

УДК 537.529:544.344.15.4

В. Ю. БАКЛАРЬ, Н. И. КУСКОВА, Д. И. ЧЕЛПАНОВ**ФАЗОВЫЕ ТРАЕКТОРИИ УГЛЕРОДА В ПРОЦЕССЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА ГРАФИТОВОГО ПРОВОДНИКА**

Визначено термодинамічний стан вуглецю з урахуванням фазових і структурно-фазових перетворень, в результаті яких відбувається синтез алмазу. Побудована діаграма станів і фазові траєкторії вуглецю для центральної частини провідника. Показано, що синтез алмазної фази при високоенергетичних режимах електричного вибуху обумовлений кристалізацією рідкого вуглецю при тисках понад 10 ГПа, які генеруються при вибуховому випаровуванні зовнішніх шарів провідника.

Ключові слова: електричний вибух провідників, вуглецеві наноматеріали, наноалмаз, фазові траєкторії вуглецю, математична модель, термодинаміка.

Определено термодинамическое состояние углерода с учетом фазовых и структурно-фазовых превращений, в результате которых происходит синтез алмаза. Построена диаграмма состояний и фазовые траектории углерода для центральной части проводника. Показано, что синтез алмазной фазы при высокоэнергетических режимах взрыва обусловлен кристаллизацией жидкого углерода при давлениях более 10 ГПа, которые генерируются при взрывном испарении внешних слоев проводника.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, углеродные наноматериалы, наноалмаз, фазовые траектории углерода, математическая модель, термодинамика.

The thermodynamic state of carbon considering phase and structural phase transitions which lead to the synthesis of diamond was determined. Time dependencies of temperature and pressure change in the process of electrical explosion of graphite conductor were built. The state diagram and the phase trajectories of carbon for the central part of the conductor have shown that the synthesis of the diamond phase in the high-energy conditions of the electric explosion is determined by the crystallization of liquid carbon at pressures greater than 10 GPa which are generated by explosive evaporation of the outer layers of the conductor. Research results can be applied for designing of the electrical discharge equipment of selective production of carbon nanomaterials.

Keywords: electrical explosion of conductors, carbon nanomaterials, nano-diamond, phase trajectories of carbon, mathematical model, thermodynamics.

Постановка проблеми. Существующие физические методы получения наноматериалов (электродуговой, лазерный, детонационный, взрывной и метод электронных пучков) основаны на испарении и конденсации веществ. Обеспечение равномерного действия концентрированного потока энергии на весь объем материала при использовании электронных пучков, электродуги и лазерного испарения вызывает большие технические трудности, которые отсутствуют при применении метода электрического взрыва проводников (ЭВП). Взрыв как процесс быстрого превращения энергии электрического поля во внутреннюю энергию вещества проводников по своим удельным характеристикам является одним из мощнейших источников импульсного воздействия на материалы. Известны однородные режимы взрыва проводников, при которых до начала испарения величины температуры, тока, плотности и электропроводности в каждый момент времени одинаковы по радиусу проводника. Для однородных режимов характерны отсутствие пространственных возмущений формы проводника (МГД-неустойчивости) и радиальная однородность термо- и электрофизических характеристик проводника до момента испарения [1-6].

ЭВП давно исследовали экспериментально и теоретически, однако сложность электрофизических процессов и последовательных фазовых превращений вещества не позволили до настоящего времени получить простые аналитические зависимости, которые делают возможным расчет термодинамиче-

ского состояния вещества в процессе ЭВП. Поэтому возникает необходимость дальнейшего развития теории, которая описывает процессы взаимодействия мощных импульсов тока с веществом. Временные зависимости тока $I(t)$ и напряжения $U(t)$ могут быть получены экспериментально в виде осциллограмм, однако для прогнозирования результата воздействия мощного импульса тока на графит необходимо получить аналитические зависимости тока $I(t)$, сопротивления $R(t)$, температуры $T(t)$ и давления $P(t)$.

