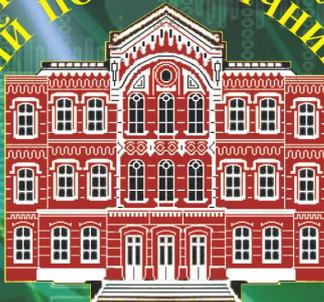


НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



1885

«ХПІ»

ISSN 2079-0740  
36'2016

# ВІСНИК

Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## **ВІСНИК**

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»**

*Серія: Техніка та електрофізика високих напруг*

№ 36 (1208) 2016

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

Харків  
НТУ «ХПІ», 2016

**Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».**  
Збірник наукових праць. Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х. : НТУ «ХПІ».  
– 2016. – № 36 (1208). – 99 с.

Державне видання  
Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України  
КВ № 5256 від 2 липня 2001 року

Мова статей – українська, російська, англійська.

*Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.*

#### **Координаційна рада:**

**Голова:** Л. Л. Товажнянський, д-р техн. наук, проф., чл.-кор. НАН України;

**Секретар:** К. О. Горбунов, канд. техн. наук, доц.;

А.П.Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є.І.Сокол, д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України;

Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.;

А. І. Грабченко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.;

В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук, проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.;

П. О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепіков, д-р техн. наук, проф.;

В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.;

О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.;

П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляєв, д-р техн. наук, проф.;

М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.;

М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

#### **Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Л. В. Ваврів, канд. фіз.-мат. наук, ст. наук. співр.

М. І. Баранов, д-р техн. наук, ст. наук. співр.; Н. І. Бойко, д-р техн. наук, проф.;

А. Г. Гурін, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Клименко, д-р техн. наук, проф.;

Г. М. Коліушко, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; В. М. Михайлов, д-р техн. наук, проф.;

В. В. Князев, канд. техн. наук, ст. наук. співр.; О.А. Серков, д-р техн. наук, проф.;

проф.; І. В. Яковенко, д-р фіз.-мат. наук, проф.

*У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», серія «Техніка та електрофізика високих напруг», включений у довідник періодичних видань бази даних **Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA)**.*

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».  
Протокол № 8 від 04 листопада 2016 р.

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCES OF UKRAINE  
National technical university  
"Kharkiv polytechnic institute"

**BULLETIN**  
**OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY**  
**"KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE"**

*Series: Technique and Electrophysics of High Voltage*

№ 36 (1208) 2016

Collected Works

The publication was founded in 1961

Kharkiv  
NTU "KhPI", 2016

**Bulletin of the National technical university " Kharkiv polytechnic institute".** Collected Works. Series: Techniques and Electrophysics of High Voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI". – 2016. – № 36 (1208). – 99 p.

State edition

Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy

KB № 5256 from July, 2, 2001

The collection is published on Ukrainian, Russian and English.

*The Bulletin of the National Technical University " Kharkiv polytechnic institute" is put on "The List of Scientific Professional Editions of Ukraine that publish the data of theses for the degree of candidate of sciences and the degree of doctor" approved by the Decision of the Certifying Board of the Ministry of Education and Science of Ukraine as to the Activities of Special Academic Councils of December 2015. Order No 1328 (Supplement No 8) of 21.12.2015.*

#### **Coordinating Board:**

L. L. Tovazhnyansky, Dr. Tech. Sci., Prof. (chief), member NAS of Ukraine;

K.A. Gorbunov, PhD. Tech.Sci., Assistant Prof. (secretary);

A. P.Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, Dr. Tech. Sci., Prof., member NAS of Ukraine;

Ye.Ye. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A.V. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

F.F. Gladkiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; M.D. Godlevskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A.I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.D. Dmitrienko, Dr. Tech. Sci.; Prof.; I.F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.V. Yepifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu.I. Zaytsev, PhD. Tech. Sci., Prof.;

P.O. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.V. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

V.I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G.V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.;

O.K. Morachkovskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.I. Nikolaenko, PhD. Hist. Sci., Prof.;

P.G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; V.A. Pulyaev, Dr. Tech. Sci., Prof.;

M.I. Rishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V.B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

G.M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof.; Yu.V. Timofeev, Dr. Tech. Sci., Prof.;

M.A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

#### **Editorial Board:**

V.I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof. (editor);

L.V. Vavriv, PhD. Phys.-Math. Sci., Senior Researcher (secretary);

M.I. Baranov, Dr. Tech. Sci., Senior Researcher; N.I. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.;

A.G. Gurin, Dr. Tech. Sci., Prof., B.V. Klimenko, Dr. Tech. Sci., Prof.,

G.M. Koliushko, PhD. Tech. Sci., Senior Researcher; V.M. Mishajlov, Dr. Tech. Sci., Prof.,

V.V. Knyaziev, PhD. Tech. Sci., Senior Researcher; O.A. Serkov, Dr. Tech. Sci., Prof.;

L.V. Yakovenko, Dr. Phys.-Math. Sci., Prof.

*In April 2013 Bulletin of the National Technical University "Kharkiv polytechnic institute" series "Techniques and Electrophysics of High Voltage" included in the directory database of periodicals "Uirich's Periodicals Directory" (New Jersey, USA).*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"

Protocol number 8 November, 04, 2016

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 публикации.** 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;  $\gamma_0$  и  $\sigma_0$  – начальные плотность и электропроводность металла;  $\lambda_{m,b}$  – удельные теплоты плавления и испарения.

Используя выражения (1) и (2), а также известные значения характеристик графита  $\gamma$ ,  $\sigma$ ,  $\lambda_m$  и  $\lambda_b$ , 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  $R^f_0 = R^0$ ;  $R_1 = A_1 R^0 (\beta_l + \alpha_l)$ ;  $R(t_f) = R_b$ ;

$A_1 = \frac{(I^0)^2 R^0}{mc_l}$ ;  $m$  – масса проводника;  $c_{s,l}$  – 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,  $\tau_m$  – 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]

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

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

$\zeta_a$  – 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).

