

В.Ю. БАКЛАРЬ, мл. науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев;
Н.И. КУСКОВА, д-р техн. наук, профессор, зав. отделом, ИИПТ НАН Украины, Николаев;
С.А. ХАЙНАЦКИЙ, науч. сотр., ИИПТ НАН Украины, Николаев

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СИНТЕЗА УГЛЕРОДНЫХ НАНОСТРУКТУР В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОВЗРЫВА

Получены зависимости, определяющие фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока. Рассчитаны электрофизические параметры синтеза разнообразных углеродных наноструктур, обеспечивающие выполнение энергетических и термодинамических условий структурно-фазовых превращений углерода. Проведены экспериментальные исследования электровзрывных процессов синтеза углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, углеродные наноматериалы, фазовые траектории углерода

Введение. Наноматериалы (НМ) как в дисперсном, так и в компактном виде, – это новое поколение материалов. Неослабевающий интерес ученых различных областей науки к углеродным наноматериалам обусловлен большим разнообразием физико-химических, оптических, механических и электрических свойств, проявляемых ими. Несмотря на значительное число работ в этой области [1-6], актуальными остаются проблемы эффективности целенаправленного синтеза углеродных наноматериалов (УНМ), получения материалов с заданными свойствами и новых НМ для применения в промышленности. Таким образом, актуальность работы определяется как научной, так и практической стороной.

Анализ предварительных исследований. Активные исследования взаимодействия импульсного тока с графитовыми проводниками ведется на протяжении последних десяти лет. Приоритет в разработке данной проблемы принадлежит исследователям из Института импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, Института металлофизики (ИМФ) НАН Украины и Института сильноточной электроники СО РАН. Одна из последних работ, опубликованных совместно [7] посвящена изучению фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий. Построена МГД- модель процесса взрыва проводника, проведены МГД-расчеты, которые показали, что при сжатии наполненных графитом медных трубок диаметром 2–4 нм импульсом тока возникают условия, необходимые для

синтеза алмазоподобных форм углерода. В работе [8] проанализированы структурно-энергетические аспекты синтеза углеродных наноматериалов, полученных при воздействии мощных импульсов тока.

Целью работы является определение энергетических и термодинамических условий синтеза углеродных наноматериалов в результате структурно-фазовых превращений углерода в высокоэнергетических импульсных процессах электрического взрыва графитовых проводников.

Структурно-фазовые превращения вещества в процессе электро-взрыва проводников. Для получения зависимостей, определяющих фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока, используем систему уравнений, моделирующих процесс однородного нагрева проводника в электрической цепи с емкостью C и индуктивностью L [9-11]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\rho}{r} \frac{\partial(rv)}{\partial r} = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{1}{2\mu r^2} \frac{\partial(r^2 B_\phi^2)}{\partial r}, \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{I^2 R}{mc}, \quad (3)$$

$$L \frac{d^2 I}{dt^2} + \frac{d(RI)}{dt} + \frac{1}{C} I = 0, \quad (4)$$

$$\rho = \rho_0 (1 - \alpha(T - T_0)), \quad (5)$$

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{1 + \beta(T - T_0)} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma, \quad (6)$$

где ρ – плотность; t – время; v – скорость расширения; P – давление; $B_\phi = \mu I r / (2\pi a^2)$ – компонента магнитной индукции; μ – магнитная проницаемость; T – температура; T_0 – начальная температура; I – ток; m – масса проводника; R – сопротивление проводника; c – удельная теплоемкость; L – индуктивность контура; C – емкость конденсаторной батареи; σ – удельная электрическая проводимость; α – температурный коэффициент плотности; β – температурный коэффициент электропроводности; γ – показатель степени.

При начальных условиях $I(0) = 0$, $(dI/dt)|_{t=0} = U_0 / L$ для твердого проводника до момента начала плавления t_m (при условии $t_m \leq T/4$, где T – период) получаем следующее решение

$$I(t) \approx I_0 \sin\left(\frac{t}{\sqrt{LC}}\right) \exp\left(-\frac{R_0}{L}t\right) + I_0 \frac{t^5}{\sqrt{LC}} \cdot f(t), \quad (7)$$

где $f(t)$ – зависимость изменения сопротивления R от времени, R_0 – начальное сопротивление.