Анализ последних исследований и публикаций. Активные исследования взаимодействия импульсного тока с графитовыми проводниками ведутся на протяжении последних полутора десятков лет. Изучение фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий рассмотрено в работе [7]. В работе [8] проанализированы структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов, полученных при воздействии мощных импульсов тока. Проведены расчеты условий, необходимых для синтеза алмазоподобных форм углерода [6]. Построена математическая модель процесса взрыва цилиндрических проводников в [9].

Цель работы – исследовать теоретически термодинамическое состояние углерода в процессе высокоэнергетических оптимальных режимов взрыва графитовых проводников, в процессе которых могут происходить структурно-фазовые превращения гра-

фит → жидкий углерод → алмаз.

Математическая модель. Математическая модель однородных режимов электровзрыва включает резистивный нагрев проводника током и сжатие проводника магнитным давлением (пинч-эффект). Испарение проводника начинается с поверхности, что связано с зависимостью температуры кипения от давления (магнитное давление максимально в центре цилиндрического проводника). Для математического описания испарения использована упрощенная модель, основанная на предположении, что от поверхности проводника вглубь распространяется волна испарения. Радиус проводящей части уменьшается, так как пар не является проводником [9].

Выбор оптимальных диаметра d_{opt} и длины l_{opt} проводника позволяет выделить запасенную в конденсаторах энергию за первый полупериод тока. Выражения для оптимальных значений диаметра и длины проводника при однородных режимах электровзрыва имеют вид [10]

$$d_{opt} = 2 \left[\frac{W_0}{z\gamma_0\sigma_0(\lambda_m + \lambda_b)} \right]^{\frac{1}{4}}; \quad (1)$$

$$l_{opt} = 2 \cdot 10^{-3} U_0 \sqrt{LC}, \quad (2)$$

где $W_0 = CU_0^2/2$ – энергия, запасенная в конденсаторной батарее; U_0 – зарядное напряжение; L – индуктивность; C – емкость; $z = \sqrt{L/C}$ – волновое сопротивление; γ_0 и σ_0 – начальные плотность и электропроводность металла; $\lambda_{m,b}$ – удельные теплоты плавления и испарения.

Используя выражения (1) и (2), а также известные значения характеристик графита γ , σ , λ_m и λ_b , получим для оптимального режима электровзрыва

$$\frac{R_0}{L} = \frac{8 \cdot 10^{-3}}{\pi} \sqrt{\frac{2\gamma(\lambda_m + \lambda_b)}{\sigma}} \frac{1}{\sqrt{LC}}; \quad \frac{R_0}{L} \ll \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (3)$$

При выполнении условия (3) аналитические выражения для описания электрических параметров в процессе электровзрыва проводника имеют вид:

– до начала плавления

$$I(t) = U_0 \sqrt{\frac{C}{L}} \sin \frac{t}{\sqrt{LC}}; \quad (4)$$

$$R(t) \approx R_0 \left[1 + \frac{R_0(\beta_s + \alpha_s)}{3mc_s} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \right];$$

– до начала испарения жидкого проводника

$$I \approx I^0; \quad R^f(t) \approx R^0 + R_1 t; \quad (5)$$

– в процессе испарения

$$I^b(t) = I^0 \exp \left[- \left(\frac{R_b P}{L} + \frac{1}{2LC} \right) \cdot t^2 \cdot \left(1 - \frac{R_b}{3L} t + \dots \right) \right]; \quad (6)$$

$$R(t) = R_b (1 + 2pt);$$

где $R^f_0 = R^0$; $R_1 = A_1 R^0 (\beta_l + \alpha_l)$; $R(t_f) = R_b$;

$$A_1 = \frac{(I^0)^2 R^0}{mc_l}; \quad m - \text{масса проводника}; \quad c_{s,l} - \text{среднее}$$

значение удельной теплоемкости твердого графита и жидкого углерода; $\beta_{s,l}$ – среднее значение температурного коэффициента электропроводности графита и жидкого углерода; $\alpha_{s,l}$ – среднее значение температурного коэффициента плотности графита и жидкого углерода.

