_1$  и магнитного давления на оси проводника  $P_m$  за время первого импульса тока для  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м при  $U_0 = 20$  кВ соответственно в 4,6; 2,6 и 21,0 раза меньше, чем для  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м (см. [1]).

Таблица 1. Характеристики ЭВ графитовых проводников при изменении длины  $l$  и напряжения  $U_0$

$\frac{d}{l}$ , мм	$\frac{\sigma_0}{R_0}$ , $\frac{\text{См/М}}{\text{Ом}}$	$W_0/W_1$ , Дж	$U_0/U_m$ , кВ	$N_1/N_2$ , МВТ	$I_1/I_1^*$ , кА	$I_2$ , кА	$W_s$ , Дж	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$P_m$ , МПа
$\frac{0,5^{**}}{40}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{23,6}$	$\frac{187}{71}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{30}{31}$	$\frac{1,7}{4,0^*}$	5,5	530	15,0	6,5	1,5
$\frac{0,5^{**}}{30}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{17,7}$	$\frac{187}{60}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{37}{30}$	$\frac{2,0}{4,0^*}$	5,5	397	11,3	6,5	1,9
$\frac{0,5^{**}}{20}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{11,8}$	$\frac{187}{67}$	$\frac{20}{20}$	$\frac{49}{33}$	$\frac{2,5}{4,0^*}$	8,1	265	7,6	6,5	3,4
$\frac{0,5}{10}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{5,9}$	$\frac{187}{84}$	$\frac{20}{15,8}$	$\frac{67}{17}$	$\frac{4,4}{4,0^*}$	8,7	132	3,8	6,5	10,0
$\frac{0,5}{40}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{23,6}$	$\frac{420}{91}$	$\frac{30}{26,7}$	$\frac{92}{101}$	$\frac{4,5}{5,1^*}$	12,0	530	12,8	12,5	10,4
$\frac{0,5}{40}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{23,6}$	$\frac{747}{171}$	$\frac{40}{33,8}$	$\frac{71}{144}$	$\frac{2,1}{5,8^*}$	16,6	530	12,8	22,1	2,2
$\frac{0,5}{15}$	$\frac{8,6 \cdot 10^3}{8,9}$	$\frac{751}{87}$	$\frac{40,1}{30}$	$\frac{201}{212}$	$\frac{7,1}{5,8^*}$	19,7	199	4,9	22,2	25,8
$\frac{0,5}{15}$	$\frac{5 \cdot 10^3}{15,3}$	$\frac{747}{78}$	$\frac{40}{24,3}$	$\frac{178}{71}$	$\frac{6,2}{5,1^*}$	19,2	225	9,6	38,8	19,9
$\frac{0,5}{12}$	$\frac{5 \cdot 10^3}{12,2}$	$\frac{747}{71}$	$\frac{40}{26,1}$	$\frac{121}{188}$	$\frac{4,9}{5,1^*}$	20,5	180	7,7	39,1	12,2
$\frac{0,7^{**}}{40}$	$\frac{2,6 \cdot 10^4}{3,9}$	$\frac{420}{157}$	$\frac{30}{30}$	$\frac{104}{80}$	$\frac{3,8}{8,9^*}$	9,3	966	2,5	1,3	3,8

Примечание.  $I_1^* = 0,5U_0\Pi_2^{-1/4}\sqrt{C/L}$  – расчетные значения  $I_1$ ; две звездочки соответствуют режимам с токовой паузой

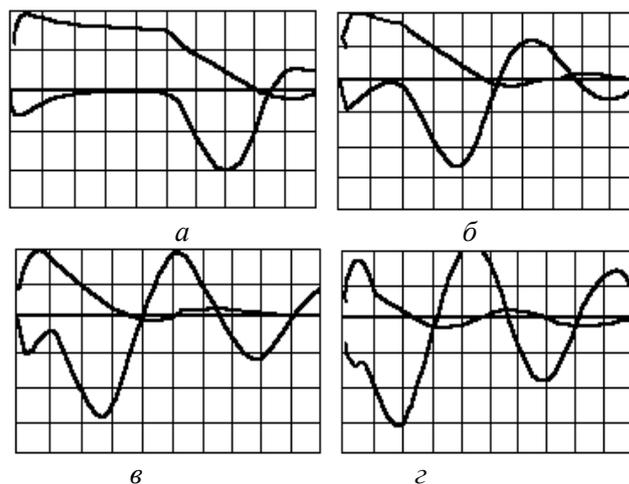


Рис. 1. Осциллограммы ЭВ графитовых проводников различной длины:  $U_0 = 20$  кВ,  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м,  $t_i = 5$  мкс/дел,  $t_u = 10$  кВ/дел,  $t_l = 2,62$  кА/дел  $l$ , мм: а – 40; б – 30; в – 20; г – 10

Уменьшение длины графитового проводника при  $U_0 = 20$  кВ (см. рис. 1) от 40 до 10 мм привело к уменьшению длительности токовой паузы вплоть до ее исчезновения (см. рис. 1, г). В дуговой стадии ЭВ, особенно когда  $l < 30$  мм, разряд носил ярко выраженный колебательный характер. Это свидетельствует о малой доле энергии, израсходованной на разрушение за счет процессов локального испарения материала проводника во время первого импульса тока. Отношение  $W_0/l$  увеличилось в

4 раза, а первая  $I_1$ , вторая  $I_2$  амплитуды тока и мощность  $N_1$  выросли в 2,2; 1,6 и 2,2 раза соответственно (см. табл. 1). Энергия  $W_1$ , выделенная за время первого импульса тока, при таких ЭВ составила 31 – 45% от  $W_0$ , а  $P_m$  было значительно меньше давления  $P^* = 20$  МПа, соответствующего плавлению графита [1],  $P_m = (0,075 - 0,5)P^*$ . Для сравнения: энергия  $W_1$  при  $l = 40$  мм и  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м при том же режиме составляла 91,5% от  $W_0$  (см. [1, табл. 1]), а  $P_m > P^*$ . Следовательно, при меньшей  $\sigma_0$  механизм разрушения проводника при прочих равных условиях менее энергоемкий, что свидетельствует о сильном влиянии электропроводности  $\sigma_0$  на механизм процесса ЭВ и его характеристики.

