

М.И. Баранов, С.В. Рудаков

## ПРИБЛИЖЕННЫЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ ПРИ ВОЗДУШНОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ВЗРЫВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА

*Приведені результати наближеного розрахунку максимальних значень температури  $T_m$ , тиску  $P_m$  і швидкості  $v_m$  розповсюдження ударної хвилі в «металевій плазмі», що утвориться при повітряному електричному вибуху (ЕВ) тонкого металевого провідника під дією великого імпульсного струму (ВІС). Показано, що при ЕВ в атмосферному повітрі тонкого мідного провідника в розрядному колі високовольтного генератора ВІС мікросекундного часового діапазону максимальні значення температури  $T_m$ , тиску  $P_m$  і швидкості  $v_m$  в локальній зоні її вибуху може досягати відповідно декількох десятків тисяч градусів кельвина, сотень технічних атмосфер і тисяч метрів в секунду. Сформульовані можливі шляхи отримання в розрядному колі потужної конденсаторної батареї високовольтного генератора ВІС «рекордних» значень температури  $T_m$ , тиску  $P_m$  і швидкості  $v_m$ . Бібл. 14.*

*Ключові слова:* потужний високовольтний генератор імпульсів струму конденсаторного типу, металевий провідник, великий імпульсний струм, електричний вибух провідника, плазма, температура, тиск, швидкість розповсюдження ударної хвилі в плазмових продуктах вибуху, розрахунок.

*Приведены результаты приближенного расчета максимальных значений температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  распространения ударной волны в «металлической плазме», образующейся при воздушном электрическом взрыве (ЭВ) тонкого металлического проводника под воздействием большого импульсного тока (БИТ). Показано, что при ЭВ в атмосферном воздухе тонкого медного проводника в разрядной цепи высоковольтного генератора БИТ микросекундного временного диапазона максимальные значения температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  в локальной зоне ее взрыва могут достигать соответственно нескольких десятков тысяч градусов кельвина, сотен технических атмосфер и тысяч метров в секунду. Сформулированы возможные пути получения в разрядной цепи мощной конденсаторной батареи высоковольтного генератора БИТ «рекордных» значений температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$ . Библ. 14.*

*Ключевые слова:* мощный высоковольтный генератор импульсов тока конденсаторного типа, металлический проводник, большой импульсный ток, электрический взрыв проводника, плазма, температура, давление, скорость распространения ударной волны в плазменных продуктах взрыва, расчет.

**Введение.** Электрический взрыв (ЭВ) тонких металлических проводников в вакууме, газовых и жидких средах под воздействием протекающего по ним большого импульсного тока (БИТ) в настоящее время достаточно широко используется [1-9]: в экспериментальной физике при изучении плазмы; в атомной технике при создании локальных зон высокого давления; в высоковольтной импульсной технике (ВИТ) при испытаниях на молниестойкость наружной и внутренней изоляции электроэнергетического оборудования; в технике БИТ при создании быстрых размыкателей сильноточных цепей; в технике мощных импульсных источников света; в электротехнологиях при получении микро- и нанопорошков для производства новых композиционных материалов; в электро-разрядных технологиях при ударной обработке жидкостей и твердых тел. Нежелательное проявление ЭВ металла может наблюдаться в области ВИТ и технике БИТ и при необоснованном выборе поперечных сечений токоведущих частей высоковольтных сильноточных цепей соответствующего оборудования. Инженерно-техническому персоналу, осуществляющему ЭВ тонких металлических проводников, как правило, в воздухе и технической воде [4, 6], при отладке требуемых режимов работы используемой ВИТ и прогнозировании разрушительных последствий для ВИТ от возможного ЭВ ее металлических проводников необходимы упрощенные и удобные в практическом применении приближенные соотношения для оперативной расчетной оценки максимальных уровней температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  распространения ударной волны в образующихся от их ЭВ

плазменных продуктах («металлической плазме»). Однако, как показывает анализ литературных источников, получению подобных расчетных соотношений в мире уделяется недостаточное внимание. В этой связи получение приближенных соотношений для оценочного количественного определения указанных параметров  $T_m$ ,  $P_m$  и  $v_m$  является актуальной прикладной научно-технической задачей как в области электрофизики, так и теплофизики.