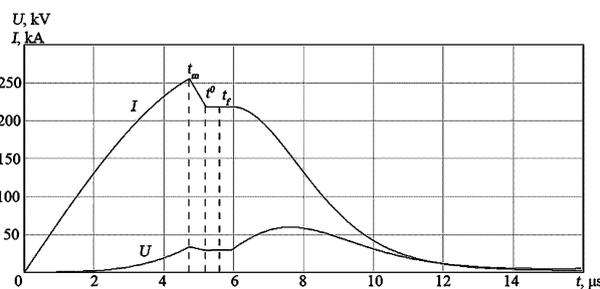


Рисунок 1 – Временные зависимости тока и напряжения

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.

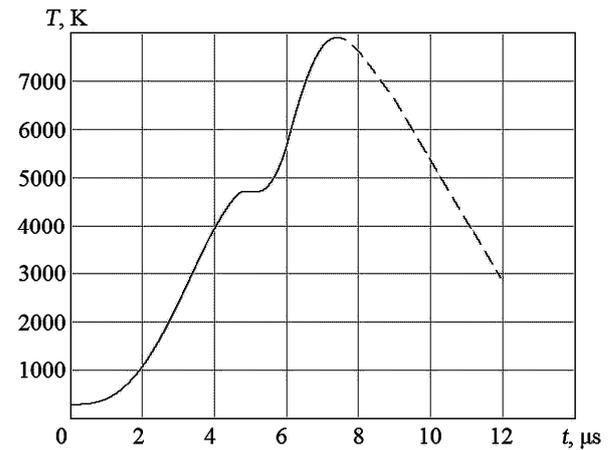


Рисунок 2 – Временная зависимость изменения температуры в процессе электровзрыва проводника

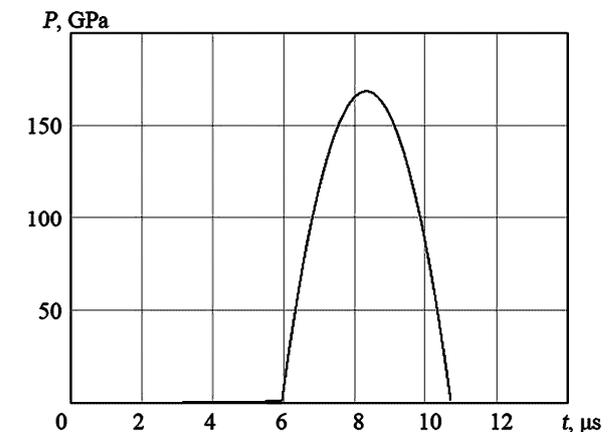


Рисунок 3 – Временная зависимость изменения давления в процессе электровзрыва проводника

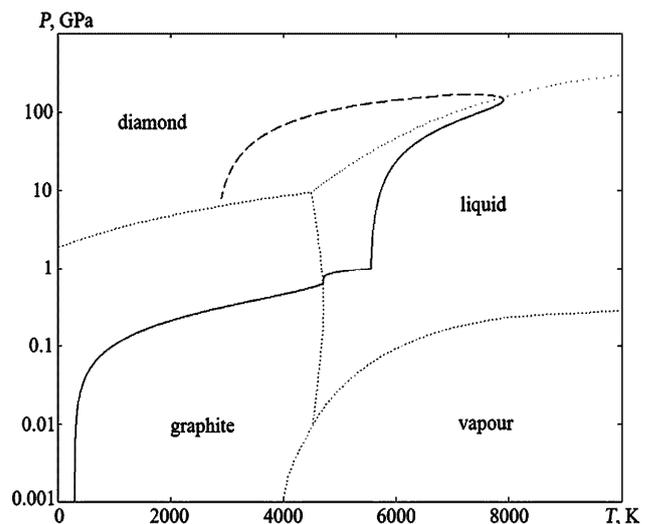


Рисунок 4 – Диаграмма состояния и фазовые траектории углерода для центральной части проводника

**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 elektrozryadnoho impul'su strumu z kondensovanoyu rechovynoyu: 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 elektrozryadnymi 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 нагрузки, 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.

The close results of theoretical research of the concerted mode of operations of homogeneous with dvumy send-offs long to impulses of electric voltage (current) and point electric load connected to it, placed in circumferential their isolating air environment are resulted. The new specified condition of concordance of this long line is formulated with the indicated electric loading, taking into account influence of impedance circumferential their air space on flowing of wave electromagnetic processes in the examined long air-track with connected to one of its ends electric loading, executed as the concentrated active resistance. Comparison of the got original results is executed on the specified concordance of long line with the electric loading with active resistance with known in this area foreign and domestic information.

**Key words:** homogeneous with dvumy send-offs long tl impulses of electric voltage (current); point electric load; impedance circumferential a long line and electric loading of air space; concerted mode of operations of long air-track with loading; specified condition of concordance of long line with the electric loading.

**Введение.** Длинные линии передачи (ДЛП) переменных (импульсных) электрических сигналов к подсоединенному в их конце оконечному устройству – электрической нагрузке (ЭН) нашли широкое применение в радиотехнике, технике сверхвысоких частот, электроэнергетике, электротехнике, радиоэлектронике и вычислительной технике, технике проводной электросвязи, измерительной технике, технике высоких напряжений, сильноточной электронике, технике сильных импульсных электромагнитных полей и технике больших импульсных токов [1-10]. Новой областью практического использования ДЛП в наиболее передовых по уровню развития науки и техники странах мира, обладающих ядерным (термоядерным) оружием, во второй половине 20-го века стали специальные высоковольтные испытательные электроустановки, моделирующие в воздушном пространстве мощный электромагнитный импульс (ЭМИ) ядерного взрыва (ЯВ), аperiodические импульсы напряженностей электрического и магнитного полей которого могут изменяться в нано- и микросекундном временных диапазонах [11-13]. При воспроизведении ЭМИ ЯВ, непосредственно воздействующего на испытываемую гражданскую и военную технику, в соответствующих электроустановках нашли применение многопроводные воздушные ДЛП с ЭН различного исполнения, габаритные геометрические размеры которых могли составлять десятки и сотни метров [11-14]. Для получения в ДЛП с ЭН требуемых соответствующими отечественными и зарубежными нормативными документами (стандартами и руководящими техническими материалами) амплитудно-временных параметров (АВП) необходим, как правило, их согласованный режим работы, обеспечивающий: во-первых, отсутствие отражений формируемых электрических сигналов (импульсов напряжения, тока и ЭМИ) от ЭН и, во-вторых, эффективные условия передачи по ДЛП электромагнитной энергии от ее мощного источника к ЭН. Согласно [1,2,7,11,15] для достижения такого режима работы ДЛП с ЭН должно выполняться классическое условие:

$$Z_B = Z_H, \quad (1)$$

где  $Z_B$ ,  $Z_H$  – соответственно волновое сопротивление ДЛП и полное сопротивление используемой в электрической цепи передачи электрического сигнала ЭН.