Кривые мощности  $N(t)$ , соответствующие осциллограммам, приведенные на рис. 1, имеют крутой передний фронт. Максимальная мощность  $N_1$  достигалась за время  $t \cong 1$  мкс (рис. 2), как и время достижения максимального напряжения  $U_m$ . Это свидетельствует о высокой скорости процессов испарения, происходящих в проводнике. По мере уменьшения длины  $l$  мощность  $N_1$  выросла в 2,2 раза, а максимум второго импульса мощности  $N_2$  уменьшился в 1,8 раза. Минимальный ток во время токовой паузы составлял 0,15 до 0,25  $I_1$ .

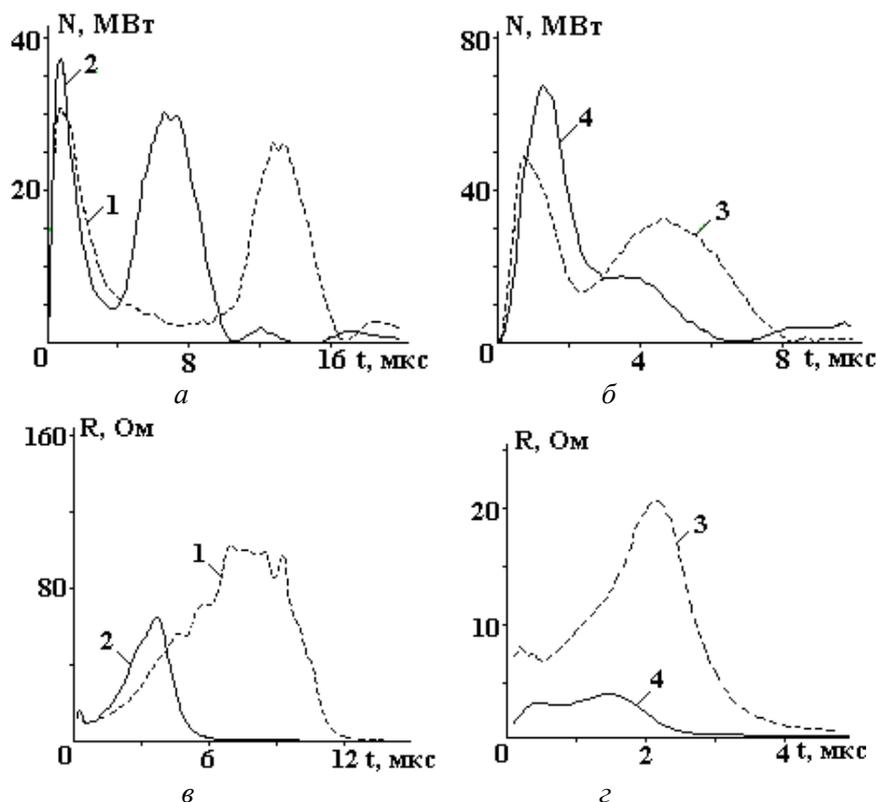


Рис. 2. Мощность (а, б) и сопротивление (в, г) при ЭВ графитовых проводников различной длины:  $U_0 = 20$  кВ,  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м.  $l$ , мм: 1 – 40; 2 – 30; 3 – 20; 4 – 10

Активное сопротивление  $R(t)$  во время токовой паузы (см. рис. 2) в 4 – 5 раз выше исходного  $R_0$ . При  $l = 10$  мм, когда токовая пауза отсутствовала, максимальное сопротивление  $R_m = 0,8 R_0$ .

Как показано в [1, 3], удельная энергия сублимации графита  $W_s^{уд}$  зависит от концентрации в углеродном паре одно- и многоатомных молекул углерода. В качестве  $W_s^{уд}$ , как и [1], принята величина  $W_s^{уд} = 2,9 \cdot 10^7$  Дж/кг.

Предпринята попытка перейти от механизма разрушения проводника, полученного для  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м, к такому, как при  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м (с пиком напряжения), путем выполнения условия  $W_0 > W_s$  и  $P_m > P^*$ . Для этого увеличивали энергию  $W_0$  и уменьшали длину  $l$ .

Повышение напряжения  $U_0$  при  $d = 0,5$  мм,  $l = 40$  мм с 20 до 30 кВ, а затем и до 40 кВ (рис. 3,а) привело к уменьшению времени появления дуговой стадии ЭВ с 10 до 3 мкс от начала процесса. Энергия  $W_0$  увеличилась в 4 раза, однако энергия первого импульса тока  $W_1$  выросла незначительно, в 1,3 раза. Основная доля энергии выделилась за время первого полупериода колебаний тока дуговой стадии. Магнитное давление  $P_m < P^*$ , следовательно, смены механизма ЭВ не произошло (см. табл.1).