Как видно из приведенного решения (3.11), зависимость $I(t)$ отличается от временной зависимости тока в режиме КЗ, отличие членов ряда имеет место, начиная с пятого члена (t^5), с учетом этого получаем приближенное решение уравнений:

$$R(t) \approx R_0 \left[1 + \frac{R_0(\beta - \alpha) \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right) \right], \quad (8)$$

$$\rho(t) = \frac{m}{\pi a^2(t) l}, \quad (9)$$

$$a(t) \approx a_0 \left[1 + \frac{\alpha R_0 \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right) \right], \quad (10)$$

$$T(t) \approx T_0 + \frac{R_0 \left(\frac{U_0}{L} \right)^2 t^3 \left(1 - \frac{3R_0}{4L} t \right), \quad (11)$$

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

где a – радиус проводника; a_0 – начальный радиус проводника; $r = 0,75 a$; $P_a = P(a, t)$ – внешнее давление; U_0 – зарядное напряжение, l – длина проводника.

В выражении для магнитного давления (12) из-за существенно малого значения гидродинамического давления $\rho \frac{dv}{dt} (a(t) - r)$ данной величиной можно пренебречь. Тогда выражение (12) примет вид:

$$P(r, t) \approx P_a + \mu \left(\frac{I(t)}{2\pi a(t)} \right)^2 \left(1 - \frac{r^2}{a^2(t)} \right), \quad (13)$$

Используя полученные выражения (7)-(13), можно рассчитать параметры установки для заданного графитового проводника, необходимые для создания в веществе P , T -условий для фазовых или структурно-фазовых превращений углерода.

Время, необходимое для завершения процесса однородного плавления (при слабой зависимости температуры плавления от давления), $\tau_m \approx m \lambda_m / (I^2(t_m) R(t_m))$, где λ_m – удельная теплота плавления, Дж/кг.

Обозначим все величины в момент окончания плавления $t^0 = t_m + \tau_m$ следующим образом: $P^0, I^0, R^0, \rho^0, T_m, a^0$. Величина тока в момент t^0 :

$$I^0 \approx k_m I(t_m), \quad (14)$$

где $k_m = 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{R_1}{L} - \frac{1}{LC} \right) \tau_m^2$; $R_1 = (R^0 - R(t_m)) / \tau_m$.

Тогда магнитное давление при $t=t^0$

$$P^0 = \frac{\mu I^0{}^2}{(2\pi a^0)^2} \left(1 - \frac{r^2}{a^0{}^2} \right) \approx k_m^2 P(t_m). \quad (15)$$

Приближенное решение, описывающее однородный нагрев жидкого проводника до температуры кипения T_b за время τ_f , имеет вид:

$$R(\tau) \approx R^0 + R_1 \tau; \quad (16)$$

$$I(\tau) \approx I^0 (1 + k\tau^2); \quad (17)$$

$$\rho(\tau) \approx \rho^0 (1 - 2q\tau); \quad (18)$$

$$T(\tau) \approx T^0 + A\tau; \quad (19)$$

$$P_f(r, \tau) = \left(\frac{\mu I^0{}^2}{(2\pi a)^2} + \frac{(q a^0 \rho^0)^2}{2} \right) \left(1 - \frac{r^2}{a^2} \right), \quad (20)$$

где $R_1 = AR^0[\beta + \alpha(\gamma - 1)]$; $\tau = t - t^0$; $q = 0,5\alpha A$; $k = -0,5(R_1/L + 1/LC)$.

При однородном нагреве жидкого проводника магнитное давление

$$P_f(T) \approx P^0 \approx \text{const}. \quad (21)$$

После нагрева проводника до температуры кипения поверхностный слой проводника начинает испаряться. Основную роль при испарении поверхности проводника начинает играть реактивное давление испарения, при котором плотность вещества в центре проводника может возрасти.