**Целью статьи** является получение приближенных расчетных соотношений для определения максимальных значений температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  в ударной волне и скорости  $v_m$  распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного электрического взрыва металлического проводника под воздействием большого импульсного тока.

**1. Постановка задачи.** Рассмотрим расположенный в воздушной среде при нормальных атмосферных условиях тонкий металлический проводник прямоугольной или цилиндрической геометрической формы, по которому в его продольном направлении от высоковольтного импульсного источника энергии (например, от мощной заряженной малоиндуктивной конденсаторной батареи) протекает БИТ, амплитудно-временные параметры (АВП) которого достаточны для достижения в электропроводящей структуре проводника с прямоугольным или круглым поперечным сечением  $S_0$  численного значения интеграла тока  $J_k$ , являющегося критическим для исследуемого проводника. Под интегралом тока  $J_k$  будем понимать инте-

© М.И. Баранов, С.В. Рудаков

грал, определяемый во времени  $t$  выражением вида

$$J_k = \int_0^{t_k} \delta_k^2(t) dt, \text{ где } \delta_k(t) - \text{ критическая плотность им-}$$

пульсного тока в проводящем материале проводника;  $t_k$  – время наступления ЭВ проводника [3-6]. Для определенности отметим, что для медного проводника, находящегося в воздухе при комнатной температуре 20 °С, критическое значение указанного интеграла тока  $J_k$  численно составляет около  $1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$  [3]. Кроме того, следует иметь в виду, что при ЭВ металлических проводников обычно используются «быстрые» генераторы БИТ, АВП которых изменяются во времени по закону затухающей синусоиды [6, 8]. При достижении в проводнике критического значения интеграла тока  $J_k$  проводящая структура последнего будет подвергаться ЭВ, сопровождающемуся быстрым испарением и сублимацией ее материала [3-6]. Считаем, что плотность  $\delta_k(t)$  импульсного тока имеет равномерное распределение по поперечному сечению рассматриваемого проводника [4]. Принимаем, что на начальном этапе ЭВ тонкого проводника максимальные значения температуры  $T_m$  и давления  $P_m$  «металлической плазмы» равномерно распределены по поперечному сечению сублимируемого материала проводника, находящегося пока в пределах его сечения  $S_0$  [3, 4]. Полагаем, что температура  $T_m$  определяется электронной температурой плазмы, которая, в свою очередь, определяется плотностью теплового потока  $g_m$  в поперечном сечении  $S_0$  проводника. Исходный воздух, окружающий проводник до его ЭВ, и «металлическую плазму», образовавшуюся вместо твердого тела исследуемого проводника, принимаем в качестве идеальных газовых сред, удовлетворяющих классическому понятию «идеального газа» с занимаемым им ограниченным объемом [10]. Учитывая нормальные атмосферные условия до ЭВ проводника, можно воспользоваться следующими основными характеристиками для исходного воздуха [10]: давление воздуха составляет  $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ; температура воздуха была равной  $T_1 \approx 273,15 \text{ К}$ ; молярный объем воздуха составляет  $V_M \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ . Ограничимся рассмотрением квазистатического адиабатического процесса в локальной зоне вокруг электрически взрывающегося металла проводника с протекающим по нему БИТ, при котором в занимаемой этой зоной ограниченном объеме не будут происходить процессы теплообмена с окружающим проводник воздухом [3, 4]. Требуется с учетом принятых допущений в приближенном виде получить расчетные соотношения для инженерной оценки максимальных значений температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника под воздействием БИТ.

**2. Расчетная оценка максимальной температуры  $T_m$  в «металлической плазме» при воздушном ЭВ проводника.** Применяв к рассматриваемой плазме закон Стефана-Больцмана [10], для ее температуры  $T_m$  запишем следующее расчетное соотношение:

$$T_m \approx (\pi \sigma_c^{-1} g_m)^{1/4}, \quad (1)$$

где  $\sigma_c = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)^{-1}$  – постоянная Стефана-Больцмана, характеризующая равновесное тепловое излучение «металлической плазмы» в зоне ЭВ.