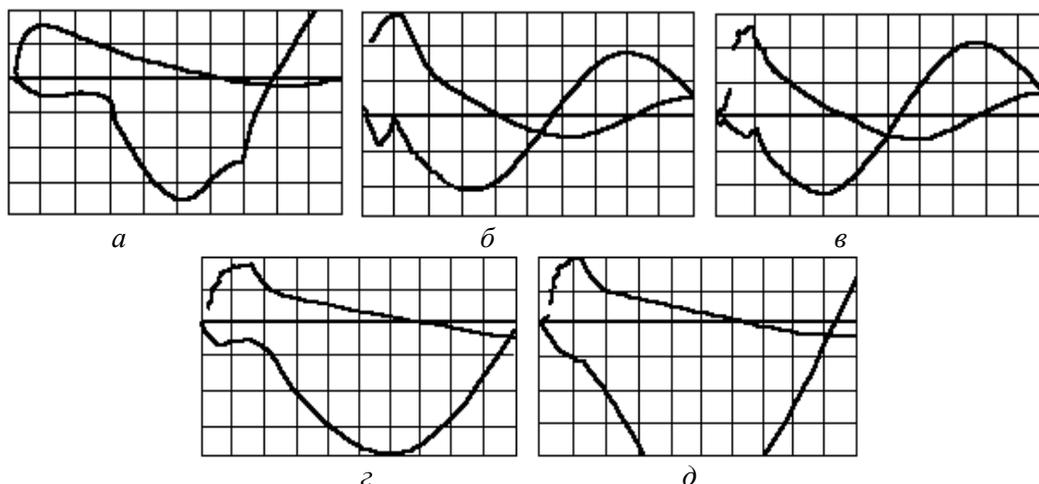


Рис. 3. Осциллограммы ЭВ графитовых проводников  $d = 0,5$  мм при изменении их длины и параметров генератора:  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м (а, б, в),  $\sigma_0 = 5 \cdot 10^3$  См/м (г, д),  $U_0 = 40$  кВ (а, б, в),  $U_0 = 20$  кВ (г),  $U_0 = 25$  кВ (д),  $C = 1$  мкФ (а, б, в),  $C = 3$  мкФ (г, д),  $m_t = 1$  мкс/дел,  $m_u = 25$  кВ/дел (а),  $m_u = 10$  кВ/дел (б, в, г, д),  $m_l = 4,63$  кА/дел (а, г, д),  $m_l = 8,9$  кА/дел (б, в);  $l$ , мм: а) 40; б) 15; в) 12; г) 10

Уменьшение длины проводника от 40 – 15 и 12 мм при  $U_0 = 40$  кВ (рис. 3, б, в) привело к уменьшению энергии  $W_s$  и сокращению времени появления дуговой стадии ЭВ до 1 мкс. Несмотря на то, что энергия  $W_0/W_s = 3,8$  и давление  $P_m = 1,3P^*$  получить осциллограмму с острым пиком напряжения, как при  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м, не удалось (см. рис. 3, б). При этом энергия  $W_1$  составляла лишь 11,6% от  $W_0$ .

Увеличение емкости  $C$  от 1 до 3 мкФ (см. рис. 3, г, д) при  $l = 10$  мм,  $\sigma_0 = 5 \cdot 10^3$  См/м и напряжении  $U_0 = 20$  и 25 кВ не привело к существенному изменению вида осциллограмм, а, следовательно, и механизма процесса.

С ростом энергии  $W_0$  интенсивно увеличивалась амплитуда тока дуговой стадии, а амплитуда  $I_1$ , от которой зависит механизм процесса, возрастала незначительно вследствие высокого  $R_0$ .

В табл. 1 приведены также значения критериев подобия (безразмерных комплексов)  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ , и расчетные значения  $I_1^*$  тока  $I_1$  (см. [1]), полученные по формуле, используемой для расчета ЭВ металлических проводников:

$$I_1 = 0,5 \Pi_2^{-1/4} U_0 \sqrt{C/L}, \quad \text{где } \Pi_2 = \frac{C U_0^2 \sqrt{C/L}}{d^4 \rho_0 \sigma_0 W_s^{yl}}. \quad (1)$$

Для  $d = 0,5$  мм критерии  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  на один–два порядка больше приведенных в [1] при  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м. Расчетные значения  $I_1$  ближе к экспериментальным для беспаузных режимов. Исключение составляет режим ЭВ при  $d = 0,5$  мм,  $l = 40$  мм,  $U_0 = 40$  кВ (см. рис. 3, а), когда наблюдалось anomalous поведение  $I_1$ , причины которого не установлены.

Как и при  $\sigma_0 > 10^5$  См/м (см. [1]), для режимов с малой длиной  $l$  и напряжением  $U_0 > 25$  кВ практическое совпадение  $I_1$  и  $I_1^*$  получается при  $W_s^{yl} = 5,9 \cdot 10^7$  Дж/кг. Такая энергия сублимации соответствует преимущественному содержанию в углеродном паре одноатомных молекул.

Для режимов с паузой тока (в отличие от  $\sigma_0 > 10^5$  См/м) значения  $I_1^*$  ближе к  $I_1$  при использовании в (1) коэффициента 0,25.

## 2. Анализ фотограмм, механизм ЭВ

Проведен анализ фотограмм ЭВ графитового проводника (на фоне подсветного импульса), полученных с помощью высокоскоростного фоторегистратора СФР-2М в режиме лупы времени и приведенных в [2]. Время между кадрами по вертикали четырехрядной фотограммы составляло 1 мкс.