Оценим реактивное давление. Допустим, что испаряемый слой цилиндрического графитового проводника радиусом $a = 3$ мм и длиной $l = 15$ мм имеет толщину $\delta = 0,5$ мм. Тогда масса испаряемого слоя будет равна $m = \rho \pi [a^2 - (a - \delta)^2] l = 2,8 \cdot 10^{-4}$ кг. Чтобы испарить его потребуется энергия (при условии энергии сублимации $w_s = 20 \cdot 10^6$ Дж/кг) $w = w_s m \approx 5,6$ кДж. Кинетическую энергию такой величины слой будет иметь при максимальной скорости расширения паров $v = \sqrt{\frac{2w}{m}} \approx 6 \cdot 10^3$ м/с.

Оценим давление, которое возникло бы при торможении слоя неподвижной, абсолютно твердой мишенью за время 0,1 мкс. Ускорение слоя $dv/dt = 6 \cdot 10^{10}$ м²/с. Сила, сжимающая проводник, $F = m \frac{dv}{dt} \approx 10^7$ Н. Тогда реактивное давление испаряющегося слоя на поверхность проводника $P = F/S = F/2\pi a l \approx 3,7 \cdot 10^{10}$ Па. Таким образом, полученное значение реак-

тивного давления превышает величину давления в тройной точке графит - жидкий углерод - алмаз.

Полученная временная зависимость температуры (11), описывающая нагрев твердого цилиндрического проводника, с учетом соотношения $m/R_0 = \sigma r \pi^2 a^4$ позволяет определить момент начала плавления или сублимации графита:

$$t_{m,s} \approx \left(\frac{\sigma r \pi^2 a^4 c L^2}{U_0^2} (T_{m,s} - T_0) \right)^{1/3}, \quad (22)$$

где $T_{m,s}$ – температура плавления или сублимации, К.

Будем выбирать режимы электровзрыва, при которых основная часть энергии выделяется в первой четверти периода тока, а именно, пусть плавление или сублимация графитового проводника происходят в момент времени

$$t_{m,s} \approx T/8 = 2\pi\sqrt{LC}/8 = \pi\sqrt{LC}/4.$$

Из выражений (11) и (12) можно найти отношение $(P - P_a)/(T - T_0) \approx P_{m,s}/T_{m,s}$ в момент фазового перехода на оси проводника:

$$\frac{P_{m,s}}{T_{m,s}} = \frac{\mu \sigma r c a_0^2}{\pi \sqrt{LC}}. \quad (23)$$

Выражение (23) для выбранного графитового проводника, имеющего радиус a_0 , определяет \sqrt{LC} для заданного значения отношения $T_{m,s}/P_{m,s}$ на кривых фазового равновесия графит→газ и графит→жидкость в центральной части проводника:

$$\sqrt{LC} = \mu \sigma r c a_0^2 \frac{T_{m,s}}{\pi P_{m,s}}. \quad (24)$$

Выбрав емкость конденсатора C , из выражения (24) находим индуктивность:

$$L = 0,1 \left(\mu \sigma r c a^2 (T_{m,s}/P_{m,s}) \right)^2 / C. \quad (25)$$

Использование выражения (22) в момент времени $t_{m,s} = \pi\sqrt{LC}/4$, а также значений L и C позволяет рассчитать необходимую величину зарядного напряжения:

$$U_0 = 8a^2 \left(\frac{\sigma r c T_{m,s} \sqrt{L}}{\pi \sqrt{C^3}} \right)^{1/2}. \quad (26)$$

Используя значение удельной энергии [14], необходимой для синтеза определенной аллотропной формы углерода, из выражения $w = CU_0^2/2m$ определяем значение длины графитового проводника:

$$l = \frac{CU_0^2}{2\pi r a^2 w}. \quad (27)$$

Задавая термодинамические величины – давление и температуру и варьируя параметрами, которые входят в полученные выражения (25-27), можно целенаправленно управлять процессом электровзрыва. Влияя на процессы охлаждения и конденсации продуктов ЭВ путем выбора среды, можно получать частицы вещества в различных структурных состояниях (от аморфного до кристаллического) и новые ультрадисперсные материалы [7,13].