Из (1) при чисто активном сопротивлении ЭН, равном  $R_H$ , следует, что для согласования ДЛП с указанной нагрузкой должно выполняться соотношение вида  $Z_B = R_H$ . При практической реализации условия (1) специалисты обычно не учитывают влияния на характер протекания в ДЛП с ЭН волновых электро-

магнитных процессов волнового сопротивления  $Z_0$  изоляционного пространства, окружающего токопроводы ДЛП и ЭН. В этой связи выражение для коэффициента отражения  $K_{UI}$  импульсов напряжения (тока) в месте соединения ДЛП (при ее волновом сопротивлении  $Z_B$ ) с ЭН (при ее активном сопротивлении  $R_H$ ) имеет следующий широко известный в электротехнике аналитический вид [1,2,15]:

$$K_{UI} = (R_H - Z_B) / (R_H + Z_B). \quad (2)$$

Тогда из (2) для режима холостого хода (ХХ) в ДЛП (в случае, когда величина активного сопротивления  $R_H$  приобретает бесконечно большое значение) следует известное положение о том, что при режиме ХХ коэффициент отражения  $K_{UI}$  равен единице со знаком «плюс». Вот поэтому в этом случае амплитуда импульса напряжения в конце ДЛП увеличивается ровно в два раза [1, 2, 15]. Для режима короткого замыкания (КЗ) в ДЛП (в случае, когда величина активного сопротивления  $R_H$  приобретает бесконечно малое значение) из (2) находим, что коэффициент отражения  $K_{UI}$  равен единице со знаком «минус». В связи с этим в режиме КЗ амплитуда импульса напряжения в конце ДЛП становится равной нулю [1,2,15]. При согласованном режиме работы ДЛП с ЭН (в случае, когда выполняется равенство  $R_H = Z_B$ ) из (2) получаем, что коэффициент отражения  $K_{UI}$  будет равен нулю [1, 2, 15]. Тогда нам становится более понятным тот электрофизический факт, что в таком согласованном режиме функционирования однородной (неоднородной) ДЛП отраженные от ЭН импульсы напряжения (тока) отсутствуют. А раз так, то и никаких искажений передаваемого по ДЛП полезного электрического сигнала (импульсов напряжения, тока и напряженностей поперечного электромагнитного поля) с позиций классического подхода к согласованию ДЛП наблюдаться в этом режиме работы ДЛП с ЭН не будет.

А как влияет на описанные выше в определенной мере идеализированные с электрофизических позиций режимы работы ДЛП с включенной в одном из ее концов сосредоточенной ЭН волновое сопротивление  $Z_0$  изоляционного пространства? Ответа на этот вопрос в приведенных нами выше источниках [1-15] не содержится.

Целью статьи является приближенный учет влияния волнового сопротивления  $Z_0$  изоляционного пространства, окружающего ДЛП с распределенными электрическими параметрами и включенную в одном из ее концов ЭН, на согласование однородной ДЛП с ЭН, имеющей сосредоточенные электрические параметры.

**1. Постановка задачи по исследованию согласованного режима работы ДЛП с ЭН.** В рамках данного исследования рассмотрим однородную двухпроводную ДЛП с ЭН, реализованной в виде сосредоточенного активного сопротивления  $R_H$ . Примем, что в исследуемой ДЛП продольное активное сопротивление значительно меньше ее продольного индуктивного сопротивления, а поперечная активная проводимость изоляции для токов утечки существенно меньше ее поперечного емкостного сопротивления. С учетом указанных выше допущений считаем, что рассматриваемая однородная ДЛП без потерь энергии на рассеяние характеризуется волновым (характеристическим) сопротивлением, равным  $Z_B$  (рис. 1). В принятом нами случае величина  $Z_B$  может быть приближенно рассчитана по следующей формуле [1,15]:

$$Z_B = \sqrt{L_0 / C_0}, \quad (3)$$

где  $L_0, C_0$  – соответственно погонные значения индуктивности и емкости ДЛП, являющиеся распределенными электрическими параметрами по длине  $l_0$  линии.

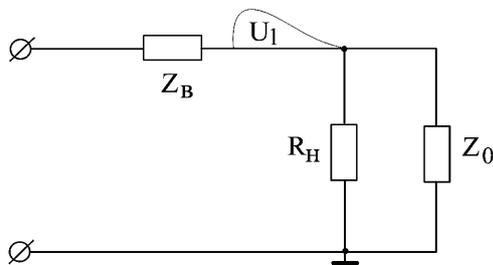


Рисунок 1 – Принципиальная электрическая схема однородной двухпроводной ДЛП с активным сопротивлением  $R_H$  сосредоточенной нагрузки, включенной в одном из ее концов ( $Z_B$  – волновое сопротивление ДЛП;  $Z_0$  – волновое сопротивление изоляционного воздушного пространства вокруг ДЛП и ЭН;  $U_1$  – амплитуда импульса напряжения, приходящего к ЭН)

