

УДК 621.3.015.52 : 621.3.022

**М.И. БАРАНОВ****РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ОСНОВНЫХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ В ЛОКАЛЬНОЙ ЗОНЕ ВОЗДУШНОГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВЗРЫВА МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПРОВОДНИКА ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ БОЛЬШОГО ИМПУЛЬСНОГО ТОКА**

Приведені результати наближеного визначення амплітуди  $P_{mB}$  плазмодинамічного тиску, мінімальної середньооб'ємної температури  $T_{mB}$  і мінімальної швидкості  $v_{mB}$  ударної хвилі в локальній зоні повітряного електричного вибуху (ЕВ) металевого провідника під дією великого імпульсного струму (ВІС). Розрахункова оцінка чисельних значень  $P_{mB}$ ,  $T_{mB}$  і  $v_{mB}$  по запропонованим формулам вказує на те, що при повітряному ЕВ металевого провідника з ВІС в локальній зоні подібного вибуху може виникати тиск в десятки і сотні атмосфер, температура плазмових продуктів від вибуху може досягати десятків тисяч градусів кельвіна, а швидкість ударної хвилі в плазмових продуктах ЕВ металу може наближатися до швидкостей детонаційної хвилі в газових і твердих вибухових речовинах.

**Ключові слова:** великий імпульсний струм, металевий провідник, повітряний електричний вибух провідника, тиск, температура і швидкість ударної хвилі в плазмових продуктах електричного вибуху, розрахункова оцінка параметрів електричного вибуху.

Приведены результаты приближенного определения амплитуды  $P_{mB}$  плазмодинамического давления, минимальной средней температуры  $T_{mB}$  и минимальной скорости  $v_{mB}$  ударной волны в локальной зоне воздушного электрического взрыва (ЭВ) металлического проводника под воздействием большого импульсного тока (БИТ). Расчетная оценка численных значений  $P_{mB}$ ,  $T_{mB}$  и  $v_{mB}$  по предложенным формулам указывает на то, что при воздушном ЭВ металлического проводника с БИТ в локальной зоне подобного взрыва могут возникать давления в десятки и сотни атмосфер, температура плазменных продуктов от взрыва может достигать десятков тысяч градусов кельвина, а скорость ударной волны в плазменных продуктах ЭВ металла может приближаться к скоростям детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах.

**Ключевые слова:** большой импульсный ток, металлический проводник, воздушный электрический взрыв проводника, давление, температура и скорость ударной волны в плазменных продуктах электрического взрыва, расчетная оценка параметров электрического взрыва.

The results of approximate estimation of the amplitude  $P_{mB}$  of plasma dynamic pressure, minimal average volume temperature  $T_{mB}$  and minimal velocity  $v_{mB}$  of shock wave in the local zone of air electric explosion (EE) of metallic conductor under the influence of high pulsed current (HPC) are presented. The calculation estimation of the numerical values of  $P_{mB}$ ,  $T_{mB}$  and  $v_{mB}$  by the proposed formulae indicates that pressures of tens and hundreds of atmospheres can arise as a result of EE of metallic conductor with HPC in the local zone of such explosion, the temperature of plasma products of such explosion can reach tens of thousands of Kelvin's, and shock wave velocity in the plasma products of EE of the metal can approach the velocities of detonation wave in gaseous and solid explosives.

**Key words:** large impulsive current, metallic explorer, air electric explosion of explorer, pressure, temperature and speed of shock wave, is in the plasma products of electric explosion, calculation estimation of parameters of electric explosion.