Для нахождения величины наибольшей плотности теплового потока  $g_m$  в «металлической плазме», образовавшейся от ЭВ проводника, воспользуемся следующим электрофизическим соотношением [11]:

$$g_m \approx \delta_{mk} U_e, \quad (2)$$

где  $\delta_{mk} \approx I_{mk}/S_0$  – амплитуда критической плотности тока в проводнике при его ЭВ;  $I_{mk}$  – амплитуда протекающего по проводнику импульсного тока в момент его ЭВ;  $U_e$  – приэлектродное падение напряжения в краевых зонах сублимируемого проводника, численно не превышающее для его основных металлов, применяемых в ВИТ и технике БИТ, значения 10 В [12].

В (2) амплитуда импульсного тока  $I_{mk}$  в сильноточной разрядной цепи высоковольтного генератора БИТ с исследуемым проводником может быть найдена из следующего приближенного выражения [8]:

$$I_{mk} \approx (2J_k S_0^2 I_m \omega)^{1/3}, \quad (3)$$

где  $I_m$  – амплитуда разрядного тока в электрической цепи генератора БИТ, изменяющегося во времени  $t$  с круговой частотой  $\omega$ , определяемой электрическими параметрами разрядного контура данного генератора.

Тогда из (1)-(3) для максимальной температуры  $T_m$  в «металлической плазме» при воздушном ЭВ тонкого металлического проводника под воздействием протекающего по нему БИТ в окончательном виде получаем следующее приближенное соотношение:

$$T_m \approx [\pi \sigma_c^{-1} U_e (2J_k S_0^2 I_m \omega)^{1/3}]^{1/4}. \quad (4)$$

Из (4) следует, что для получения «рекордных» (наибольших) температур  $T_m$  в «металлической плазме», образуемой при воздушном ЭВ проводника за счет воздействия на него БИТ, материал проводника следует выбирать с наибольшими значениями величин  $J_k$  и  $U_e$ , поперечное сечение  $S_0$  проводника требуется брать наименьшим, а амплитуду  $I_m$  и круговую частоту  $\omega$  (скорость нарастания) импульсного тока в разрядной цепи генератора БИТ – наибольшими. Вот поэтому для достижения высоких значений температуры  $T_m$  целесообразно использовать генераторы БИТ с малоиндуктивными и низкоомными разрядными цепями и короткими тонкими электрически взрывающимися проводниками, по которым протекает импульсный экспоненциально затухающий синусоидальный ток наносекундного временного диапазона.

Расчетная оценка по (4) численного значения температуры  $T_m$  «металлической плазмы» для экспериментального случая воздушного ЭВ тонкого круглого медного проводника радиусом  $r_0 \approx 0,1 \text{ мм}$  и длиной  $l_0 \approx 110 \text{ мм}$  под воздействием БИТ микросекундного временного диапазона, описанного в [8] ( $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$ ;  $U_e \approx 10 \text{ В}$ ;  $S_0 \approx 3,14 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$ ;  $I_m \approx 190 \text{ кА}$ ;  $\omega \approx 26,18 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ ), показывает, что она в рассматриваемом приближении будет примерно равной  $92,67 \cdot 10^3 \text{ К}$ . Для сравнения этой расчетной температуры  $T_m$  «металлической плазмы» с известными в мире данными в области теплофизики ЭВ металла укажем, что согласно результатам теоретических

исследований, приведенным в [13], максимальная температура взрыва в вакууме литиевого проводника ( $2r_0 \approx 0,127$  мм;  $l_0 \approx 10$  мм), включенной в разрядную цепь высоковольтного генератора БИТ с запасаемой его конденсаторами электрической энергией в 100 кДж, при времени введения в проводник тепловой энергии в 200 нс достигала численного значения около  $113,54 \cdot 10^3$  К.

Следует указать то, что в [3] приведены опытные численные значения критического интеграла тока  $J_k$ , только для алюминийевых и медных проводников. В [14] были приведены данные для расчета величины  $J_k$  для иных проводниковых материалов, используемых в ВИТ и технике БИТ при ЭВ тонких металлов, когда плотность  $\delta_k$  тока в них составляет не менее  $10^{10}$  А/м<sup>2</sup>.