Считаем, что одна из частей воздушной ДЛП (в нашем случае согласно рис. 1 ее левая часть) содержит источник импульсного напряжения (тока), а ее другая часть (в соответствии с рис. 1 ее правая часть) – приемник электромагнитной (тепловой) энергии в виде ЭН со сосредоточенными электрическими параметрами. Пусть по токопроводам ДЛП в продольном направлении распространяются волны электрического напряжения (тока), вызывающие появление вокруг них поперечных волн напряженностей переменного (импульсного) электрического и магнитного полей, движущихся вдоль ДЛП от ее источника напряжения (тока) к ЭН. Для определенности далее остановимся на волне напряжения и соответственно на волне напряженности поперечного электрического поля с вертикальной поляризацией, имеющей в воздушной среде длину, равную  $\lambda_E$ . По условиям рассматриваемой нами электротехнической задачи принимаем то допущение, что для исследуемой ДЛП выполняется следующее электродинамическое условие:  $\lambda_E < l_0$ . Данное условие будет свидетельствовать нам о том, что в исследуемой однородной двухпроводной линии с распределенными электрическими параметрами  $L_0$  и  $C_0$ , в одном из кон-

цов которой включена ЭН со сосредоточенным активным сопротивлением  $R_H$ , возможно протекание волновых электромагнитных процессов [1-5]. Требуется выполнить в электрической цепи рассматриваемой однородной ДЛП с указанной ЭН (см. рис. 1) приближенный учет влияния волнового сопротивления  $Z_0$  воздушной среды на протекающие в ней (этой цепи) волновые электромагнитные процессы.

**2. Основные расчетные соотношения для уточненного согласования ДЛП с ЭН.** Используя (1) и данные рис. 1, нам можно сформулировать следующее *уточненное условие согласованного режима работы* исследуемой воздушной ДЛП со сосредоточенной ЭН, содержащей в этом случае активное сопротивление  $R_H$ :

$$Z_B = R_H Z_0 / (R_H + Z_0). \quad (4)$$

Тогда из (4) для величины активного сопротивления  $R_H$ , подключаемого в конце исследуемой воздушной ДЛП при ее согласованном режиме работы с принятой ЭН, получаем следующее расчетное соотношение:

$$R_H = Z_0 Z_B / (Z_0 - Z_B). \quad (5)$$

Из (5) при выполнении неравенства вида  $Z_B \ll Z_0$  вытекает ранее приведенное нами классическое условие (1) для согласования рассматриваемой воздушной ДЛП со сосредоточенной ЭН, имеющее следующий канонический вид:  $R_H = Z_B$ . Это может косвенно указывать на достоверность предлагаемого условия (4) для уточненного согласования исследуемой воздушной ДЛП с ЭН.

Что касается коэффициента отражения  $K_{UI}$  формируемых импульсов напряжения (тока) в электрической цепи рассматриваемой воздушной ДЛП от сосредоточенной и чисто активной ЭН при предлагаемом подходе ее (линии) согласованного режима работы, то для него с учетом (2) и (5) в приближенном виде можно записать следующее расчетное аналитическое соотношение:

$$K_{UI} = [R_H (Z_0 - Z_B) - Z_0 Z_B] / [R_H (Z_0 + Z_B) + Z_0 Z_B]^{-1}. \quad (6)$$

Из (6) следует, что в частном случае, когда специалисты в соответствующей области импульсной техники значение активного сопротивления  $R_H$  нагрузки выбирают из общепринятого классического условия  $R_H = Z_B$ , выражение для расчетного коэффициента отражения  $K_{UI}$  волн напряжения (тока) в месте состыковки исследуемой ДЛП с принятой ЭН принимает следующий вид:

$$K_{UI} = -Z_B / (2Z_0 + Z_B). \quad (7)$$

Из (7) видно, что при подобном расчетном выборе значения активного сопротивления  $R_H = Z_B$  сосредоточенной ЭН даже учет влияния волнового сопротивления  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$  воздушного пространства на протекание волновых электромагнитных процессов в электрической цепи рассматриваемой ДЛП с достаточно распространенной на практике омической нагрузкой не обеспечивает хорошего согласования исследуемой линии. Беглый анализ приведенного соотношения (7) показывает, что в этом случае (например, при  $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ) переколебания на

«столе» формируемого импульса напряжения (тока) за счет отражения падающих электромагнитных волн от подобной ЭН могут достигать 9 %.

Из (6) следует, что при расчетном выборе значения активного сопротивления  $R_H$  подключенной в конце однородной двухпроводной воздушной ДЛП нагрузки в соответствии с (5) обеспечивается требуемое согласование ДЛП с ее ЭН. В данном случае согласно (6) коэффициент отражения  $K_{UI}$  волн напряжения (тока) от места подсоединения ЭН к ДЛП будет точно равным нулю.

Для режима ХХ исследуемой воздушной ДЛП, когда  $R_H \gg Z_0$ , а нагрузочное сопротивление линии для электромагнитных волн в краевой зоне размещения ЭН стремится к значению волнового сопротивления  $Z_0$  воздушного пространства, из (6) для коэффициента отражения  $K_{UI}$  волн напряжения (тока) от разомкнутого конца ДЛП следует следующее расчетное соотношение:

$$K_{UI} = (Z_0 - Z_B) / (Z_0 + Z_B). \quad (8)$$

При поверхностном анализе формулы (8) на этом этапе теоретического исследования ограничимся электротехническим случаем, когда  $Z_0 \gg Z_B$ . При этом из (8) следует, что рассматриваемый коэффициент отражения принимает численное значение, равное примерно  $K_{UI} \approx 1$ .

Для режима КЗ исследуемой воздушной ДЛП, когда значение активного сопротивления  $R_H$  стремится к нулю, из (6) вытекает, что указанный коэффициент отражения волн напряжения (тока) от замкнутого накоротко конца такой воздушной ДЛП в этом предельном (экстремальном) случае принимает численное значение, равное  $K_{UI} = -1$ . Приведенные нами выше электротехнические данные по предельным режимам работы рассматриваемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП и соответствующим переходам в (6) исследуемых электрических параметров  $Z_B$ ,  $R_H$  и  $Z_0$  указывают на достоверность этого полученного приближенного расчетного соотношения для коэффициента отражения  $K_{UI}$  импульсов напряжения (тока) в зоне сосредоточенной ЭН, учитывающего влияние на волновые электромагнитные процессы в линии волнового сопротивления  $Z_0$  изоляционной воздушной среды, окружающей металлические токопроводы ДЛП и элементы омической ЭН.