**Введение.** Явление электрического взрыва (ЭВ) металлического проводника под воздействием большого импульсного тока (БИТ) нашло достаточно широкое практическое применение в экспериментальной физике, атомной технике при подрыве зарядов боеголовок ядерного и термоядерного оружия (в устройствах их синхронно срабатывающих с высокой точностью электродетонаторов обычных твердых взрывчатых веществ, обжимающих подкритическую массу ядерного заряда с целью получения из нее сверхкритической массы и подрыва заряда), прикладной электрофизике (при изучении свойств плазмы, образовавшейся при ЭВ металла), технике высоких напряжений (в схемах испытаний на молниестойкость некоторых видов высоковольтной изоляции, включая деревянные конструкции) и технике БИТ (в качестве быстрых размыкателей силовых цепей), технике мощных источников света и ряде современных электротехнологий по получению микро- и нанопорошков для создания новых композиционных материалов и в высокоскоростной ударной обработке жидких и твердых сред [1-9]. Научному и инженерно-техническому персоналу, осуществляющему ЭВ металлических проволочек

(наиболее часто в воздухе и воде), необходимы приближенные формулы для оперативной расчетной оценки таких параметров в локальной зоне рассматриваемого взрыва, как [4,5]: амплитуды  $P_{mB}$  плазмодинамического давления, минимальной температуры  $T_{mB}$  и минимальной скорости  $v_{mB}$  распространения ударной волны в плазменных продуктах («металлической плазме») их ЭВ. Кроме того, укажем, что подобная техническая информация необходима и специалистам, занимающимся испытаниями объектов аэрокосмической техники и энергетики на стойкость к воздействию на них импульсного тока молнии, амплитудно-временные параметры (АВП) которого могут характеризоваться амплитудами до  $\pm 220$  кА и длительностями его протекания до 1000 мс [8]. В используемых при этом высоковольтных испытательных схемах могут оказаться «узкие» проводящие места, которые являются потенциально опасными для ЭВ. В этой связи получение расчетных соотношений для приближенного определения указанных параметров  $P_{mB}$ ,  $T_{mB}$  и  $v_{mB}$  является актуальной прикладной научно-технической задачей.

**Целью статьи** является получение приближенных расчетных соотношений для определения амплитуды  $P_{mB}$  давления ударной волны, минимальной температуры  $T_{mB}$  и минимальной скорости  $v_{mB}$  распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника под воздействием БИТ.

**1. Постановка прикладной задачи.** Рассмотрим тонкий металлический проводник плоской или цилиндрической геометрической формы, по которому в его продольном направлении от высоковольтного импульсного источника энергии (например, от мощной предварительно заряженной конденсаторной батареи) протекает БИТ, АВП которого достаточны для достижения в электропроводящей структуре проводника численного значения интеграла тока  $J_k$ , являющегося критическим для исследуемого проводника с тем или иным видом его материала. Например, для медного проводника, находящегося в воздухе при комнатной

температуре 20 °С, величина  $J_k = \int_0^{t_k} \delta^2(t) dt$ , где  $\delta(t)$  –

плотность тока в проводнике, а  $t_k$  – момент времени наступления ЭВ проводника, численно составляет около  $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17} \text{ A}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$  [3]. При достижении в материале проводника указанного значения  $J_k$  его проводящая структура с температурой не менее температуры ее кипения  $T_k$  (например, для меди  $T_k \approx 2590$  °С [10]) будет подвергаться быстрому испарению и сублимации. В локальной зоне ЭВ проводника будут образовываться мелкодисперсные плазменные продукты такого взрыва с превалирующей вначале для них электронной температурой  $T_e$ , генерирующие фронт ударной волны в воздухе, окружающем проводник. Считаем, что в возникающем ионизированном квазинейтральном газе («металлической плазме»), состоящем из «электронного газа» и «ионного газа», за характерное время длительности протекания по проводнику тока (например, до 500 мкс для импульсной А-компоненты тока искусственной молнии, формируемой генератором тока молнии [8,11]) наступает равновесное состояние, при котором электронная температура  $T_e$  приближается к ионной  $T_i$ . (плазма становится практически изотермической) В рассматриваемом нами приближении исходный воздух 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 [12]. Полагаем, что до протекания по рассматриваемому проводнику БИТ окружающий его воздух находился в нормальном состоянии и имел следующие характеристики [12]: давление воздуха составляло  $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5$  Па; температура воздуха была равной  $T_1 \approx 273,15$  К; молярный объем воздуха составлял  $V_{M1} \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ . Ограничимся рассмотрением квазистатического адиабатического процесса в рассматриваемой локальной зоне металлического проводника с протекающим по нему БИТ, при котором в занимаемой ею (зоной) ограниченном объеме  $V_0$  не будут происходить процессы теплообмена с

окружающей проводник воздушной средой.