**3. Расчетная оценка максимального давления  $P_m$  в «металлической плазме» при воздушном ЭВ проводника.** С учетом принятых допущений и уравнения состояния идеального газа, соответствующего уравнению Клайперона-Менделеева [10], для одного моля воздушной среды, окружающей исследуемый металлический проводник до воздействия на него БИТ, и одного моля «металлической плазмы» в воздухе после воздушного ЭВ рассматриваемого проводника можно записать следующее газовое равенство:

$$P_1 V_{M1} / T_1 = P_m V_{M2} / T_m = R, \quad (5)$$

где  $R = 8,314$  Дж/(К·моль) – универсальная газовая постоянная [10];  $V_{M2}$  – молярный объем плазменных продуктов в локальной зоне ЭВ в воздухе исследуемого проводника, вызванного действием на него БИТ.

Для определения в (5) величины  $V_{M2}$  воспользуемся следующим приближенным соотношением [10]:

$$V_{M2} \approx (M_1 + M_2) / d_2, \quad (6)$$

где  $M_1, M_2$  – соответственно молярная масса исходного воздуха и образовавшейся в нем «металлической плазмы» в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника;  $d_2$  – плотность плазменных продуктов, образовавшихся в воздушной локальной зоне после ЭВ проводника под воздействием БИТ.

Для плотности  $d_2$  плазменных продуктов после воздушного ЭВ металлического проводника в первом приближении используем соотношение вида:

$$d_2 / d_1 \approx (M_1 + M_2) / M_1, \quad (7)$$

где  $d_1 \approx 1,293$  кг/м<sup>3</sup> – плотность принятого исходного воздуха, окружающего проводник до его ЭВ [10].

Согласно (7) при воздушном ЭВ медного проводника ( $M_1 \approx d_1 \cdot V_{M1} \approx 28,97 \cdot 10^{-3}$  кг/моль;  $M_2 \approx 63,55 \cdot 10^{-3}$  кг/моль [10]) вытекает, что  $d_2 \approx 4,129$  кг/м<sup>3</sup>. Видно, что в этом случае плазменные продукты от взрыва меди лишь примерно в 3,2 раза плотнее исходного воздуха.

Из (6) и (7) для молярного объема  $V_{M2}$  плазменных продуктов после ЭВ в воздухе металлического проводника в принятом приближении получаем:

$$V_{M2} \approx M_1 / d_1 \approx V_{M1} \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}. \quad (8)$$

Учитывая (8), из (5) для искомой величины давления  $P_m$  в «металлической плазме» находим:

$$P_m = P_1 T_m / T_1. \quad (9)$$

После подстановки (4) в (9) для максимального давления  $P_m$  ударной волны в локальной зоне ЭВ в

воздухе металлического проводника, вызванного воздействием на его проводящий материал БИТ, имеем:

$$P_m \approx P_1 T_1^{-1} \left[ \pi \sigma_c^{-1} U_e (2 J_k S_0^{-1} I_m \omega)^{1/3} \right]^{1/4}. \quad (10)$$

Из (10) для указанного выше в разделе 2 случая ЭВ в воздухе ( $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5$  Па;  $T_1 \approx 273,15$  К) тонкого медного проводника микросекундным БИТ ( $r_0 \approx 0,1$  мм;  $l_0 \approx 110$  мм;  $S_0 \approx 3,14 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>;  $\sigma_c \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)<sup>-1</sup>;  $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>4</sup>;  $U_e \approx 10$  В;  $I_m \approx 190$  кА;  $\omega \approx 26,18 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>) следует, что при этом в локальной зоне ее взрыва будет возникать ударное газодинамическое давление амплитудой до  $P_m \approx 343,7 \cdot 10^5$  Па (до 339,3 атм). Согласно (9) и (10) для получения в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника наибольших значений ударного давления  $P_m$  необходимо в ней (этой зоне) создавать «рекордные» уровни абсолютной температуры  $T_m$  «металлической плазмы». Для чего требуется использовать наименьшие поперечные сечения  $S_0$  коротких проводников, а также «быстрые» генераторы БИТ, воспроизводящие наибольшие амплитуды  $I_m$  и круговые частоты  $\omega$  их разрядного тока.