Выражения (4)-(6) позволяют найти мощность $N(t) = I^2(t)R(t)$ и введенную в проводник энергию $W = W_1 + W_2 + W_3$, где

$$W_1 = \int_0^{t_m + \tau_m} I^2 R dt; \quad W_2 = \int_{t_m}^{t_f} (I^0)^2 R_f dt; \quad W_3 = \int_{t_f}^{t_b} I_b^2 R_b dt; \quad (7)$$

где t_m – момент начала плавления, τ_m – время, необходимое для завершения плавления, t_f – момент начала испарения, t_b – время распространения волны испарения.

W представляет собой энтальпию – электрическую энергию, выделяющуюся в проводнике в виде джоулева тепла, а также энергию, поглощаемую при фазовых переходах – плавлении и испарении.

Временные зависимости введенной в проводник энергии

– при $t < t_m$,

$$W_1(t) \approx \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \frac{R_0}{3} \left(1 - \frac{R_0}{L} t \right); \quad (8)$$

– при $t_m < t < t_f$

$$W_2(t) \approx \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t_m^2 k_m^2 R_0 t \times \left[1 + \frac{k_m^2}{2mc_s} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 R^0 (\beta_l + \alpha_l) k_m^2 t \right]; \quad (9)$$

позволяют описать рост температуры и давления твердого и жидкого проводника в виде

– при $t < t_m$

$$T(t) = T_0 + \frac{W_1(t)}{mc_s}; \quad (10)$$

– при $t_m < t < t_f$

$$T^f(t) \approx T^0 + \frac{W_2(t)}{mc_l}; \quad (11)$$

– при $0 < t < t_f$

$$P(r, t) \approx P(a) + \mu \left(\frac{I(t)}{2\pi a(t)} \right)^2 \times \left(1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right) - \gamma \frac{dv}{dt} (a(t) - r); \quad (12)$$

где $P(a)$ – внешнее давление; v – скорость расширения.

Максимальные значения температуры и давления достигаются в процессе взрывного вскипания жидкого проводника

$$N(t_f) \approx \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t_m^2 k_m^2 R_0 \times \left(1 + \frac{k_m^2}{mc_0} \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 R^0 [\beta_l + \alpha_l] t_f \right) \quad (13)$$

и зависимость мощности от времени для стадии взрывного испарения проводника при $t > t_f$,

$$N = N(t_f) \left[1 + \left(2p - \frac{2R_b}{3L} \right) t + \left(\frac{R_b^2}{9L^2} - \frac{1}{LC} - \frac{10R_b p}{3L} \right) t^2 \right]; \quad (14)$$

где $p = u/a(t_f)$, u – скорость волны испарения, $a(t_f)$ – радиус проводника в момент начала испарения.

Полученное выражение для мощности позволяет найти временную зависимость давления при взрыве проводника [10]

$$P = P_0 + P_1 t + P_2 t^2, \quad (15)$$

$$\text{где } P_1 = \frac{nN_0 - \zeta_a P_0 S_1}{S_0}, \quad P_2 = \frac{nN_1 - (\zeta_a + 1)P_1 S_1 - 2\zeta_a P_0 S_2}{2S_0},$$

ζ_a – показатель адиабаты, $N_0 = N(t_f)$, $N_1 = 2pN(t_f)$,

$$N_2 = -N(t_f) \left(\frac{2pR_b}{L} + \frac{1}{LC} \right).$$

Результаты исследования. Для расчета оптимальных размеров графитового проводника для согласованного высокоэнергетического режима электровзрыва были выбраны следующие параметры электрического контура $U_0 = 45$ кВ, $C = 27$ мкФ, $L = 0,5$ мкГн. Получены оптимальные значения длины 20 мм и диаметра 0,80 мм.