Требуется с учетом принятых допущений в приближенном виде получить расчетные соотношения для инженерной оценки амплитуды  $P_{mB}$  плазмодинамического давления, минимальной температуры  $T_{mB}$  и минимальной скорости  $v_{mB}$  распространения ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ металлического проводника под действием протекающего по нему БИТ, обеспечивающего достижение в его электропроводящей структуре критического значения интеграла тока  $J_k$ .

**2. Расчетная оценка амплитуды  $P_{mB}$  плазмодинамического давления в продуктах ЭВ проводника.** На основании принятых допущений и уравнения состояния идеального газа, соответствующего уравнению Клайперона-Менделеева [12], для одного моля воздушной среды, окружающей исследуемый проводник до воздействия на него БИТ, и одного моля «металлической плазмы» после воздушного ЭВ данного проводника можно записать следующее газовое равенство:

$$P_1 V_{M1} / T_1 = P_2 V_{M2} / T_2 = R, \quad (1)$$

где  $P_2$ ,  $T_2$  и  $V_{M2}$  – соответственно давление, абсолютная температура и молярный объем плазменных продуктов в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника, вызванного действием на него БИТ;  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{К} \cdot \text{моль})$  – универсальная газовая постоянная [10].

В (1) для левой части приведенного равенства такие ее параметры как  $P_1$ ,  $T_1$  и  $V_{M1}$  являются исходными с заданными численными значениями. Пока неизвестными для нас параметрами в (1) являются  $P_2$ ,  $T_2$  и  $V_{M2}$ . Именно величина  $P_2$  из (1) и будет определять максимальное значение (амплитуду)  $P_{mB}$  плазмодинамического давления, возникающего в локальной зоне ЭВ принятого нами металлического проводника. Прежде чем записывать на основе (1) аналитическое соотношение для определения параметра  $P_2 = P_{mB}$ , остановимся на расчетной оценке параметра  $V_{M2}$ , входящего в равенство (1).

Согласно [12] под параметром  $V_{M2}$ , определяющим объем одного моля «металлической плазмы» после воздушного ЭВ металлического проводника, понимается величина, рассчитываемая по следующему выражению:

$$V_{M2} = (M_2 + M_1) / d_2, \quad (2)$$

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

Молярную массу  $M_2$ , имеющую в системе СИ размерность кг/моль [12], для лучшего понимания читателем положений молекулярной физики и наглядности найдем для случая, связанного с воздушным ЭВ тонкого медного проводника. В этом случае величину  $M_2$  будут определять не- и ионизированные атомы меди  ${}_{29}^{63}\text{Cu}$  (влиянием «электронного газа» в «металлической плазме» на искомую величину  $M_2$  в рассматриваемом приближении можно пренебречь). Тогда для  $M_2$  можно записать [12]:

$$M_2 \approx 63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Величина молярной массы  $M_1 \approx V_{M1} \cdot d_1$  для исходного воздуха в исследуемом случае будет численно примерно равной

$$M_1 \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль} \cdot 1,293 \text{ кг/м}^3 \approx \\ \approx 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.}$$