**3. Некоторые оценочные результаты при использовании предложенного электродинамического подхода к согласованию воздушной ДЛП с активной ЭН.** Используя представленные выше во вводной части и разделе 2 этой работы приближенные расчетные соотношения, выполним для ряда частных случаев практической реализации электрических схем формирования коротких волн напряжения (тока) количественную оценку результатов согласования рассматриваемой воздушной ДЛП со сосредоточенной омической ЭН по известному классическому и предлагаемому подходам.

**3.1. Расчетные результаты выбора омического сопротивления  $R_H$  нагрузки для ДЛП с волновым сопротивлением  $Z_B$ .** Для этого вначале остановимся

на простейшей однородной двухпроводной воздушной ДЛП, характеризующейся волновым сопротивлением, равным  $Z_B = 75$  Ом, подключенной на одном из своих концов к ЭН с чисто омическим сопротивлением  $R_H$ . Пусть по тонким медным токопроводам данной ДЛП длиной  $l_0 = 50$  м в их продольном направлении распространяются волны напряжения (тока) аperiодической временной формы и соответственно вблизи них в воздухе (газовом диэлектрике) поперечные электромагнитные ТЕМ-волны, имеющие в окружающей указанные медные провода воздушной среде длины, примерно равные  $\lambda_E = c \cdot \tau_p = 3 \cdot 10^8$  м/с  $\times$   $50 \cdot 10^{-9}$  с = 15 м, где  $c$ ,  $\tau_p$  – соответственно скорость распространения электромагнитного поля в воздухе и длительность формируемых импульсов напряжения (тока) или электромагнитных ТЕМ-волн на их полуспаде. Так как в нашем случае  $\lambda_E < l_0$ , то в рассматриваемой воздушной ДЛП будут протекать волновые электромагнитные процессы, требующие для получения в рабочем воздушном объеме на участке ДЛП длиной  $l_0$  неискаженного из-за отражения от используемой омической нагрузки ЭМИ заданных АВП соответствующего согласования между величинами  $Z_B$  и  $R_H$ . Согласно классическому принципу согласования указанной ДЛП с омической ЭН и в соответствии с (1) активное сопротивление используемой в этом случае нагрузки должно численно составлять величину, равную  $R_H = 75$  Ом. Напомним, что такой количественный выбор величины  $R_H$  не учитывает влияния воздушной среды, окружающей ДЛП и ЭН и характеризующейся волновым сопротивлением  $Z_0 = 120\pi$  Ом  $\approx$  377 Ом.

По предлагаемому же принципу согласования рассматриваемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП ( $Z_B = 75$  Ом) с омической ЭН и в соответствии с (5) величина активного сопротивления используемой при этом сосредоточенной нагрузки должна численно составлять около  $R_H = 93,7$  Ом. Как видим, для рассматриваемого нами электротехнического случая различие между численными значениями величины активного сопротивления  $R_H$  согласующей нагрузки, найденными по известному классическому согласно [1, 2, 7, 11, 15] и предлагаемому нами подходам составляет примерно 25 %. Следует заметить то, что при расчетном выборе величины активного сопротивления ЭН по предлагаемому уточненному принципу согласования ДЛП с ЭН имеет место следующее неравенство:  $R_H > Z_B$ . Данное неравенство указывает на то, что при таком выборе величины  $R_H$  на «столе» формируемого в ДЛП аperiодического ЭМИ будут отсутствовать наложенные колебания [1,2].

**3.2. Расчетные оценки коэффициента отражения  $K_{UI}$  волн в ДЛП с ЭН.** Далее свое внимание более пристально обратим на расчетные соотношения (6) и (8), определяющие для нового принципа согласования исследуемой однородной ДЛП с омической ЭН значения коэффициента отражения  $K_{UI}$  волн напряжения (тока) и соответственно поперечных электромагнитных ТЕМ-волн от конца линии, подключаемой к нагрузке. Из (6) для принятых нами в подразделе 3.1

исходных данных ( $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ;  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$ ) при  $R_H = 75 \text{ Ом}$  находим, что в данном электротехническом случае, численный выбор основных электрических параметров для которого базировался на известном классическом подходе согласно [1, 2, 7, 11, 15] по согласованию однородной двухпроводной воздушной ДЛП с ее омической ЭН, даже при учете влияния на волновые электромагнитные процессы волнового сопротивления  $Z_0$  воздушного пространства величина коэффициента отражения численно составляет примерно  $K_{UI} \approx -0,09$ . Такое количественное значение величины  $K_{UI}$  для рассматриваемого случая однозначно указывает на наличие переколебаний на «столе» импульсов напряжения (тока) и соответственно формируемых в ДЛП электромагнитных ТЕМ-волн с амплитудой не менее 9 % от амплитуды основного подходящего от линии к ЭН полезного электрического сигнала. Одновременно из (6) при указанных исходных данных ( $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ;  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$ ) и при  $R_H = 93,7 \text{ Ом}$ , определенном по (5), следует, что в этом электротехническом случае, базирующемся на предлагаемом оригинальном подходе по согласованию исследуемой воздушной ДЛП с омической ЭН, величина коэффициента отражения  $K_{UI}$  практически приближается к нулю.

Из расчетной формулы (8) в режиме ХХ принятой для численных оценок вторичных электрических параметров однородной двухпроводной воздушной ДЛП ( $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ;  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$ ) получаем, что в этом предельном режиме функционирования ДЛП рассматриваемый коэффициент отражения от разомкнутого конца линии импульсов напряжения (тока) и соответственно напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн будет численно составлять около  $K_{UI} \approx 0,67$ . В результате такого количественного значения величины коэффициента отражения  $K_{UI}$  амплитуда возникающего в этом режиме работы указанной линии перенапряжения в конце ДЛП будет достигать численного значения, не превышающего  $1,67 \cdot U_i$ , где  $U_i$  – амплитуда подходящей от источника напряжения (тока) к разомкнутому концу воздушной ДЛП падающей волны напряжения (тока) и соответственно амплитуды напряженностей набегающей на разомкнутый конец линии поперечной электромагнитной ТЕМ-волны. Здесь следует указать то одно важное и известное в практике эксплуатации ДЛП с ЭН, имеющими сосредоточенные электрические параметры, электрофизическое обстоятельство, что именно такие уровни перенапряжений (а не уровни, равные  $2U_i$  по соотношению (2) согласно классическим представлениям в области теории волновых электромагнитных процессов в однородной ДЛП с омической ЭН) реально и наблюдаются для режима ХХ в однородных двухпроводных ДЛП в практических электротехнических случаях (в частности, при  $Z_B=75 \text{ Ом}$ ), упомянутых в указанных выше литературных источниках [1-10].