В результате расчета при указанных выше электро-технических параметрах были получены временные зависимости тока и напряжения $U(t) \approx I(t) \cdot R(t)$ (рис. 1).

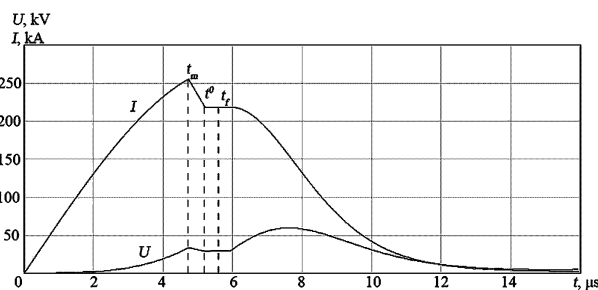


Рисунок 1 – Временные зависимости тока и напряжения

Используя выражения (10,11,15) были построены временные зависимости температуры (рис. 2) и давления (рис. 3) при электрическом взрыве проводника.

Для выбранного высокоэнергетического режима электровзрыва графитового проводника на P, T -диаграмме построены фазовые траектории, показывающие изменение термодинамического состояния вещества в приосевой части цилиндрического проводника и структурно-фазовые превращения углерода от графита до алмаза (рис. 4).

Получение алмаза при высокоэнергетических режимах электровзрыва связано с двумя стадиями. Первая стадия - быстрое сжатие графита за счет пинч-эффекта, плавление центральной части проводника и образование жидкого углерода ($P > 10^{10}$ Па, $T > 5$ кК, $dP/dT > 2 \cdot 10^6$ Па/К). На второй стадии происходит кристаллизация жидкого углерода в алмаз.

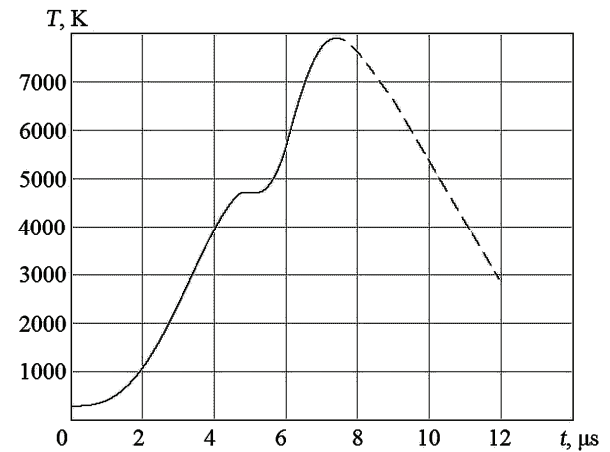


Рисунок 2 – Временная зависимость изменения температуры в процессе электровзрыва проводника

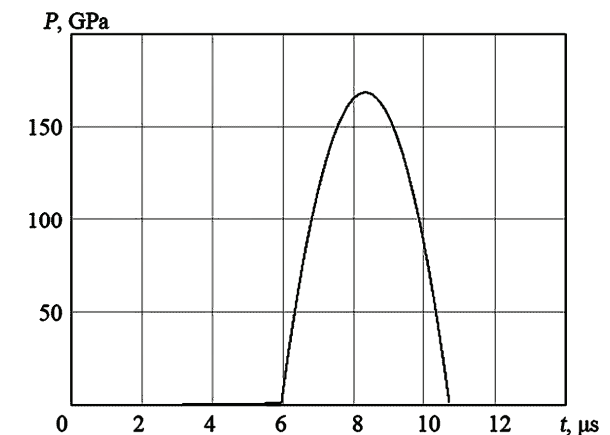


Рисунок 3 – Временная зависимость изменения давления в процессе электровзрыва проводника