Что касается плотности  $d_2$  «металлической плазмы» в (2), имеющей в системе СИ размерность  $\text{кг/м}^3$ , то ее определение выполним сравнительным путем по отношению к плотности  $d_1$  окружающего проводник исходного воздуха, численно равной при нормальных атмосферных условиях  $d_1 \approx 1,293 \text{ кг/м}^3$  [10]. Для исследуемых плотностей идеальных газов ( $d_1$  и  $d_2$ ) и их молярных масс ( $M_1$  и  $M_2$ ) в локальной зоне воздушного ЭВ металлического провода с учетом закона Дальтона для смеси идеальных газов будет справедливо соотношение [12]:

$$d_2 / d_1 \approx (M_2 + M_1) / M_1. \quad (3)$$

В результате из (3) для электрически взрывающегося под воздействием БИТ медного проводника получаем, что

$$d_2 \approx 1,293 \text{ кг/м}^3 \cdot (63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} + \\ + 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}) \cdot (28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль})^{-1} \approx \\ \approx 4,129 \text{ кг/м}^3.$$

Приведенные количественные данные впервые наглядным физико-химическим путем показывают, что «металлическая плазма», образовавшаяся от воздушного ЭВ тонкого медного проводника, всего примерно в 3,2 раза плотнее исходного воздуха, окружающего при нормальных атмосферных условиях проводник до его ЭВ. В результате из (2) при  $d_2 \approx 4,129 \text{ кг/м}^3$  следует, что величина молярного объема  $V_{M2}$  «металлической плазмы» принимает численное значение, равное

$$V_{M2} \approx (63,55 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} + 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}) \cdot \\ \cdot (4,129 \text{ кг/м}^3)^{-1} \approx 22,41 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль.}$$

Видно, что полученное на основе законов идеального газа численное значение молярного объема  $V_{M2}$  для «металлической плазмы» равно классическому численному значению молярного объема  $V_{M1}$  для исходного воздуха.

С учетом полученного достаточно простым и наглядным физико-химическим путем равенства  $V_{M2} \approx V_{M1}$  из (1) для искомой величины амплитуды  $P_2 = P_{mB}$  плазмосинопического давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника с БИТ получаем:

$$P_{mB} = P_1 T_2 / T_1. \quad (4)$$

Из (4) явствует, что при известных исходных данных для параметров воздушной среды  $P_1$  и  $T_1$  для нахождения количественного амплитудного значения возникающего ударного давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника необходимо знать уровень абсолютной температуры  $T_2$  в плазменных продуктах, возникающих после сублимации проводника.

**3. Расчетная оценка минимальной температуры  $T_{mB}$  в плазменных продуктах ЭВ проводника.** Для нахождения абсолютной минимальной среднеобъемной температуры  $T_{mB} = T_2$  «металлической плазмы» воздушного ЭВ металлического проводника с БИТ воспользуемся следующим приближенным соотношением [13]:

$$T_{mB} \approx [J_k (1 + \Delta T_k c_0 \beta_0)] / (c_0 \gamma_0) + 273,15, \quad (5)$$

где  $\Delta T_k = (T_k - T_1)$  – минимальное критическое превы-

шение температуры материала проводника с БИТ;  $T_k$  – температура кипения материала проводника [12];  $c_0$  – удельная теплоемкость материала проводника, отнесенная к единице его объема, до протекания по нему БИТ [3];  $\beta_0$  – тепловой коэффициент удельной электропроводности материала проводника до воздействия на него БИТ [3];  $\gamma_0$  – удельная электропроводность материала проводника до протекания по нему БИТ [3].

Расчетная оценка по (5) значения абсолютной температуры  $T_{mB} = T_2$  «металлической плазмы» при ЭВ медного проводника ( $\gamma_0 \approx 5,81 \cdot 10^7 \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$ ;  $c_0 \approx 3,92 \cdot 10^6 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{°C})$ ;  $\beta_0 \approx 1,31 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Дж}$ ;  $T_k \approx 2590 \text{ °C}$ ;  $T_1 \approx 0 \text{ °C}$ ;  $J_k \approx 1,95 \cdot 10^{17} \text{ А}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{м}^{-4}$  [3]) показывает, что она численно достигает уровня 12517 К. Полученное по (5) расчетное значение абсолютной минимальной среднеобъемной температуры  $T_{mB}$  для плазменных продуктов при воздушном ЭВ тонкого медного проводника удовлетворительно согласуется с результатами высоковольтных силовых экспериментов, приведенными в [4,14]. Следует напомнить читателю о том, что в [3] приведены опытные численные значения критического интеграла тока  $J_k$ , только для алюминиевых и медных проводников. Автором в [15] были приведены данные для расчета величины  $J_k$  для иных проводниковых материалов, используемых в технике БИТ при ЭВ тонких металлов, когда плотность  $\delta$  тока в них составляет  $\delta \geq 10^{10} \text{ А/м}^2$ .