**Выводы.** 1. Предложен новый принцип согласования однородной двухпроводной воздушной ДЛП с ЭН, имеющей сосредоточенные электрические параметры. Предложенный подход к реализации согласо-

ванного режима работы указанной ДЛП, на одном из концов которой подключена согласующая нагрузка, учитывает влияние окружающего линию и нагрузку волнового сопротивления  $Z_0$  воздушного пространства на протекающие в них волновые электромагнитные процессы.

2. Получены основные приближенные аналитические соотношения (4)-(8), позволяющие при заданных первичных и вторичных электрических параметрах исследуемой однородной воздушной ДЛП осуществлять необходимый выбор сосредоточенных электрических параметров подключенной к ней чисто омической ЭН, обеспечивающих согласованный режим работы данной линии передачи импульсов напряжения, тока и напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн.

3. Расчетным путем показано, что известный классический принцип согласования рассматриваемой воздушной ДЛП, характеризующейся волновым сопротивлением  $Z_B$ , с чисто омической нагрузкой, имеющей активное сопротивление  $R_H$ , когда используется известное в электротехнике условие  $R_H = Z_B$ , из-за влияния на протекающие в ДЛП и ЭН волновые электромагнитные процессы волнового сопротивления  $Z_0=120\pi \text{ Ом}$  воздушной среды не обеспечивает хорошего согласования ДЛП с омической ЭН. В этом исследуемом случае численное значение активного сопротивления  $R_H$  чисто омической сосредоточенной нагрузки оказывается заниженным на величину до 25 %, а рассогласование воздушной ДЛП с подобной ЭН приводит к наличию переколебаний на «столе» формируемых в рабочем воздушном объеме рассматриваемой однородной линии импульсов напряжения (тока) и соответственно напряженностей поперечных электромагнитных ТЕМ-волн.

4. Впервые на основе приближенного электродинамического расчета установлено, что в исследуемой однородной двухпроводной воздушной ДЛП ( $Z_B = 75 \text{ Ом}$ ;  $Z_0 = 120\pi \text{ Ом} \approx 377 \text{ Ом}$ ) при ее работе в режиме ХХ амплитуда перенапряжения на ее разомкнутом конце не может превышать численного значения  $1,67 \cdot U_i$ , а не уровня  $2U_i$  (двойной амплитуды  $U_i$  приходящего от используемого в ДЛП источника электромагнитной энергии к концу используемой линии импульса напряжения) согласно классической теории волновых электромагнитных процессов в электрических цепях с распределенными электрическими параметрами.

5. Приведенные расчетные данные для согласования однородной двухпроводной воздушной ДЛП с чисто омической ЭН могут быть при незначительной доработке представленного расчетно-аналитического материала соответствующим образом распространены на иные ДЛП (например, на кабельные линии передачи импульсных электрических сигналов с полиэтиленовой изоляцией, широко применяемые в радиотехнике, электротехнике и технике высоких напряжений) и ЭН.

#### Список литературы

1. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами / С.И. Баскаков. – М.: Высшая школа, 1980. – 152 с.

2. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ / А.Д. Григорьев. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.
3. Рюденберг Р. Переходные процессы в электроэнергетических системах / Р.Рюденберг. – М.: Изд-во иностр. лит., 1955. – 714 с.
4. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники. Том 1 / Л.Р. Нейман, Л.Р. Демирчян. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с.
5. Справочник по теоретическим основам радиоэлектроники / Под ред. Б.Х. Кривицкого, В.Н. Дулина. Том 1. – М.: Энергия, 1977. – 504 с.
6. Техника высоких напряжений / Под ред. М.В. Костенко. – М.: Высшая школа, 1973. – 528 с.
7. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов / Г.А. Месяц. – М.: Сов. радио, 1974. – 256 с.
8. Кремнев В.В. Методы умножения и трансформации импульсов в силовой электронике / В.В. Кремнев, Г.А. Кремнев. – Новосибирск: Наука, 1987. – 226 с.
9. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / Под ред. В.С. Комелькова. – М.: Атомиздат, 1970. – 472 с.
10. Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля / Г. Кнопфель. – М.: Мир, 1972. – 391 с.
11. Рикетс Л.У. Электромагнитный импульс и методы защиты / Л.У. Рикетс, Дж.Э. Бриджес, Дж. Майлетта. Пер. с англ. под ред. Н.А. Ухина. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
12. Мырова Л.О. Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям / Л.О. Мырова, А.З. Чепиженко. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с.
13. Баранов М.И. Приближенный расчет нестационарных процессов при разряде коаксиальной формирующей линии на многопроводную воздушную линию / М.И. Баранов, С.А. Кузнецов // Электричество. – 1992. – № 12. – С.14–22.
14. Баранов М.И. Переходные процессы при воздействии больших импульсных токов и сильных импульсных магнитных полей на проводящие объекты / М.И. Баранов. Рукопись дисс. на соиск. уч. степени доктора техн. наук. – Х.: НТУ «ХПИ», 1999. – 380 с.
15. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы / З.Г. Каганов. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. Baskakov S.I. Radiotekhnicheskie cipi s raspredelennymi parametrami. Moscow: Vysshaja shkola, 1980, 152 p.
2. Grigor'ev A.D. Elektrodinamika i tehnika SVCh. Moscow: Vysshaja shkola, 1990, 335 p.
3. Rjudenberg R. Pehodnye processy v elektroenergeticheskikh sistemah. Moscow: Izd-vo inostr. lit., 1955, 714 p.
4. Nejman L.R., Demirchjan K.S. Teoreticheskie osnovy elektrotehniki, Tom 1. Leningrad: Energoizdat, 1981, 536 p.
5. Spravochnik po teoreticheskim osnovam radioelektroniki / Pod red. B.Kh. Krivitskogo, V.N. Dulina. Tom 1. Moscow: Energija, 1977, 504 p.
6. Tehnika vysokih naprjazhenij / Pod red. M.V. Kostenko. Moscow: Vysshaja shkola, 1973, 528 p.
7. Mesjats G.A. Generirovanie moshhnyh nanosekundnyh impul'sov. Moscow: Sov. radio, 1974, 256 p.
8. Kremnev V.V., Mesjats G.A. Metody umnozhenija i transformacii impul'sov v sil'notochnoj elektronike. Novosibirsk: Nauka, 1987, 226 p.
9. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej / Pod red. V.S. Komel'kova. Moscow: Atomizdat, 1970, 472 p.
10. Knopfel' G. Sverhsil'nye impul'snye magnitnye polja. Moscow: Mir, 1972, 391 p.
11. Rikets L.W., Bridzhes J.E., Majletta J. Elektromagnitnyj impul's i metody zashchity / Per. s engl. pod red. N.A. Uhina. Moscow: Atomizdat, 1979, 328 p.
12. Myrova L.O., Chepizhenko A.Z. Obespechenie stojkosti apparatury svjazi k ionizirujushhim i elektromagnitnym izluchenijam. Moscow: Radio i svjaz', 1988, 296 p.
13. Baranov M.I., Kuznetsov S.A. Priblizhennyj raschet nestacionarnykh processov pri razrjade koaksial'noj formirujushhej linii na mnogoprovodnuju vozdušnuju liniju. Elektrichestvo, 1992, No 12, pp.14–22.
14. Baranov M.I. Pehodnye processy pri vozdejstvii bol'shih impul'snyh tokov i sil'nyh impul'snyh magnitnyh polej na provodjashchie ob'ekty / Rukopis' diss. na soisk. uch. stepeni doktora tehn. nauk. Kharkiv: NTU «KhPI», 1999, 380 p.
15. Kaganov Z.G. Elektricheskie cipi s raspredelennymi parametrami i cepnye shemy. Moscow: Energoatomizdat, 1990, 248 p.