**4. Расчетная оценка максимальной скорости  $v_m$  ударной волны в «металлической плазме» при воздушном ЭВ проводника.** В анализируемом электрофизическом случае выражение для максимальной скорости  $v_m$  распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника может быть представлено в виде [10]:

$$v_m \approx (\gamma_a R T_m)^{1/2}, \quad (11)$$

где  $\gamma_a$  – безразмерный показатель адиабаты.

С учетом (4) приближенное соотношение (11) для максимальной скорости  $v_m$  ударной продольной волны в «металлической плазме» от ЭВ в воздухе проводника принимает следующий окончательный вид:

$$v_m \approx (\gamma_a R)^{1/2} \left[ \pi \sigma_c^{-1} U_e (2 J_k S_0^{-1} I_m \omega)^{1/3} \right]^{1/8}. \quad (12)$$

Что касается численного значения в (11) и (12) безразмерного показателя адиабаты  $\gamma_a$ , то для равновесной теплоизлучающей системы «сильноточный плазменный канал разряда – воздух» оно оказывается примерно равным  $\gamma_a \approx 4/3$  [10]. Тогда для используемого в [8] случая воздушного ЭВ тонкого медного проводника ( $r_0 \approx 0,1$  мм;  $l_0 \approx 110$  мм;  $S_0 \approx 3,14 \cdot 10^{-8}$  м<sup>2</sup>;  $U_e \approx 10$  В;  $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17}$  А<sup>2</sup>·с·м<sup>4</sup>;  $\sigma_c \approx 5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт·(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)<sup>-1</sup>) в разрядной цепи высоковольтного генератора микросекундных БИТ ( $I_m \approx 190$  кА;  $\omega \approx 26,18 \cdot 10^3$  с<sup>-1</sup>) из (12) находим, что при этом максимальная скорость  $v_m$  ударной волны в плазменных продуктах взрыва достигает численного значения около 4020 м/с. При расчетных оценках по (11), (12) максимальных значений  $v_m$  необходимо не забывать, что по модулю 1 моль, например, для меди, согласно законам молекулярной физики численно составляет  $63,55 \cdot 10^{-3}$  кг [10] (при этом надо помнить, что размерность моля входит в универсальную газовую постоянную  $R$ ). Несоблюдение правил теории размерностей при практическом применении расчетных соотношений (11) или (12) может приводить к неправильным количественным результатам для искомой величины скорости  $v_m$ . Полученное по (12) оценочное численное значение мак-

симальной скорости  $v_m \approx 4020$  м/с ударной газодинамической волны в «металлической плазме» соответствует скорости детонационной волны в «медленных» твердых взрывчатых веществах [9, 10]. В этой связи с точки зрения возможного достижения указанных высоких скоростей  $v_m$  ударной волны в плазменных продуктах ЭВ металла представляется целесообразным использование воздушного ЭВ тонких металлических проводников в высокоэффективных электродетонаторах.

Из (12) вытекает, что для получения при ЭВ в воздухе рассматриваемых проводников «рекордных» значений скорости  $v_m$  ударной волны в «металлической плазме» необходимо использовать минимально возможные поперечные сечения  $S_0$  коротких металлических проводников, а также максимально возможные для высоковольтного генератора БИТ значения амплитуды  $I_m$  и круговой частоты  $\omega$  (скорости нарастания) его импульсного разрядного тока, изменяющегося во времени  $t$  по закону затухающей синусоиды.

#### Выводы.

1. Получены новые соотношения (4), (10) и (12) соответственно для инженерного расчета максимальных значений абсолютной температуры  $T_m$ , ударного давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  распространения ударной волны в «металлической плазме», образующейся от воздушного ЭВ металлического проводника под воздействием протекающего по нему БИТ.

2. Показано, что при ЭВ в воздухе тонких металлических проводников, включенных в разрядную цепь высоковольтного генератора БИТ микросекундного временного диапазона, максимальные расчетные значения температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  могут достигать численных значений соответственно в несколько десятков тысяч градусов кельвина, сотен технических атмосфер и тысяч метров в секунду.

3. На основе полученных расчетных соотношений (4), (10) и (12) сформулированы реальные технические предложения по получению с помощью ЭВ в атмосферном воздухе тонких металлических проводников «рекордных» (наибольших) значений температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  ударной волны в локальной зоне их взрыва под воздействием БИТ.