Используя полученные выше оценочные численные данные расчетов по (5) температуры  $T_{mB} = T_2$  для «металлической плазмы» при воздушном ЭВ тонкого медного проводника, из (4) при  $P_1 \approx 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (примерно 1 атм),  $T_1 \approx 273,15 \text{ К}$  (около 0 °C) и  $T_2 \approx 12517 \text{ К}$  находим, что амплитуда ударного давления  $P_{mB}$  в локальной зоне электрически взрывающегося в воздухе «голого» проводника из меди достигает численного значения, равного около  $46,42 \cdot 10^5 \text{ Па}$  (примерно 45,82 атм). Обращаем внимание читателя на то, что при оценке уровня ударного давления  $P_{mB}$  нами было использовано лишь минимальное значение температуры  $T_{mB}$  плазмы. Имеются результаты теоретических исследований, свидетельствующие о том, что значения температуры «металлической плазмы» при ЭВ в вакууме тонкой литиевой проволоки (диаметром 0,127 мм и длиной 10 мм) в силовых цепи генератора наносекундных импульсов тока с запаасаемой в конденсаторной батарее электрической энергией в 100 кДж могут достигать «рекордных» уровней, составляющих около 113543 К [13]. В этой связи максимальные значения температуры «металлической плазмы» при ЭВ металлической проволоки могут на порядок превышать значения  $T_{mB}$  по (5). При этом согласно (4) соответственно возрастут на порядок и уровни ударного давления  $P_{mB}$  в плазме от ЭВ.

**4. Расчетная оценка минимальной скорости  $v_{mB}$  распространения ударной волны в плазменных продуктах ЭВ проводника.** В рассматриваемом здесь идеальном газе (как в исходном окружающем проводник до протекания по нему БИТ воздухе, так и в «металлической плазме» после ЭВ проводника под действием БИТ) с учетом распространяющихся в нем продольных удар-

ных волн, приводящих к возникновению в этом газе пространственных уплотнений и разрежений, минимальная скорость  $v_{mB}$  распространения подобных волн может быть оценена по следующему выражению [12]:

$$v_{mB} \approx (\gamma_a R T_{mB})^{1/2}, \quad (6)$$

где  $\gamma_a$  – безразмерный показатель адиабаты.

Из (6) видно, что при известном значении универсальной газовой постоянной  $R$  и найденном по (5) значении абсолютной минимальной температуры  $T_{mB}$  в плазменных продуктах после воздушного ЭВ металлического проводника определение искомого значения минимальной скорости  $v_{mB}$  ударной волны в «металлической плазме» будет сводиться к уточнению в рамках теории термодинамики численного значения показателя адиабаты  $\gamma_a$ . Согласно [12] безразмерная величина  $\gamma_a$ , определяющая в определенной мере протекание равновесных термодинамических процессов в идеальном газе, в общем случае является сложной функцией, зависящей от давления  $P_{mB}$ , объема  $V_0$  и температуры  $T_{mB}$ . В рассматриваемом нами грубом приближении для оценочных расчетов скорости  $v_{mB}$  ударной волны в плазменных продуктах от воздушного ЭВ проводника можно ограничиться численным значением указанного показателя адиабаты, равным примерно  $\gamma_a \approx 1$  [12].