Экспериментальные исследования. Полученные выражения (25-27) позволили рассчитать для выбранных графитовых проводников режимы электровзрыва, в процессе которых давление вещества в центральной части проводника достигает заданного значения в момент фазового перехода.

При низкоэнергетических режимах нагрева проводника ($P < 10^7$ Па) могут происходить структурно-фазовые превращения графит→фуллерены. Получение алмаза при высокоэнергетических режимах электровзрыва связано с плавлением центральной части проводника и образованием жидкого углерода (при $P > 10^8$ Па) [12].

Расчет параметров электровзрыва проводили, задавая значения P на кривых фазового равновесия графит-газ (от $1,5 \cdot 10^6$ до $2 \cdot 10^7$ Па) и графит-жидкость (от $2 \cdot 10^8$ до $1,5 \cdot 10^9$ Па) фазовой диаграммы углерода (табл. 1).

Таблица 1 – Параметры электровзрыва графитовых проводников

P , Па	a , мм	m , 10^{-6} кг	C , мкФ	L , мкГн	U_0 , кВ	Режим ЭВП
$1,5 \cdot 10^9$	3	452	24	0,66	35	A5
$1,0 \cdot 10^9$	3	452	24	0,66	35	A6
$5,0 \cdot 10^8$	1	150	24	0,71	35	A4
$4,0 \cdot 10^8$	3	810	27	2,98	45	A3
$3,0 \cdot 10^8$	1	186	24	0,66	35	A1
$2,0 \cdot 10^7$	0,35	31,8	6	51,3	17	Ф3
$1,5 \cdot 10^7$	1	37,8	400	25,1	4,0	Ф5
$8,0 \cdot 10^6$	0,35	31,8	15	15,2	4,4	Ф2
$5,0 \cdot 10^6$	0,35	32	9	49,8	10	Ф4
$3,0 \cdot 10^6$	0,25	31,2	9	47,5	10	Ф1
$1,5 \cdot 10^6$	0,35	36	6	41,5	21	Ф6

Таким образом, были рассчитаны и реализованы высокоэнергетические режимы электровзрыва графитовых проводников A_i, при которых происходит плавление центральной части проводника и пробой поверхностного испарившегося слоя, а также низкоэнергетические режимы Ф_i, при которых происходят сублимация графитового проводника и пробой газа после паузы тока.

Диагностику электровзрыва проводников (ЭВП) осуществляли методом осциллографирования токов I и напряжений U . По полученным осциллограммам построены временные зависимости тока и напряжения. Характерные временные зависимости тока и напряжения в процессе ЭВП для режимов с пробоем без паузы тока А1 и режима ЭВП с паузой тока Ф5 приведены на рис. 1,2.