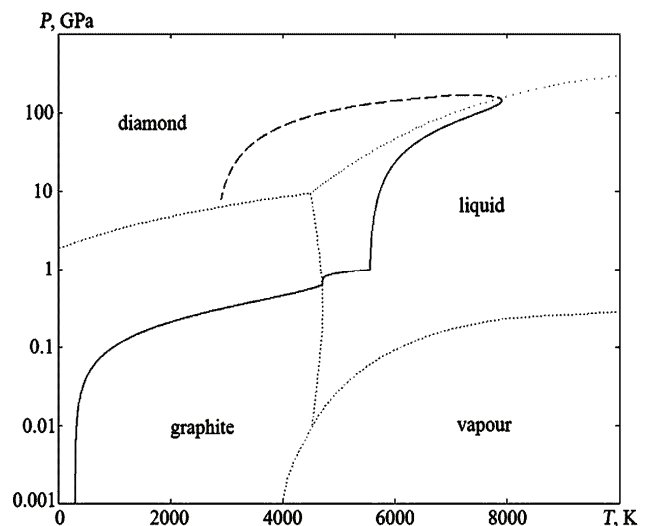


Рисунок 4 – Диаграмма состояния и фазовые траектории углерода для центральной части проводника

Выводы. На основе развития теории процессов взаимодействия мощного электроразрядного импульса тока с конденсированным веществом определено термодинамическое состояние углерода с учетом фазовых и структурно-фазовых превращений, в результате которых происходит синтез алмаза. Представленная в

работе математическая модель позволяет рассчитать зависимости тока и напряжения в процессе электро-взрыва проводника, а также построить фазовые траектории углерода.

Показано, что синтез алмазной фазы при высоко-энергетических режимах электровзрыва обусловлен кристаллизацией жидкого углерода при давлениях более 10 ГПа, которые генерируются при взрывном испарении внешних слоев проводника.

Список литературы

1. Бурцев В. А. Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках / В. А. Бурцев, Н. В. Калинин, А. В. Лучинский. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 289 с.

2. Кускова Н. И. Фазовые превращения углерода в процессе нагрева мощным импульсом тока / Н. И. Кускова // Письма в журн. технич. физики. – 2005. – Т. 31, вып. 17. – С. 28–34.

3. Kuskova N. I. Investigation of Liquid Metallic Wire Heating Dynamics / N. I. Kuskova, S. I. Tkachenko, S. V. Koval // Journ. Phys.: Condens. Matter. – 1997. – Vol.9. – P. 6175-6184.

4. Рахель А. Д. Об испарении металла электрическим током высокой плотности / А. Д. Рахель // Журнал технической физики. – 1995. – Т. 65, вып. 12. – С. 27-38.

5. Кускова Н. И. Процеси взаємодії потужного електро-розрядного імпульсу струму з конденсованою речовиною: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / Н. И. Кускова. – К.: 2007. – 38 с.

6. Бакларь В. Ю. Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва / В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, С. А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12.

7. Орешкин В. И. Изучение фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий / В. И. Орешкин, С. А. Чайковский, Н. А. Лабеецкая и др. // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, вып. 2. – С. 41-45.

8. Рудь А. Д. Структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов высоковольтными электроразрядными методами / А. Д. Рудь, Н. И. Кускова, Л. З. Богуславский и др. // Известия ВУЗОВ. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, вып. 7. – С.99-104.

9. Бакларь В. Ю. Математическая модель процесса электровзрыва цилиндрических проводников / В. Ю. Бакларь, Н. И. Кускова, Д. И. Челпанов // Вісник НТУ «ХП». Сер. Техніка та електрофізика високих напруг: зб. наук. праць. – 2015. – № 51. – С. 3-7.

10. Хайнацкий С. А. Условия реализации оптимального режима электрического взрыва проводников в воде / С. А. Хайнацкий // Письма в журнал технической физики. – 2009. – Т.35, вып. 7. – С. 15-20.