*Поступила (received) 14.09.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Новий принцип узгодження довгої лінії передачі імпульсів електричної напруги і струму з навантаженням / М.І. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 9-14. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Новый принцип согласования длинной линии передачи импульсов электрического напряжения и тока с нагрузкой / М.И. Баранов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 9-14. – Бібліогр.: 15 назв. – ISSN 2079-0740.**

**New principle of concordance of long tl impulses of electric voltage and current with loading / M.I. Baranov // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 9-14. – Bibliogr.: 15. – ISSN 2079-0740.**

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

**Баранов Михайло Іванович** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, головний науковий співробітник Науково-дослідницького і проектно-конструкторського інституту «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

**Баранов Михаил Иванович** – доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния» Национального технического университета «ХПІ», тел.: (057) 707-68-41; e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

**Baranov Michail Ivanovich** – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Main Researcher Research & Design Institute «Molniya» of National Technical University «KhPI», tel.: (057) 707-68-41, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua.

УДК 681.51 + 621.314.5

**Д. В. ВІННИЧЕНКО****ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ ВИСОКОВОЛЬТНОГО ВИПРЯМЛЯЧА ЗАРЯДНОГО ПРИСТРОЮ В ГЕНЕРАТОРАХ ІМПУЛЬСНИХ СТРУМІВ**

Від надійності роботи зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії залежить робота ЕП установок в цілому. Одним з небажаних процесів, що можуть виникати в ГПС є протікання частини розрядного струму крізь діоди високовольтного випрямляча зарядного пристрою, під час дії зворотної напівхвилі напруги на конденсаторі розрядного контуру при коливальному характері його розряду. В роботі вирішено задачу точного розрахунку ударного струму високовольтного випрямляча зарядного пристрою генераторів імпульсних струмів, а також параметрів елементів його захисту.

**Ключові слова:** зарядний пристрій, захисна індуктивність, ударний струм, генератор імпульсних струмів, високовольтний випрямляч.

От надежности работы зарядных устройств емкостных накопителей энергии зависит работа ЭП установок в целом. Одним из нежелательных процессов, которые могут возникать в ГИТ - протекание части разрядного тока через диоды высоковольтного выпрямителя зарядного устройства, во время действия обратной полуволны напряжения на конденсаторе разрядного контура при колебательном характере его разряда. В работе решена задача точного расчета ударного тока высоковольтного выпрямителя зарядного устройства генераторов импульсных токов, а также параметров элементов его защиты.

**Ключевые слова:** зарядное устройство, защитная индуктивность, ударный ток, генератор импульсных токов, высоковольтный выпрямитель.

Pulse currents generators is the main component of electric-discharge and electro-technological installations for various industrial applications. It is electrohydropulse presses and grinders, installation materials forming, metal shock treatment, technological devices of intensification of oil and gas, power laser systems, and others. In most cases, as energy stores, in capacitive energy storage, and at the heart of the process is intense release of energy stored in the capacitor in the load, which may be in the discharge fluid channel, an inductor, flash lamps, liquid metal conductor. From the reliability of the chargers capacitive energy storage pulse current generators depends electrohydropulse work units as a whole. One of the unwanted processes which may occur in the pulse current generators - the flow of the discharge current through the rectifier diodes, high-voltage battery charger, during the flow of the negative half-wave voltage on the capacitor discharge circuit at the resonant nature of his discharge. This current is limited only by the active resistance of the diode is open. The paper solved the problem of accurate calculation of impact of current high-voltage rectifier charger pulse current generators, as well as the parameters of the elements of his defense.

**Keywords:** charger device, protective inductance, pulse current, pulse current generator, high voltage rectifier.

**Вступ.** Генератори імпульсних струмів (ГПС) є основною складовою електророзрядних (ЕР) та електродіодіімпульсних (ЕП) технологічних установок різного промислового призначення. Це ЕП преси та подрібнювачі, установки обробки матеріалів тиском, обробки металів струмом, технологічні апарати інтенсифікації видобутку нафти та газу, джерела живлення лазерних установок та ін. [1]. В більшості випадків, як накопичувачі енергії, використовуються високовольтні ємнісні накопичувачі енергії (СНЕ) (високовольтні конденсатори), а в основі технологічного процесу лежить інтенсивне виділення накопиченої в конденсаторі енергії в навантаженні, яким може бути канал розряду в рідині, індуктор, імпульсні лампи, рідкий металевий провідник. Тому від надійності роботи зарядних пристроїв ємнісних накопичувачів енергії залежить робота ЕП установки в цілому.