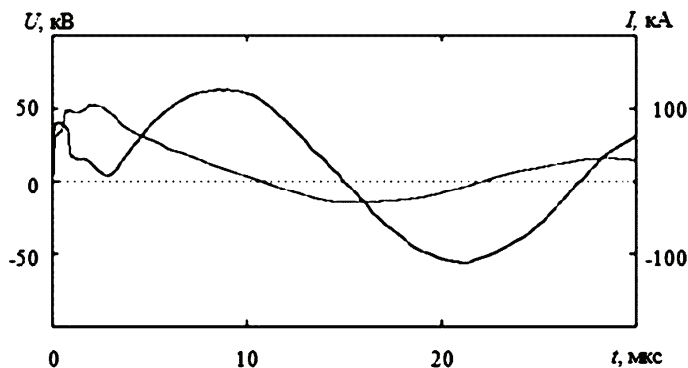


Рисунок 1 – Временные зависимости тока и напряжения для режима А1

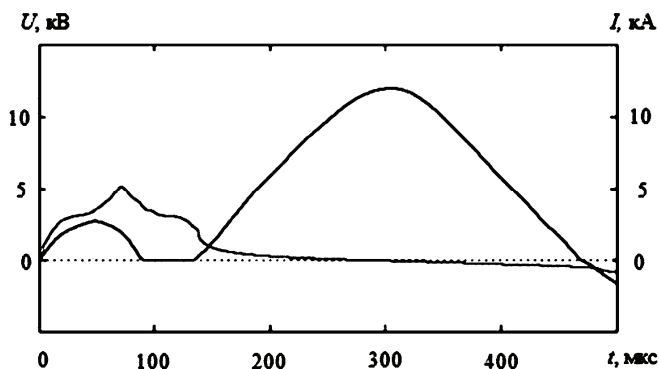


Рисунок 2 – Временные зависимости тока и напряжения для режима Ф5

Расчитаны максимальные ток I_{max} , скорость нарастания dI/dt и плотность тока j в графитовом проводнике, введенная удельная энергия w и скорость ее ввода dw_b/dt (см. табл. 2 и 3).

Фазовые траектории углерода в процессе электровзрыва. Полученные решения системы уравнений (1-6) для твердого (7-13) и жидкого проводников (16-20) позволили (после исключения времени из зависимостей $P(t)$ и $T(t)$) найти фазовые траектории вещества в процессе нагрева мощным им-

пульсом тока (P, T - условия) до начала испарения проводника:

$$P(T) \approx \frac{k_m^2 \mu}{4\pi^2 a_0^2} \left(\frac{mcU_0(T - T_0)}{R_0 L} \right)^{2/3} \left(1 - \frac{r^2}{a_0^2} \right). \quad (28)$$

Таблица 2 – Параметры электровзрыва графитовых проводников с повторным пробоем без паузы тока

Режим ЭВП	I_{\max}, kA	$dl/dt, 10^{10} \text{ A/c}$	$j, 10^{10} \text{ A/m}^2$	$w, \text{ МДж/кг}$	$dw_p/dt, \text{ Дж/(кг·с)}$
A1	81,0	29,1	2,6	78	$1,43 \cdot 10^{13}$
A5	44,9	5,6	0,88	33	$2,2 \cdot 10^{12}$
A6	20,7	11,5	1,0	36	$1,1 \cdot 10^{12}$

Таблица 3 – Параметры электровзрыва графитовых проводников с повторным пробоем после паузы тока

Режим ЭВП	I_{\max}, kA	$dl/dt, 10^8 \text{ A/c}$	$j, 10^{10} \text{ A/m}^2$	$w, \text{ МДж/кг}$	$dw_p/dt, \text{ Дж/(кг·с)}$
Ф2	1,1	3,1	3,7	18,3	$7,4 \cdot 10^{11}$
Ф4	1,7	1,6	0,9	14,0	$3,0 \cdot 10^{11}$
Ф1	3,1	2,0	2,2	14,5	$1,3 \cdot 10^{12}$
Ф3	3,9	3,0	1,4	27,0	$1,1 \cdot 10^{12}$

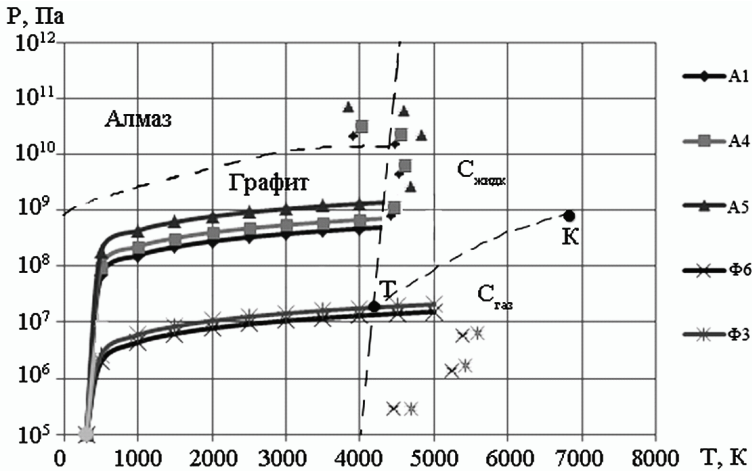


Рисунок 3 – Фазовые траектории углерода в центральной части проводника для разных режимов электровзрыва