Для большей наглядности нами выделены по горизонтали и увеличены несколько характерных кадров этих фотограмм (рис. 4). На кадрах (а, б) показан ЭВ графитового проводника  $d = 0,3$  мм,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м в период первого (а) и второго (б) импульсов тока. Кадры (в) соответствуют образованию дуговой стадии ЭВ проводника  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м. Длина проводников 40 мм,  $U_0 = 22$  кВ,  $C = 1$  мкФ.

Из фотограмм (а, б) следует, что при ЭВ проводника  $d = 0,3$  мм во время первого импульса тока образовался канал разряда, светящийся относительно однородно по длине. После «обрыва» тока

свечение канала прекратилось, но продукты взрыва продолжали расширяться под действием энергии  $W_1$ . Когда давление в газообразных продуктах взрыва уменьшилось настолько, что стала возможной ударная ионизация, произошел пробой межэлектродного промежутка внутри газовой полости за время менее 1 мкс. Это привело к дуговой стадии ЭВ, когда через образовавшийся канал разряда выделяется энергия, оставшаяся в конденсаторной батарее. Подобное развитие процесса характерно и для ЭВ тонких металлических проводников [4].

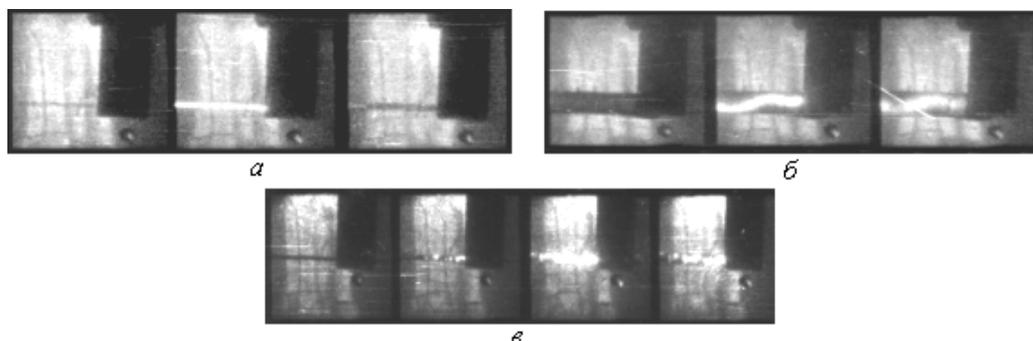


Рис. 4. Фотограммы ЭВ графитовых проводников:  $U_0 = 22$  кВ,  $C = 1$  мкФ,  $l = 40$  мм: время между кадрами 4 мкс:  $d = 0,3$  мм,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м (а, б);  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м (в)

На фотограмме ЭВ проводника  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м, когда  $R_0$  велико и осциллограмма процесса имела вид, как на рис. 1, а свечения канала разряда за время первого импульса тока не зафиксировано. Поэтому приведены только кадры после токовой паузы, соответствующие образованию дуговой стадии ЭВ (см. рис. 4, в).

Вследствие малой энергии  $W_1$  канал за время токовой паузы к моменту времени возникновения дуговой стадии ЭВ расширился примерно в 5 раз меньше, чем в описанном выше ЭВ при  $d = 0,3$  мм. Это привело к принципиально иному механизму образования канала дуговой стадии.

Из фотограммы (рис. 4, в) следует, что канал токовой паузы представлял собой чередующиеся черные (графит) и серые (пар) участки. Между черными участками за время менее 1 мкс образовались яркие локальные свечения – электродуги, которые затем слились в сквозной светящийся канал разряда. Появление плазмы в виде дуг привело к резкому снижению сопротивления, увеличению разрядного тока и к дуговой стадии ЭВ.

Характерно, что первоначальная яркость свечения дуг была неравномерной по длине – более яркой у одного из электродов. Это при малом увеличении кадров фотограммы создавало иллюзию постепенно распространяющегося вдоль проводника плазменного канала.

Прекращение разрядного тока (см. рис. 4, в) вновь выявило первоначальное локальное свечение канала разряда, свидетельствующее о неоднородности структуры и температуры различных его участков. Подобное развитие процесса наблюдали и при ЭВ толстых металлических проводников без токовой паузы [4]. Однако до образования микродуг металлический проводник весь находился в жидком состоянии, а рассматриваемый графитовый состоял из частиц графита в газовой оболочке.

Исследование продуктов ЭВ графитового проводника  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м при несколько меньшем напряжении  $U_0$ , когда после токовой паузы вторичный пробой не возникал, показало, что за время первого импульса тока проводник полностью разрушался за счет частичного локального испарения. Однако за это время вследствие высокой плотности разрушенного проводника и недостаточной для поддержания горения дуг энергии  $W_1$  микродуги между частицами графита не развились.

Как следует из фотограммы процесса (см. рис. 4, в), возникновению дуговой стадии ЭВ способствовало “стратообразование” – образование чередующихся участков частиц графита и газовых промежутков. Расширение за время токовой паузы газовых промежутков при наличии достаточного напряжения на емкости  $C$  обеспечивало выполнение условия, необходимого (по закону Пашена) для возникновения ударной ионизации в газе. Это и привело к образованию микродуг и канала дуговой стадии ЭВ. Чем больше энергия, выделенная за время первого импульса тока  $W_1$ , тем быстрее расширяются продукты электровзрыва и короче токовая пауза, вплоть до ее исчезновения (см. рис. 1, в; рис. 3).