References (transliterated)

1. Burtsev V. A., Kalinin N. V., Luchinskiy A. V. Elek-

tricheskiy vzryv provodnikov i ego primenenie v elektrofizicheskikh ustanovkakh [Electrical explosion of conductors and its application in electrophysical equipment]. Moscow, Energoatomizdat, 1990. 289 p.

2. Kuskova N. I. Fazovye prevrashcheniya ugleroda v protsesse nagreva moshchnym impul'som toka [Carbon phase transitions in the process of heating by potent current pulse]. Pis'ma v zhurn. tekhnich. fiziki [Applied Physics Letters]. 2005, vol. 31, issue 17, pp. 28–34.

3. Kuskova N. I., Tkachenko S. I., Koval S. V. Investigation of Liquid Metallic Wire Heating Dynamics. Journ. Phys.: Condens. Matter. 1997, vol. 9, pp. 6175-6184.

4. Rakhel' A. D. Ob isparenii metalla elektricheskim tokom vysokoy plotnosti [About the evaporation of metal by high density electrical current]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki. 1995, vol. 65, iss. 12, pp. 27-38.

5. Kuskova N. I. Protsey vzayemodiyi potuzhnoho elektro-rozryadnoho impul'su strumu z kondensovanoyu rechovinoyu: avtoref. dys. na zdobuttya nauk. stupenya d-ra tekhn. nauk: spets. 05.03.07 "Protsey fizyko-tekhnichnoyi obrobky" [Processes of interaction between potent electrical discharge current pulse and condensed matter. Abstract of a thesis dr. eng. sci. diss. 05.03.07 "Processes of physical-and-technical treatment"]. Kyiv, 2007, 38 p.

6. Baklar' V. Yu., Kuskova N. I., Khaynatskiy S. A. Elektrofizicheskie parametry sinteza uglerodnykh nanostruktur v protsesse elektrovzryva [Electrophysical parameters of carbon nanostructures synthesis during electrical explosion process]. Visnyk NTU "KhPI". Zbirnyk naukovykh prats'. Tekhnika ta elektrofizyka vysokoykh napruh [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Collection of research papers. Technics and electrophysics of high voltage]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2014, no. 50 (1092), pp. 3-12.

7. Oreshkin V. I., Chaykovskiy S. A., Labetskaya N. A., Ivanov Yu. F., Khishchenko K. V., Levashov P. R., Kuskova N. I., Rud' A. D. Izuchenie fazovykh prevrashcheniy ugleroda v usloviyakh ekstremal'nykh energeticheskikh vozdeystviy [Research of phase transitions of carbon in conditions of extreme energetic influences]. Zhurnal tekhnicheskoy fiziki, 2012, vol. 82, iss. 2, pp. 41-45.

8. Rud' A. D., Kuskova N. I., Boguslavskiy L.Z., Kir'yan I. M., Zelinskaya G. M., Belyy N.M. Strukturno-energeticheskie aspekty sinteza uglerodnykh nanomaterialov vysokovol'tnymi elektrorazryadnymi metodami [Structural-and-energetic aspects of carbon nanomaterials synthesis by high-voltage electrical discharge methods]. Izvestiya VUZOV. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2013, vol. 56, iss. 7, pp. 99-104.

9. Baklar' V. Yu., Kuskova N. I., Chelpanov D. I. Matematicheskaya model' protsessa elektrovzryva tsilindricheskikh provodnikov. Visnyk NTU «KhPI». Ser. Tekhnika ta elektrofizyka vysokoykh napruh: zb. nauk. prats' [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Technics and electrophysics of high voltage: collection of research papers]. 2015, no. 51, pp. 3-7.

10. Khaynatskiy S. A. Usloviya realizatsii optimal'nogo rezhima elektricheskogo vzryva provodnikov v vode [Conditions of realization of optimum regime of electrical explosion of conductors in the water]. Pis'ma v zhurn. tekhnich. fiziki [Applied Physics Letters]. 2009, vol. 35, iss. 7, pp. 15-20.