Переход к удельным характеристикам вещества позволил получить следующее выражение для фазовых траекторий углерода, зависящих от электротехнических параметров и размеров проводника [15]:

$$P(T) = \frac{k_m^2 \mu}{4} \left(\frac{\sigma_0 \rho_0 c_0 U_0 (T - T_0) a_0}{\pi L} \right)^{2/3} \left(1 - \frac{r^2}{a_0^2} \right). \quad (29)$$

На основании выражения (29) и данных (табл. 2 и 3), полученных в результате обработки осциллограмм, построены фазовые траектории углерода в центральной части проводника ($r = 0$) на диаграмме состояний для разных (см. табл. 1) режимов электровзрыва (рис. 3).

Как видно из рис. 3, фазовые траектории различных режимов ЭВ, предполагающих синтез той или иной аллотропной формы углерода (алмаз, фуллерен) попадают в соответствующие им области фазовой диаграммы углерода, что подтверждает адекватность предложенной выше расчетной модели структурно-фазовых состояний углерода.

Выводы. На основе развития теории процессов взаимодействия мощного электроразрядного импульса тока с конденсированным веществом определены энергетические и термодинамические условия структурно-фазовых превращений углерода, в результате которых происходит синтез разнообразных углеродных наноструктур.

Впервые получены аналитические выражения, позволяющие рассчитать электрофизические параметры, определяющие эволюцию состояния вещества, что позволяет управлять процессом электровзрыва графитовых проводников.

Исследованы электровзрывные процессы при скоростях нарастания тока от 10^8 до 10^{11} А/с и термодинамические условия получения различных углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Список литературы. 1. *Бобринецкий И. И.* Технология производства углеродных нанотрубок методом каталитического пиролиза из газовой фазы этанола / *И. И. Бобринецкий, В. К. Неволин, М. М. Симунин* // Химическая технология. – 2007. – №2. – С. 58–62. 2. *Булярский С. В.* Углеродные нанотрубки: технология, управление свойствами, применение – Ульяновск: УлГУ, 2010. – 399 с. 3. *Булярский С. В.* Нуклеация кластеров катализаторов при росте углеродных нанотрубок / *С. В. Булярский* // ЖТФ. – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 64–70. 4. *Веремий Ю. П.* Утворення вуглецевих наноматеріалів в плазмі вторинного розряду / *Ю. П. Веремій, В. Я. Черняк, С. А. Філатов, Е. М. Шпілевський, В. А. Зражевський, С. К. Сафонов* // Укр. фіз. журн. – 2008. – Т. 33, № 4. – С. 395–399. 5. *Литовченко В. Г.* Модифіковані графеноподібні плівки як новий клас напівпровідників зі змінною шириною забороненої зони / *В. Г. Литовченко, М. В. Стріха, М. І. Ключ* // Український фізичний журнал. – 2011. – Т. 56, № 2. – С. 178–182. 6. *Иванова В. С.* От наноматериалов – к интеллектуальным нанотехнологиям / *В. С. Иванова, Г. Э. Фолманис* // Металлургия и машиностроение. – 2007. – № 1. – С. 2–10. 7. *Орешкин В. И.* Изучение фазовых превращений углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий / *В. И. Орешкин, С. А. Чайковский, Н. А. Лабецкая, Ю. Ф. Иванов, К. В. Хищенко, П. Р. Левашов, Н. И. Кускова, А. Д. Рудь* // 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. М. Кирьян, Г. М. Зелинская, Н. М. Белый* // Известия ВУЗОВ. Серия: Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, вып. 7. – С. 99–104. 9. *Кускова Н. И.* Процеси взаємодії потужного електроразрядного імпульсу струму з конденсовано