Детальное рассмотрение увеличенных кадров канала разряда первого импульса тока ЭВ проводника  $d = 0,3$  мм показывает, что и он образовался за счет слияния микродуг, однако расстояние между ними мало. Разбиение проводника на темные и светлые участки наблюдалось до времени до-

стижения пика напряжения  $t_n$  (см. [1, рис. 1]), соответствующего образованию ярко светящегося канала разряда на фотограмме. Однако для появления вторичного пробоя в этом случае стратообразование не использовалось из-за значительно большей энергии  $W_1$  и меньших размеров частиц углерода.

Следует отметить, что при ЭВ проводника  $d = 0,3$  мм,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м, поскольку наблюдался пик напряжения  $U_n$  и  $P > P^*$  [1], до момента  $t = t_n$  проводник (или его центральная часть) находился в жидком состоянии, но при ЭВ проводника  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 8,6 \cdot 10^3$  См/м, так как пик напряжения отсутствовал и  $P < P^*$ , за время первого импульса тока жидкой фазы не образовалось. Тем не менее, стратообразование наблюдалось в обоих случаях.

Очевидно, при  $\sigma_0 > 10^5$  См/м токовая пауза возникает из-за образования газовой фазы в канале разряда и увеличения при этом сопротивления  $R(t)$  вследствие процессов испарения.

При низких  $\sigma_0$  микродуги за время первого импульса тока могут не развиваться, а если разовьются, то это приведет к дуговой стадии ЭВ без токовой паузы (см. рис. 3).

### 3. Модели стратообразования

Расслоение металлического проводника при ЭВ на отдельные макроскопические участки (“отрезки”, “диски”, “страты”) при нагревании его током плотностью  $j \geq 10^6$  А/см<sup>2</sup> – явление широко известное, но до сих пор не имеющее общепризнанного объяснения [5, 6]. Предложено много гипотез. Причиной появления страт в жидком металле может быть:

- возникновение магнитогидродинамических (МГД) неустойчивостей [7], вызванных наличием азимутального магнитного поля и связанного с ним радиального магнитного давления (приводят к нарушению геометрии проводника);

- локальное объемное парообразование вследствие неравномерного по объему нагрева (из-за наличия макро- и микронеоднородностей) проводника мощным импульсом тока, заканчивающееся взрывообразным выходом паров наружу [8];

- разрушение в жидком металле части связей и наличие в нем продольных упругих колебаний, возникающих на предыдущих стадиях нагревания [9, 10] и пр.

Сам факт, что, несмотря на многочисленные исследования, отсутствует общепризнанная точка зрения на механизм процесса ЭВ металлических проводников, свидетельствует о сложности этого процесса и зависимости его от условий ЭВ. Это характерно для ЭВ графитовых проводников, теплофизические свойства которых изучены весьма слабо [11] и сведений по ЭВ которых крайне мало.

Для рассмотренного режима ЭВ графитовых проводников  $d = 0,3$  мм,  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м,  $l = 40$  мм при  $U_0 = 20$  кВ максимальная плотность  $j_m$  в первом импульсе тока составляла  $0,82 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>. Такой режим входит в диапазон стратообразования металлических проводников [5, 6], а ЭВ таких проводников при  $U_0 = 35$  кВ, когда  $j_m = 1,2 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>, относится к однородному ЭВ. Очевидно, что для графитовых и металлических проводников диапазоны стратообразования должны быть различными.

Для  $d = 0,5$  мм,  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м,  $U_0 = 20$  кВ (см. табл. 1) при изменении длины  $l$  от 40 до 10 мм плотность тока  $j_m$  увеличилась от  $0,87 \cdot 10^6$  до  $0,22 \cdot 10^7$  А/см<sup>2</sup>, что близко к нижнему пределу диапазона стратообразования при ЭВ металлических проводников. Очевидно, что к этому типу ЭВ графитовых проводников больше подходит модель стратообразования за счет неравномерного по объему нагрева проводника импульсом тока с возникновением локальных перегревных областей из-за наличия включений: газов, примесей, царапин и пр.

### 4. Электровзрыв толстых проводников

ЭВ толстых графитовых проводников ( $d = 2$  мм) представляет интерес в связи с исследованием механизма и характеристик ЭВ неметаллических материалов, а также с возможностью получения новых веществ из продуктов взрыва графитовых проводников.

Исследовалось влияние напряжения  $U_0$  на ЭВ графитовых проводников  $d = 2$  мм,  $l = 40$  мм,  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  и  $6 \cdot 10^3$  См/м. Напряжение  $U_0$  изменялось от 15 до 40 кВ, энергия  $W_0$  – от 112,5 до 747 Дж при индуктивности  $L = 2,3$  мкГн. Осциллограммы и характеристики ЭВ таких проводников приведены на рис. 5 (а, б, в) и в табл. 2.

На осциллограммах  $U(t)$  при изменении  $U_0$  от 25 до 40 кВ наблюдался пик напряжения, близкий к  $U_0$ , хотя при этом давление  $P_m \ll P^*$  (см. табл. 2). Кривые мощности  $N(t)$  и сопротивления  $R(t)$  имели такой же характер и особенности, как и при ЭВ рассмотренных в [1] тонких графитовых проводников с относительно высокой электропроводностью (рис. 6).