4. Полученные при определенных допущениях новые теоретические результаты для искомых величин температуры  $T_m$ , давления  $P_m$  и скорости  $v_m$  позволяют углубить наши физические представления в области сильноточной электрофизики и высокотемпературной теплофизики для явления воздушного ЭВ тонкого металлического проводника под воздействием БИТ нано- и микросекундной длительности.

5. Учитывая высокие расчетные значения скорости  $v_m$  ударной волны в «металлической плазме», можно сделать вывод о целесообразности прикладного применения воздушного ЭВ тонких коротких металлических проводников в высокоэффективных электродетонаторах.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.

2. Дашук П.Н., Зайенц С.Л., Комельков В.С., Кучинский Г.С., Николаевская Н.Н., Шкуропат П.И., Шнейерсон Г.А. Техника больших импульсных токов и магнитных полей. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
4. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Под ред. В.Н. Карнюшина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
5. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
7. Лернер М.И. Образование наноразмерной фазы при электрическом взрыве проводников // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – Т.49. – №6. – С. 91-95.
8. Баранов М.И., Лысенко В.О. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах // Электричество. – 2013. – №4. – С. 24-30.
9. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 40: Научное открытие метода взрывной имплозии для получения сверхкритической массы ядерного заряда и украинский «след» в американском атомном проекте «Манхэттен» // Электротехника і електромеханіка. – 2017. – №5. – С. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
10. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
11. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.
12. Райзер Ю.П. Физика газового разряда. – М.: Наука, 1987. – 592 с.
13. Роуз К. Максимальная температура взрыва проволок в вакууме / В кн. пер. с англ.: Электрический взрыв проводников. – М.: Мир, 1965. – С. 43-46.
14. Баранов М.И. Аналитический расчет критических значений интеграла тока для основных металлов, применяемых в технике больших импульсных токов при электрическом взрыве проводников // Технічна електродинаміка. – 2008. – №6. – С. 14-17.

#### REFERENCES

1. Mesiats G.A. *Impul'snaia energetika i elektronika* [Pulsed power and electronics]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 704 p. (Rus).
2. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskiy G.S., Nikolaevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. *Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej* [Technique large pulsed currents and magnetic fields]. Moscow, Atomizdat Publ., 1970. 472 p. (Rus).
3. Knopfel' G. *Sverkhstil'nye impul'snye magnitnye polia* [Ultra strong pulsed magnetic fields]. Moscow, Mir Publ., 1972. 391 p. (Rus).
4. Stolovich N.N. *Elektrovzryvnye preobrazovateli energii* [Electroexplosion energy converters]. Minsk, Nauka & Tehnika Publ., 1983. 151 p. (Rus).
5. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchynskiy A.V. *Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primenenie v elektrofizicheskikh ustanovkakh* [Electric explosion of conductors and its application in electrophysical options]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 288 p. (Rus).
6. Gulyi G.A. *Nauchnye osnovy razriadno-impul'snykh tekhnologii* [Scientific basis of the discharge-pulse technology]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1990. 208 p. (Rus).
7. Lerner M.I. Formation of nano-sizes phase at the electric explosion of explorers. *Russian Physics Journal*, 2006, vol.49, no.6, pp. 91-95.

8. Baranov M.I., Lysenko V.O. The main characteristics of an electric explosion of a metallic conductor at high impulse currents. *Electricity*, 2013, no.4, pp.24-30. (Rus).
9. Baranov M.I. An anthology of the distinguished achievements in science and technique. Part 40: The scientific opening of the method of explosive implosion for the obtaining above critical mass of nuclear charge and Ukrainian «track» in the «Manhattan» American atomic project. *Electrical engineering & electromechanics*, 2017, no.5, pp. 3-13. doi: 10.20998/2074-272X.2017.5.01.
10. Kuz'michev V.E. *Zakony i formuly fiziki* [Laws and formulas of physics]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1989. 864 p. (Rus).
11. Baranov M.I. *Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 2, Kn. 1: Teorija elektrofizicheskikh effektov i zadach* [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 2 vols. Vol. 2, book. 1: Theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkov, NTU «KhPI» Publ., 2009. 384 p. (Rus).
12. Raiser Yu.P. *Fizika gazovogo razryada* [Physics of gas discharge]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 592 p. (Rus).
13. Rose K. *Maksimal'naya temperatura vzryva provolochek v vakuume / V kn. per. s angl.: Elektricheskiy vzryv provodnikov* [The maximum temperature of a wire explosion in a vacuum / In book trans. with English: Electric explosion of conductors]. Moscow, Mir Publ., 1965, pp. 43-46. (Rus).
14. Baranov M.I. Analytical calculation of critical values of integral of current for parent metals, applied in the technique of large impulsive currents at the electric explosion of explorers. *Technical Electrodynamics*, 2008, no.6, pp. 14-17. (Rus).