речовиною: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: спец. 05.03.07 «Процеси фізико-технічної обробки» / *Н. І. Кускова*. – Київ, 2007. – 38 с. **10.** *Кускова Н. І.* Теоретичне дослідження динаміки фазових перетворень в результаті мікросекундних електричних вибухів провідників циліндричної форми / *Н. І. Кускова, С. І. Ткаченко* // Український фізичний журнал. – 1999. – Т. 44, № 3. – С. 351–356. **11.** *Кускова Н. І.* Исследование радиальной однородности жидкого расширяющегося проводника, нагреваемого импульсом тока / *Н. І. Кускова, С. І. Ткаченко* // Письма в журн. технич. физики. – 1996. – Т. 22, вып. 10. – С. 30–34. **12.** *Кускова Н. І.* Фазовые превращения углерода в процессе нагрева мощным импульсом тока / *Н. І. Кускова* // Письма в журн. технич. физики. – 2005. – Т. 31, вып. 17. – С. 28–34. **13.** *Кускова Н. І.* Фазовые превращения углерода в условиях экстремальных энергетических воздействий / *Н. І. Кускова, А. Д. Рудь, В. І. Оreshkin* // Физика импульсных разрядов в конденсированных средах: Материалы XVI Междунар. науч. конф., Николаев, 19–22 авг. 2013 г. – Николаев, 2013. – С. 95–98.

Bibliography (transliterated): **1.** Bobrinetskiy I.I., Nevolin V.K., Simunin M.M. Tekhnologiya proizvodstva uglerodnykh nanotrubok metodom kataliticheskogo piroliza iz gazovoy fazy etanola. *Khimicheskaya tekhnologiya*, 2007, no. 2, pp. 58-62. **Print.** **2.** Bulyarskiy S.V. Uglerodnye nanotrubki: tekhnologiya, upravleniye svoystvami, primeneniye. Ulyanovsk, UIGU Publ., 2010, 399 p. **Print.** **3.** Bulyarskiy S.V. Nukleatsiya klasterov katalizatorov pri roste uglerodnykh nanotrubok. *ZhTF*, 2011, vol. 81, issue 11, pp. 64-70. **Print.** **4.** Veremii Yu.P., Cherniak V.Ya., Filatov S.A., Shpilevskiy E.M., Zrazhevskiy V.A., Safonov Ye.K. Utvorenniya vuhletsevykh nanomaterialiv v plazmi vtorynnogo rozryadu. *Ukr. fiz. zhurn.*, 2008, vol. 33, no. 4, pp. 395-399. **Print.** **5.** Litovchenko V.G., Strikha M.V., Kliuy M.I. Modyfikovani hafenopodibni plivky yak novyy klas napivprovodnykiv zi zminnoiu shyrynoiu zabonorenoi zony. *Ukr. fiz. zhurn.*, 2011, vol. 56, no. 2, pp. 178-182. **Print.** **6.** Ivanova V.S., Folmanis G.E. Ot nanomaterialov – k intellektualnym nanotekhnologiyam. *Metallurgiya i mashinostroeniye*, 2007, no. 1, pp. 2-10. **Print.** **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. Izucheniyе fazovykh prevrashcheniy ugleroda v usloviyakh ekstremalnykh energeticheskikh vozdeystviy. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*, 2012, vol. 82, issue 2, pp. 41-45. **Print.** **8.** Rud A.D., Kuskova N.I., Boguslavskiy L.Z., Kiryan I.M., Zelinskaya G.M., Belyi N.M. Strukturno-energeticheskiye aspekty sinteza uglerodnykh nanomaterialov vysokovoltnymi elektrorazryadnymi metodami. *Izvestiya VUZOV. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2013, vol. 56, issue 7, pp.99-104. **Print.** **9.** Kuskova N.I. Protsey vzaemodii potuzhnogo elektrorozriadnoho impulse strumu z kondensovanoiu rechovinoiu. *Avtoreferat Diss. Kyiv*, 2007. 38 p. **Print.** **10.** Kuskova N.I., Tkachenko S.I. Teoretychne doslidzhennia dynamiky fazovykh peretvoren v rezultati mikrosekundnykh elektrychnykh vybukhiv provodnykiv tsylindrychnoi formy. *Ukrainskiy fizychniy zhurnal*, 1999, vol. 44, no. 3, pp. 351-356. **Print.** **11.** Kuskova N.I., Tkachenko S.I. Issledovaniye radialnoy odnorodnosti zhidkogo rasshiryayushchegosya provodnika, nagrevayemogo impulsom toka. *Pisma v zhurn. tekhnich. fiziki*, 1996, vol. 22, issue 10, pp. 30-34. **Print.** **12.** Kuskova N.I. Fazoviyе prevrashcheniya ugleroda v protsesse nagreva moshchnim impulsom toka. *Pisma v zhurn. tekhnich. fiziki*, 2005, vol. 31, issue 17, pp. 28-34. **Print.** **13.** Kuskova N.I., Rud A.D., Oreshkin V.I. Fazovyye prevrashcheniya ugleroda v usloviyakh ekstremalnykh energeticheskikh vozdeystviy. *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf. «Fizika imulсных razryadov v kondensirovannikh sredakh (19.08-22.08.2013)»*. Nikolaeв, 2013, pp. 95-98.