Несмотря на то, что электропроводность  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м соответствует рассмотренным выше, однако осциллограмм, подобных приведенным на рис. 1, а, для  $d = 2$  мм,  $l = 40$  мм,  $U_0 = 20$  кВ не

наблюдалось. Это объясняется сравнительно малым сопротивлением  $R_0$  проводников с большим поперечным сечением. Действительно,  $R_0$  составляло 0,57 и 2,1 Ом для  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  и  $6 \cdot 10^3$  См/м соответственно. Отношение  $U_m/U_0$  изменялось от 0,7 до 0,95.

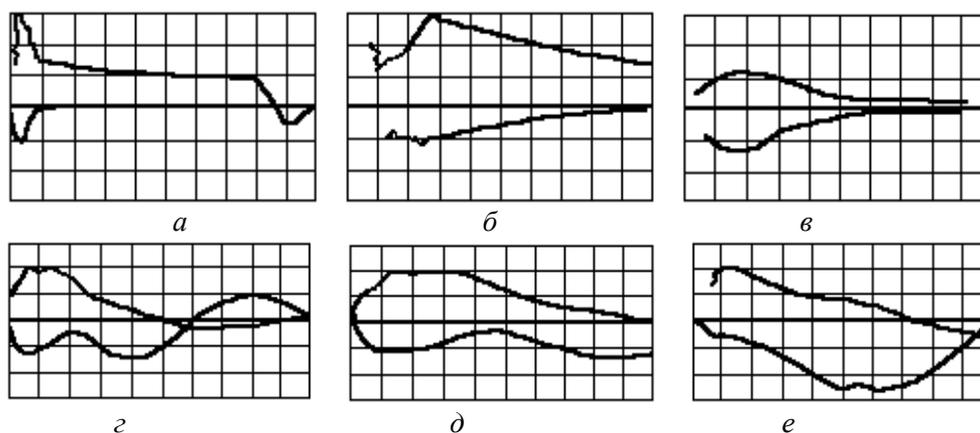


Рис. 5. Осциллограммы ЭВ графитовых проводников ( $d = 2$  мм) при изменении параметров проводника и разрядного контура:  $t_u = 10$  кВ/дел,  $t_i = 8,74$  кА/дел (а, б, г, д),  $t_i = 4,37$  кА/дел (в),  $C = 1$  мкФ,  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $l = 40$  мм: а –  $U_0 = 40$  кВ,  $t_i = 5$  мкс/дел; б –  $U_0 = 30$  кВ,  $t_i = 0,5$  мкс/дел; в –  $U_0 = 15$  кВ,  $t_i = 1$  мкс/дел;  $C = 3$  мкФ,  $U_0 = 25$  кВ; г –  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $l = 15$  мм,  $t_i = 2$  мкс/дел; д –  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $l = 20$  мм,  $t_i = 1$  мкс/дел; е –  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м,  $l = 20$  мм,  $t_i = 1$  мкс/дел

Таблица 2. Характеристики ЭВ графитовых проводников ( $d = 2$  мм,  $l = 40$  мм) при различных  $\sigma_0$  и  $U_0$

$U_0$ , кВ	$\sigma_0$ , См/м	$W_0$ , Дж	$W_1$ , Дж	$U_m$ , кВ	$I_1$ , кА		$N_1$ , МВт	$\Pi_1$	$\Pi_2$	$P_m$ , МПа
					Эксперимент	Расчет				
40**	$2,2 \cdot 10^4$	747	409	36,6	6,0	5,3	218	0,46	0,05	1,16
30**	$2,2 \cdot 10^4$	420	190	27,0	4,3	4,6	101	0,46	0,03	0,59
30**	$6 \cdot 10^3$	420	198	28,4	2,6	3,3	70,8	1,44	0,10	0,21
25**	$2,2 \cdot 10^4$	292	127	21,1	3,4	4,5	68,5	0,46	0,02	0,38
20**	$2,2 \cdot 10^4$	187	91,5	14,5	3,0	3,8	43,0	0,46	0,01	0,29
20**	$6 \cdot 10^3$	187	66,9	13,9	1,29	2,7	15,9	1,43	0,05	0,05
15	$2,2 \cdot 10^4$	105	81,1	12,0	2,8	3,3	34,0	0,46	0,01	0,03

Примечание.  $I_1^* = 0,1 U_0 \Pi_2^{-1/4} \sqrt{C/L}$  – расчетные значения  $I_1$ ; две звездочки соответствуют режимам с токовой паузой

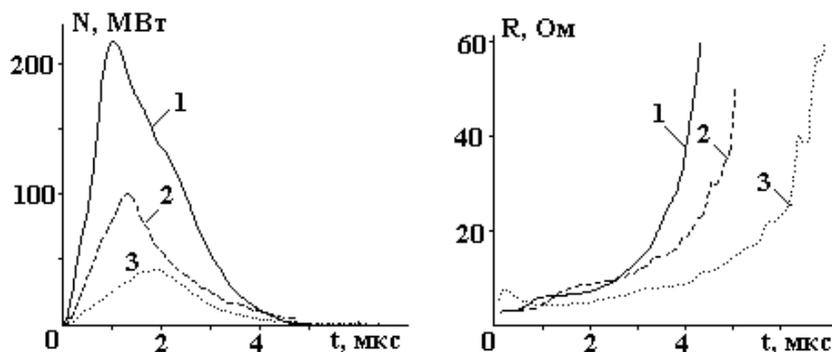


Рис. 6. Мощность (а) и сопротивление (б) ЭВ графитового проводника ( $d = 2$  мм,  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $l = 40$  мм) при изменении напряжения  $U_0$ , кВ: 1 – 40; 2 – 30; 3 – 15

Вторичный пробой наблюдался (см. рис. 5, а) при  $U_0 = 40$  кВ, а до  $U_0 \leq 30$  кВ он не возникал, и энергия, оставшаяся в конденсаторной батарее после первого импульса тока, стекала за время  $\sim 100$  мкс.