Тогда из (6) для медного взрывающегося под воздействием БИТ тонкого проводника при  $\gamma_a \approx 1$ ,  $R = 8,314$  Дж/(К·моль) и  $T_{mB} \approx 12517$  К с учетом того, что в рассматриваемом случае модуль  $|1 \text{ моль}| \approx 63,55 \cdot 10^{-3}$  кг получаем, что минимальная скорость  $v_{mB}$  распространения в «металлической плазме» ударной волны будет численно составлять около 1279,7 м/с. Данное численное значение скорости  $v_{mB}$  ударной волны в образовавшейся за счет ЭВ плазме будет превышать скорость звука в воздухе при нормальных атмосферных условиях, равную  $v_B \approx 331,6$  м/с [12], примерно в 3,8 раза. Укажем, что такие численные значения скорости  $v_{mB}$  ударной волны в плазменных продуктах ЭВ тонкого металла становятся соизмеримыми со скоростями детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах [9,10]. Кроме того, отметим, что полученное по (6) расчетное численное значение скорости  $v_{mB} \approx 1279,7$  м/с ударной волны в плазменных продуктах воздушного ЭВ тонкой меди при его сравнении с экспериментально определенным численным значением скорости звука  $v_B \approx 331,6$  м/с в исходном воздухе (при показателе ее увеличения примерно в 3,8 раза) удовлетворительно согласуется (в пределах расхождения до 16 %) со степенью увеличения (примерно в 3,2 раза) плотности  $d_2$  «металлической плазмы» по отношению к плотности  $d_1$  исходного воздуха, окружающего при нормальных атмосферных условиях исследуемый металлический проводник. К этому следует добавить то одно общее физическое положение, что чем плотнее среда, тем в ней выше скорость распространения продольных (звуковых) волн [10,12].

**Выводы.** 1. На основании классических положений электрофизики, молекулярной физики, теплофизики, физики плазмы, механики и термодинамики предложены приближенные соотношения (4), (5) и (6) соответственно для оценочных расчетов амплитуды  $P_{mB}$  плазмодинамического давления, минимальной

температуры  $T_{mB}$  и минимальной скорости  $v_{mB}$  распространения ударной волны в «металлической плазме» при воздушном ЭВ металлического проводника, испытывающего в высоковольтной силовоточной разрядной цепи мощного генератора импульсных токов воздействие БИТ.

2. С учетом закономерностей идеального газа в первом приближении впервые расчетным путем показано, что плотность «металлической плазмы», возникающей при воздушном ЭВ медного проводника, лишь примерно в 3,2 раза превышает плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, окружающего исследуемый металлический проводник с БИТ до его ЭВ.

3. Амплитуда  $P_{mB}$  плазмодинамического давления в локальной зоне воздушного ЭВ металлического проводника может численно составлять десятки и сотни атмосфер, приводящих к возможному механическому разрушению или повреждению расположенных вблизи него элементов конструкций электроустановки.

4. Абсолютная минимальная среднеобъемная температура  $T_{mB}$  «металлической плазмы» в локальной зоне воздушного ЭВ тонкого металлического проводника под воздействием БИТ достигает численных значений в десятки тысяч градусов кельвина.

5. Минимальная скорость  $v_{mB}$  ударной волны в «металлической плазме» при воздушном ЭВ тонкого металлического проводника из-за действия на него БИТ может принимать численные значения в несколько тысяч метров в секунду, соизмеримые со скоростями детонационной волны в газовых и твердых взрывчатых веществах. Данный результат может указывать на целесообразность применения воздушного ЭВ тонкой металлической проволочки в электродетонаторах, предназначенных для синхронного подрыва боезарядов различных конструкций с обычной и ядерной взрывчаткой.