Поступила (received) 22.06.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Фазові траєкторії вуглецю в процесі високоенергетичних режимів електровибуху графітового провідника / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, Д.И. Челпанов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 5-9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Фазовые траектории углерода в процессе высокоэнергетических режимов электровзрыва графитового проводника / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, Д.И. Челпанов // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 5-9. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.

Phase trajectories of carbon in the process of high-energy modes electroexplosion graphite conductor / V.Yu. Baklar, N.I. Kuskova, D.I. Chelpanov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 5-9. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Баклар Віктор Юрійович – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел.: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

Бакларь Виктор Юрьевич – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

Baklar Viktor Yurjevich – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (050) 864-26-23; e-mail: baklarv@gmail.com.

Кускова Наталія Іванівна – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Кускова Наталья Ивановна – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины; тел.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Kuskova Natalya Ivanovna – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Electrophysical Researches of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (050) 737-94-52; e-mail: nataljakuskova@mail.ru.

Челпанов Дмитро Ілліч – аспірант, Інститут імпульсних процесів та технологій Національної Академії Наук України, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Челпанов Дмитрий Ильич – аспирант, Институт импульсных процессов и технологий Национальной Академии Наук Украины, тел.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

Chelpanov Dmitry Ilych – Postgraduate Student, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; e-mail: chelpanoffdimitri@gmail.com.

УДК 621.3.01:537.311

М.И. БАРАНОВ

НОВЫЙ ПРИНЦИП СОГЛАСОВАНИЯ ДЛИННОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ИМПУЛЬСОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА С НАГРУЗКОЙ

Приведені наближені результати теоретичного дослідження узгодженого режиму роботи однорідної двопровідної довгої лінії передачі імпульсів електричної напруги (струму) і підключеного до неї зосередженого електричного навантаження, що розміщені в ізоляційному повітряному середовищі, яке оточує їх. Сформульована нова уточнена умова узгодження даної довгої лінії з вказаним електричним навантаженням, котре враховує вплив хвильового опору повітряного простору, що оточує їх, на протікання хвильових електромагнітних процесів в даній повітряній довгій лінії з підключеною до одного з її кінців електричним навантаженням, яке виконано у вигляді зосередженого активного опору. Виконано порівняння отриманих оригінальних результатів за уточненим погодженням довгої лінії з омичним електричним навантаженням з відомими в цій галузі закордонними і вітчизняними даними.

Ключові слова: однорідна двопровідна довга лінія передачі імпульсів електричної напруги (струму); зосереджене електричне навантаження; хвильовий опір повітряного простору, що оточує довгу лінію і електричне навантаження; узгоджений режим роботи повітряної довгої лінії з навантаженням; уточнена умова узгодження довгої лінії з електричним навантаженням.

Приведены приближенные результаты теоретического исследования согласованного режима работы однородной двухпроводной длинной линии передачи импульсов электрического напряжения (тока) и подключенной к ней сосредоточенной электрической нагрузки, размещенных в окружающей их изоляционной воздушной среде. Сформулировано новое уточненное условие согласования данной длинной линии с указанной электрической нагрузкой, учитывающее влияние волнового сопротивления окружающего их воздушного пространства на протекание волновых электромагнитных процессов в рассматриваемой воздушной длинной линии с подключенной к одному из ее концов электрической нагрузкой, выполненной в виде сосредоточенного активного сопротивления. Выполнено сравнение полученных оригинальных результатов по уточненному согласованию длинной линии с омической электрической нагрузкой с известными в этой области зарубежными и отечественными данными.

Ключевые слова: однородная двухпроводная длинная линия передачи импульсов электрического напряжения (тока); сосредоточенная электрическая нагрузка; волновое сопротивление окружающего длинную линию и электрическую нагрузку воздушного пространства; согласованный режим работы воздушной длинной линии с нагрузкой; уточненное условие согласования длинной линии с электрической нагрузкой.