Характерной особенностью взрыва толстых проводников ( $d = 2$  мм), в отличие от ранее рассмотренных, является значительное превышение энергии  $W_s$  над  $W_0$  (в табл. 1, если  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м, то  $W_s = 7369$  Дж, а если  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м, то  $W_s = 7069$  Дж). Так, при  $U_0 = 25$  и 40 кВ отношение  $W_s/W_0$  (при  $W_s^{уд} = 2,9 \cdot 10^7$  Дж/кг) равнялось 25,2 и 9,9 соответственно. Это свидетельствует о частичном испарении графита при ЭВ.

Значения  $I_1$ ,  $N_1$  и  $W_1$  для рассмотренных проводников одного порядка, а давление  $P_m$  на один – два порядка меньше, чем для более тонких. Очевидно, при меньшем напряжении и отсутствии пика напряжения происходит лишь разрушение проводника за счет процессов локального испарения и разлета частиц, начиная с поверхности, а микродуги не успевают развиться до “обрыва” тока.

В диапазоне напряжений  $U_0$  15 – 17 кВ проводник  $d = 2$  мм либо разрушался на мелкие частицы-иголочки ( $P_m \cong 0,25$  МПа), либо ломался на 4 – 6 частей ( $P_m = 0,024$  МПа). Причем диаметр их меньше исходного и различный ( $U_0 = 17$  кВ), либо диаметр частей равен исходному ( $U_0 = 15$  кВ).

На внешней поверхности оставшихся частей проводника при  $U_0 = 17$  кВ видны продольные бороздки различной длины. Это свидетельствует о том, что процесс разрушения толстого графитового проводника начинался с испарения его поверхности неоднородно как по радиусу, так и по длине.

Снижение напряжения  $U_0$  до 10 кВ привело к стеканию заряда конденсаторной батареи в аperiодическом режиме через визуально неповрежденный проводник в течение 10 – 13 мкс с выделением основной доли энергии в первые 5 мкс. Осциллограммы  $I(t)$  и  $U(t)$  имели такой же вид, как и при  $U_0 = 15$  кВ (см. рис. 5, в), и колебательного характера осциллограмм, как при разряде по поверхности проводника, не наблюдалось.

Характерно, что при  $U_0 \leq 30$  кВ после ЭВ толстых проводников вода в камере оставалась относительно прозрачной. После ЭВ с вторичным пробоем при  $U_0 = 40$  кВ вода в рабочей камере стала черной вследствие значительного уменьшения размеров образовавшегося золя углерода.

На рис. 7 приведены фотоснимки продуктов ЭВ проводника  $d = 2$  мм, полученных при разных  $U_0$  (18 – 40 кВ) с помощью оптического микроскопа “Неофот-32” с увеличением 25.

При пороговом режиме ( $U_0 = 18$  кВ) продукты ЭВ представляли собой как мелкие, так и крупные частицы графита в основном удлиненной формы (иголочки). Увеличение напряжения  $U_0$  до 40 кВ привело к уменьшению размеров частиц в несколько раз, форма которых стала близкой к сферической. Уменьшение размеров проводника и увеличение энергии  $W_0$  ведут к еще большему измельчению продуктов взрыва.

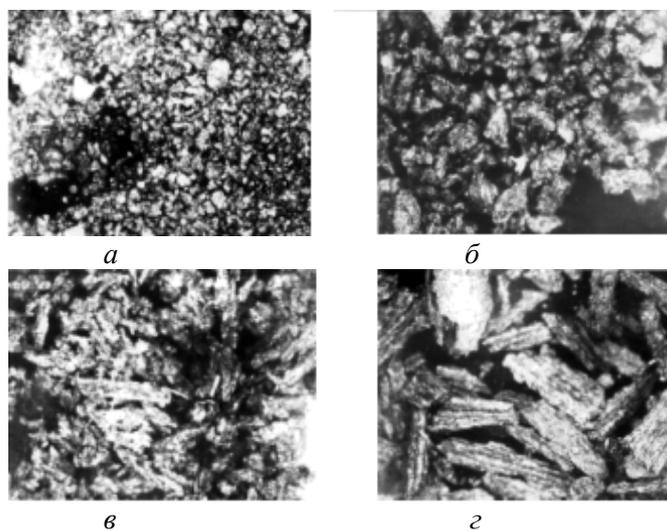


Рис. 7. Фотографии продуктов ЭВ графитовых проводников ( $d = 2$  мм,  $l = 40$  мм). Увеличение  $\times 25$ :  $C = 1$  мкФ: а –  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $U_0 = 40$  кВ; б –  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м,  $U_0 = 30$  кВ; в –  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м,  $U_0 = 30$  кВ; г –  $\sigma_0 = 6 \cdot 10^3$  См/м,  $U_0 = 18$  кВ

На рис. 5, з, д, е приведены осциллограммы ЭВ графитовых проводников  $d = 2$  мм,  $l = 25$  мм при  $C = 3$  мкФ,  $U_0 = 25$  кВ. Отличие осциллограмм (5, д) и (5, е) свидетельствует о сильной зависимости характеристик и механизма ЭВ от электропроводности  $\sigma_0$ . Чем меньше  $\sigma_0$ , тем выше  $R_0$ , меньше ток  $I_1$  и энергия  $W_1$ .