#### Список литературы:

1. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника / Г.А.Месяц. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
2. Даиук П.Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н.Даиук, С.Л.Зайенц, В.С.Комельков, Г.С.Кучинский, Н.Н.Николаевская, П.И.Шкуронат, Г.А. Шнейерсон. Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
3. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г.Кнопфель. Пер. с англ. Ф.А. Николаева, Ю.П. Свириденко. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
4. Столович Н.Н. Электровзрывные преобразователи энергии / Н.Н.Столович. Под ред. В.Н. Карношина. – Минск: Наука и техника, 1983. – 151 с.
5. Бурцев В.А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В.А.Бурцев, Н.В.Калинин, А.В.Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
6. Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий / Г.А.Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.
7. Лернер М.И. Образование наноразмерной фазы при электрическом взрыве проводников / М.И.Лернер // Известия ВУЗов. Физика. – 2006. – Том 49, № 6. – С. 91–95.
8. Баранов М.И. Основные характеристики электрического взрыва металлического проводника при больших импульсных токах / М.И.Баранов, В.О. Лысенко // 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» / М.И. Баранов // Электротехніка і

електромеханіка. – 2017. – № 5. – С.3–13.

10. Кухлинг Х. Справочник по физике / Х. Кухлинг. Пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. – М.: Мир, 1982. – 520 с.

11. Baranov M.I. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects / M.I. Baranov, G.M. Koliushko, V.I. Kravchenko, O.S. Nedzel'skii, V.N. Dnyshchenko // Instruments and Experimental Techniques. – 2008. – Vol. 51, № 3. – PP. 401–405.

12. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / В.Е. Кузьмичев. Отв. ред. В.К. Тартаковский. – К.: Наукова думка, 1989. – 864 с.

13. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики. Монография в 3 томах. Том 2, Кн. 1: Теория электрофизических эффектов и задач / М.И. Баранов. – Х.: НТУ «ХПИ», 2009. – 384 с.

14. Ильин Г.Г. Определение температуры и других параметров плазмы взрывающейся проволоки по самообращенным спектральным линиям и спектрам поглощения / Г.Г. Ильин, Э.М. Нурматов, И.С. Фишман // Теплофизика высоких температур. – 1975. – Т. 13, № 2. – С. 288–294.

15. Баранов М.И. Аналитический расчет критических значений интеграла тока для основных металлов, применяемых в технике больших импульсных токов при электрическом взрыве проводников / М.И. Баранов // Технічна електродинаміка. – 2008. – № 6. – С. 14–17.

#### Bibliography (transliterated):

1. Mesyats G.A. Impul'snaya energetika i elektronika [Pulsed power and elektronika]. Moscow, Publ. Nauka, 2004, 704 p.

2. Dashuk P.N., Zayents S.L., Komel'kov V.S., Kuchinskii G.S., Nikolayevskaya N.N., Shkuropat P.I., Shneerson G.A. Tehnika bol'shikh impul'snykh tokov i magnitnykh polej. Pod red. V.S. Komel'kova [The technique of large pulsed currents and magnetic fields. Under ed. V.S. Komel'kov]. Moscow, Publ. Atomizdat, 1970, 472 p.

3. Knopfel H. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Per. s eng. Ph.A. Nikolaeva, Yu.P. Sviridenko [Superstrong pulsed magnetic fields. Trans. from eng. Ph.A. Nikolaev, Yu.P. Sviridenko]. Moscow, Publ. Mir, 1972, 391 p.

4. Stolovich N.N. Elektrovzryvnye preobrazovateli energii [The electro-explosive transformers of energy. Under ed. V.N. Karnyushin]. Minsk, Science and technique, 1983, 151 p.

5. Burtsev V.A., Kalinin N.V., Luchinskiy A.V. Elektricheskiy vzryv provodnikov i ego primeneniye v elektrofizicheskikh ustanovkakh [The electric explosion of explorers and his application in electrophysics options]. Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1990, 288 p.

6. Guliy G.A. Nauchnye osnovy razrjadno-impul'snykh tehnologiy [Scientific foundations of discharge-impulse technologies]. Kiev, Publ. Naukova dumka, 1990, 208 p.

7. Lerner M.I. Obrazovanie nanorazmernoy phazy pri elektricheskom vzryve provodnikov [Formation of nano-sizes phase

at the electric explosion of explorers]. Izvestiya VUZov. Fizika-Information of Institutes of higher. Physics, 2006, Vol. 49, No. 6, pp.91–95.