Поступила (received) 11.09.2017

Баранов Михаил Иванович<sup>1</sup>, д.т.н., гл.н.с.,  
Рудаков Сергей Валерьевич<sup>2</sup>, к.т.н., доц.,  
<sup>1</sup> НИПКИ «Молния»

Национальный технический университет  
«Харьковский политехнический институт»,  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone +38 057 7076841,  
e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua

<sup>2</sup> Национальный университет гражданской защиты Украины,  
61023, Харьков, ул. Чернышевского, 94,  
тел/phone +38 057 7073438,  
e-mail: serg\_73@i.ua

M.I. Baranov<sup>1</sup>, S.V. Rudakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute «Molniya»,  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine.

<sup>2</sup> National University of Civil Protection of Ukraine,  
94, Chernyshevska Str., Kharkiv, 61023, Ukraine.

#### Approximate calculation of basic characteristics of plasma at the air electric explosion of metal conductor.

**Purpose.** Obtaining approximate calculation correlations for determination of maximal values of temperature  $T_m$  and pressures  $P_m$  at a shock wave and speed  $v_m$  distribution of a shock wave in the plasma products of air electric explosion (EE) of metal conductor under act of large impulsive current (LIC). **Methodology.** Theoretical bases of the electrical engineering, scientific and technical bases of electrophysics, thermal physics and electrophysics bases of powerful high-voltage impulse technique, related to the theory and practice of the phenomenon EE metallic explorer in gas environments under action of LIC. **Results.** New calculation correlations are got for approximate calculation in a local area of EE in atmospheric air of metallic explorer of maximal values of temperature  $T_m$ , pressures  $P_m$  and speeds of  $v_m$  of shock wave in «metallic plasma» appearing from an explosion under action of LIC of its conducting structure. It is set that numeral values of the sought after sizes of temperature  $T_m$ , pressures  $P_m$  and speeds  $v_m$  as it applies to air EE thin copper conductor under the action of LIC of the microsecond temporal range can arrive at a few ten of thousands of Kelvin, hundreds of technical atmospheres and thousands of meters in a second accordingly. It is shown that similar values of speed  $v_m$  of shock wave in «metallic plasma» are comparable at speed of detonation wave in hard explosives. An accent is in this connection done on expedience of application air EE thin short metallic conductors at injury of live ammunitions with an ordinary and nuclear explosive. The real technical suggestions are offered on a possible receipt in the discharge circuit of powerful high-voltage generator of LIC of condenser type of «record» (most) values of the examined descriptions of «metallic plasma» at air EE thin metallic conductors. Comparison of the obtained results is executed for the probed descriptions of plasma at air EE of the metal conductor with known in the world information in area of electrophysics and thermal physics EE metal in gas environments. **Originality.** The obtained new theoretical results in area of high-current electrophysics and high-temperature thermal physics extend our physical views about the phenomenon of EE in atmospheric air of thin metallic conductors under action of LIC of the nanosecond and microsecond duration. **Practical value.** Application of the calculation correlations obtained in practice for the indicated descriptions of «metallic plasma» will allow technicians-and-engineers in a certain measure to accelerate and improve adjusting of difficult electric charts of powerful high-voltage generator of LIC at a receipt in his discharge circuit by air EE of thin metal conductors required on protocol of lead through of heavy-current electrophysics experiments of parameters of plasma in the local zone of its explosion. References 14.

**Key words:** powerful high-voltage generator of current pulses of condenser type, metallic conductor, high pulse current, electric explosion of conductor, plasma, temperature, pressure, speed of distribution of shock wave in the plasma products of explosion, calculation.