В табл. 2 приведены значения критериев  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , а также расчетные величины тока  $I_1$ . Несмотря на низкие  $\sigma_0$ , критерий  $\Pi_1$  имеет близкие значения, а критерий  $\Pi_2$  – на порядок ниже полученных для тонких проводников при  $\sigma_0 = 2 \cdot 10^5$  См/м (см. [1]). Расчетные величины тока  $I_1^*$ , в отличие от

предыдущих расчетов, получены при замене в формуле (1) экспериментального коэффициента 0,5 на 0,1. А для беспаузных режимов (см. рис. 5,  $z$ ,  $\delta$ ,  $e$ ) коэффициент в формуле (1) следует принять 0,25.

Для проводников  $d = 2$  мм,  $l = 40$  мм,  $\sigma_0 = 2,2 \cdot 10^4$  См/м, когда напряжение  $U_0$  изменялось от 20 до 40 кВ, плотность тока  $j_m$  составляла от  $0,95 \cdot 10^5$  до  $1,9 \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>. Это на 1–2 порядка ниже, чем для рассмотренных ЭВ более тонких проводников. Внешние силы МГД происхождения не играют существенной роли.

Очевидно, что толстый графитовый проводник при испарении примесей распадается на частицы, размеры которых тем меньше, чем выше энергия  $W_1$ . При этом разлету частиц из внутренних слоев проводника препятствует наличие внешних, что приводит к различной температуре слоев и размерам разлетающихся частиц.

Поперечное расслоение проводника на страты в этом случае возможно за счет взрывообразного выхода наружу паров из более прогретой центральной части проводника после предварительного частичного испарения наружных слоев.

Накопление экспериментальных данных, особенно по высокоскоростной киносъемке, позволит внести уточнения и дополнения по характеристикам и механизму ЭВ графитовых проводников.

### 5. Заключение

Получены экспериментальные данные по характеристикам и механизму ЭВ графитовых проводников диаметром от 0,3 до 2 мм с удельной электропроводностью  $\sigma_0 \geq 5 \cdot 10^3$  См/м при изменении параметров проводника и разрядного контура. Показано, что между ЭВ металлических и графитовых проводников имеется много общего. Обнаружены также существенные различия, вызванные отличием их фазовых диаграмм, теплофизических свойств, структуры и пр.

Наблюдалось изменение механизма ЭВ графитовых проводников в зависимости от начальной электропроводности, размеров проводника и параметров разрядного контура. Показана возможность расчета амплитуды разрядного тока и магнитного давления в проводнике с целью нахождения необходимых для различных применений режимов ЭВ графитовых проводников.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Иценко Ж.Н., Куприн Д.Е., Кускова Н.И.* Экспериментальные исследования характеристик и механизма электровзрыва графитовых проводников. Часть I // *Электронная обработка материалов.* 2004. № 3. С.
2. *Богуславский Л.З., Кускова Н.И., Петриченко В.Н., Хайнацкий С.А.* Электрический разряд в графите и его особенности // *Электронная обработка материалов.* 2002. № 3. С. 32 – 38.
3. *Мармер Э.Н.* Углеродистые материалы. М., 1973.
4. *Взрывающиеся проволоки* / Под ред. А.А. Рухадзе. М., 1963.
5. *Балуев А.А., Дихтер Н.Я., Зейгарник В.А.* Страты при электрическом взрыве цезиевых проволок при критических давлениях // *Журн. техн. физики.* 1978. Т. 48. Вып. 10. С. 2088 – 2096.
6. *Столович Н.Н.* Электровзрывные преобразователи энергии. Минск, 1983.
7. *Абрамова К.Б., Златин А.А., Перегуд Б.П.* МГД неустойчивости жидких и твердых проводников. Разрушение проводников электрическим током // *Журн. техн. физики.* 1975. Т. 69. Вып. 6(12). С. 2007.
8. *Гревцов Н.В., Золотухин В.Д., Кошурников Ю.М., Лятегин В.А., Махорин Б.И.* О характере вскипания меди при импульсном нагреве проходящим током // *Теплофизика высоких температур.* 1977. Т. 15. № 2. С. 362 – 369.
9. *Лебедев С.В., Савватимский А.И.* Об исчезновении электропроводности металла вследствие сильного нагревания электрическим током большой плотности // Там же. 1970. Т. 8. № 3. С. 524 – 531.
10. *Лебедев С.В.* О механизме электрического взрыва металла // Там же. 1980. Т. 18. № 2. С. 273 – 279.
11. *Шейндлин Н.А., Сенченко В.Н.* Экспериментальное исследование термодинамических свойств графита в окрестности точки плавления // *ДАН СССР.* 1988. Т. 293. № 6. С. 1383 – 1386.

*Поступила 03.11.03*

### Summary

The peculiarities are determined and the characteristics of electrical explosion (EE) of graphitic conductors from 0.3 mm to 2 mm in diameter, ranging in length from 10 mm to 40 mm are obtained at the variation of their initial electrical conductivity in the range from  $5 \cdot 10^3$  Sm/m to  $2,4 \cdot 10^5$  Sm/m and stored energies of capacitors from 12 to 940 J. On the basis of the photographs analysis of the process a mechanism of EE of such conductors, dependent on parameters of a conductor and the generator, is proposed. The possibility of calculation of the amplitude of the first current pulse as well as magnetic pressure in the conductor is shown.