8. Baranov M.I., Lysenko V.O. Osnovnye karakteristiki elektricheskogo vzryva metalicheskogo provodnika pri bol'shikh impul'snykh tokah [Basic descriptions of electric explosion of metallic exploder at large impulsive currents]. Elektrichestvo–Electricity, 2013, No. 4, pp.24–30.

9. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnikе. Chast' 40: Nauchnoe otkrytie metoda vzryvnoy implozii dlja poluchenija sverhkriticheskoy massy jadernogo zarjada i ukrainskij «sled» v amerikanskom atomnom proekte «Manhjetten» [Anthology of outstanding achievements in science and technique. Part 40: Scientific discovery of the explosive implosion method for obtaining a supercritical mass of a nuclear charge and the Ukrainian "trace" in the American atomic project «Manhattan»]. Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics, 2017, No. 5, pp.3–13.

10. Kuhling H. Spravochnik po fizike: Per. s nem. pod red. E.M. Lejkina [Handbook of physics: Trans. with it. ed. E.M. Leykin]. Moscow, Publ. Mir, 1982, 520 p.

11. Baranov M.I., Koliushko G.M., Kravchenko V.I., Nedzel'skii O.S., Dnyshchenko V.N. A Current Generator of the Artificial Lightning for Full-Scale Tests of Engineering Objects. Instruments and Experimental Techniques, 2008, Vol. 51, No. 3, pp. 401–405.

12. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki. Отв. ред. В.К. Тартаковский [The laws and formulas of physics. Editor. Ed. V.K. Tartakovskiy]. Kiev, Publ. Naukova dumka, 1989, 864 p.

13. Baranov M.I. Izbrannye voprosy elektrofiziki: Monografija v 3 tomah. Tom 2, Kn. 1: Teorija elektrofizicheskikh efektov i zadach [Selected topics of Electrophysics: Monograph in 3 Volume. Vol. 2, Book 1: The theory of electrophysics effects and tasks]. Kharkiv, Publ. NTU "KhPI", 2009, 384 p.

14. Il'in G.G., Nurmatov E.M., Fishman I.S. Opredeleniye temperatury i drugih parametrov plazmy vzryvayushcheysya provolochki po samoobrashchennym spektral'nym liniyam i spektram pogloshcheniya [Determination of temperature and other parameters of plasma of bursting delay on the automatically turned spectral lines and spectrums of absorption]. Teplofizika vysokikh temperatur – Thermophysics of high temperatures, 1975, Vol. 13, No. 2, pp.288-294.

15. Baranov M.I. Analiticheskiy raschet kpiticheskikh znacheniy integrala toka osnovnykh metallov, primenyaemykh v tehnikе bol'shikh impul'snykh tokov pri elektricheskom vzryve provodnikov [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]. Tekhnichna elektrodinamika – Technical electrodyamics, 2008, No. 6, pp.14–17.

Поступила (received) 14.08.2017

#### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Розрахункова оцінка основних фізико-технічних характеристик плазми в локальній зоні повітряного електричного вибуху металевого провідника під дією великого імпульсного струму / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Расчетная оценка основных физико-технических характеристик плазмы в локальной зоне воздушного электрического взрыва металлического проводника под воздействием большого импульсного тока / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

Calculation estimation of the main physical and technical characteristics in local zone of air electrical explosion of metallic conductor under the influence of high pulsed current / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2017. – № 38 (1260). – С. 5-9. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2519-2248 (Online), 2079-0740 (Print).

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Баранов Михайло Іванович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник, НДПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.

**Баранов Михаил Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник, НИПКІ «Молнія» НТУ «ХПІ»; тел.: (057) 707-68-41; e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.

**Baranov Michail Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher, NDPKI "Molniya" NTU "KhPI"; tel.: (057) 707-68-41, e-mail: baranovmi@kpi.kharkov.ua.