Робота була виконана в рамках конкурса спільних наукових проєктів НАН України та Сибірського Отделення РАН.

Поступила(received) 27.10.2014

УДК 537.529: 620.3

Електрофізичні параметри синтезу вуглецевих наноструктур в процесі електровибуху / В.Ю. Бакларь, Н.І. Кускова, С.А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Отримано залежності, що визначають фазові та структурно-фазові перетворення речовини в процесі однорідного нагріву циліндричного провідника потужним імпульсом струму. Розраховано електрофізичні параметри синтезу різноманітних вуглецевих наноструктур, що забезпечують виконання енергетичних і термодинамічних умов структурно-фазових перетворень вуглецю. Проведено експериментальні дослідження електровибухових процесів синтезу вуглецевих наноматеріалів. Побудовано фазові траєкторії вуглецю для різних режимів електровибуху.

Ключові слова: Електричний вибух провідників, вуглецеві наноматеріали, фазові траєкторії вуглецю.

УДК 537.529: 620.3

Электрофизические параметры синтеза углеродных наноструктур в процессе электровзрыва / В.Ю. Бакларь, Н.И. Кускова, С.А. Хайнацкий // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

Получены зависимости, определяющие фазовые и структурно-фазовые превращения вещества в процессе однородного нагрева цилиндрического проводника мощным импульсом тока. Рассчитаны электрофизические параметры синтеза разнообразных углеродных наноструктур, обеспечивающие выполнение энергетических и термодинамических условий структурно-фазовых превращений углерода. Проведены экспериментальные исследования электровзрывных процессов синтеза углеродных наноматериалов. Построены фазовые траектории углерода для разных режимов электровзрыва.

Ключевые слова: электрический взрыв проводников, углеродные наноматериалы, фазовые траектории углерода.

Electrophysical parameters of the synthesis of carbon nanostructures in the process of electric explosion / V.Yu. Baklar, N.I. Kuskova, S.A. Khaynatskiy // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2014. – № 50 (1092). – С. 3-12. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

Synthesis of carbon nanostructures in the process of electric explosion of graphite conductor was considered. Dependences of electro-physical parameters of circle and conductor were theoretically concluded which determines evolution of structurally-phase transformations of carbon under pulse current. The regimes of electro-explosive synthesis were experimentally researched in process of which different carbon allotropic forms appears. The power and thermodynamics conditions of carbon nanomaterials synthesis were defined and the effective regimes of synthesis are established. The established regularities allow controlling of the processes of graphite conductor's electro-explosion at purposeful production of carbon nanomaterials of specific allotropic form. The results of researches can be applied for designing of electro-discharge equipment of selective production of carbon nanomaterials.

Keywords: Electrical explosion of conductors, carbon nanomaterials, carbon phase trajectories.