Одним з небажаних процесів, що можуть виникати в ГПС є протікання частини розрядного струму крізь діоди високовольтного випрямляча зарядного пристрою, під час дії зворотної напівхвилі напруги на конденсаторі розрядного контуру при коливальному характері його розряду. Цей струм обмежено тільки активним опором діодів в відкритому стані (що складає від 2 до 25 Ом) та при амплітуді зворотної напівхвилі напруги близько, наприклад, 10 кВ може сягати 500 А, що звичайно набагато більше ніж допустимий

імпульсний, а тим паче, робочий струм випрямляча і призводить до виходу його діодів з ладу. Для захисту високовольтного випрямляча від ударного струму використовують струмообмежуючі елементи, які підключають між випрямлячем та силовим конденсатором. Зазвичай використовуються струмообмежуючий опір (активне струмообмеження) та струмообмежуюча індуктивність (реактивне струмообмеження). Але розрахунок за методиками [2, 3] не дає достовірного результату, бо не враховує залежність від параметрів і електротехнічних процесів в розрядному контурі. Якщо розглянути методику [2], то у вхідних даних для розрахунку немає навіть величини зарядної напруги силового конденсатору, у самій методиці не розраховується величина індуктивності захисного реактору. Але в ній приводиться непоганий тепловий розрахунок.

В методиці [3] індуктивність струмообмежуючого реактору розраховується:

$$L_p = \frac{X_L}{\omega_p} = \frac{X_L}{2\pi f_p},$$

де  $f_p$  – частота розрядного струму;  $X_L$  – величина струмообмежуючого реактивного опору,  $X_L = U_0 / I_p$ , де  $U_0$  – робоча напруга на ємнісному накопичувачі;  $I_p$  – максимальний струм крізь діоди випрямляча. Ця методика точніша за [2], але не враховує ані декременту

затухання, ані амплітуди зворотної напівхвилі напруги, не до кінця зрозуміло як розраховується  $f_p$ .

В посібнику [4] коротко наведено розрахунок як захисного опору так і реактору. Величину струмообмежуючого опору розраховують за виразом:

$$R_p = \frac{U_0}{I_{rm}}, \text{ де } I_{rm} - \text{ допустима амплітуда поодинокого}$$

імпульсу струму. Величину індуктивності струмообмежуючого реактору розраховують:  $L_p = \frac{2U_0}{\omega I_{rm}}$ , де  $\omega$  – кругова частота, яку визначають з виразу  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ .

Цій методиці наявні недоліки попередньої, але більш точно наведено розрахунок частоти  $\omega$ .

Тому більш глибоке вивчення перебігу електротехнічних процесів в контурі захисту високовольтного випрямляча, уточнення та розвиток існуючих методик розрахунку захисних струмообмежуючих елементів генераторів імпульсних струмів з ємнісним накопичувачем енергії є актуальною задачею.

**Метою роботи** є уточнення існуючих методик розрахунку захисних елементів генераторів імпульсних струмів з ємнісним накопичувачем енергії шляхом більш глибокого вивчення перебігу електротехнічних процесів в захисному контурі високовольтного випрямляча в залежності від процесів в силовому розрядному контурі.

**Матеріали дослідження.** На рис. 1, а наведено спрощену схему ГС, який складається з зарядного пристрою (ЗП) та силового розрядного контуру (РК) та показано форму напруги на силовому конденсаторі (рис. 1, б) [5-6].

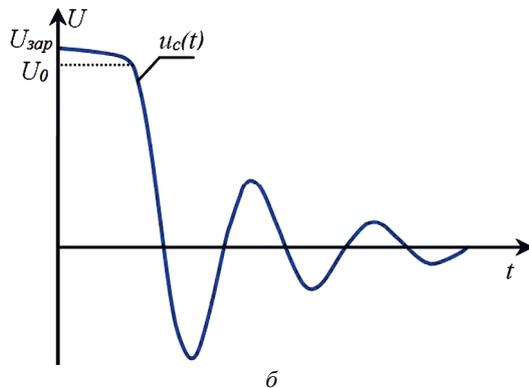
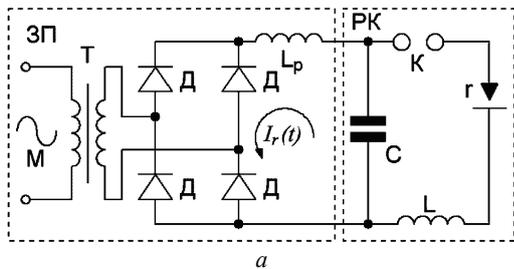


Рисунок 1 – Спрощена схема генератора імпульсних струмів (а) та форма напруги на конденсаторі (б)

Неприпустимо великий імпульс струму крізь діоди Д вихідного високовольтного випрямляча зарядно-

го пристрою може виникнути при дії на нього зворотної напівхвилі напруги на силовому конденсаторі, тому що вона зміщує діоди Д у прямому напрямку. Величина амплітуди цього струму може бути в декілька разів вища за номінальне значення робочого струму та обмежується лише активним опором самих діодів. Тому, зазвичай, для захисту високовольтного випрямляча від ударного струму використовують струмообмежуючі елементи, які підключають між випрямлячем та силовим конденсатором. На рис. 1, а, наприклад, показано струмообмежуючу індуктивність  $L_p$ . При аперіодичному характері розряду ємнісного накопичувача енергії такої проблеми не виникає [7-9], тому що напруга на ньому не змінює свого знаку, немає зворотної напівхвилі цієї напруги. Отже можна зробити висновок, що коливальний режим розряду силового конденсатора (рис. 1, б) є небезпечним для діодів високовольтного випрямляча, якщо не прийняти заходів захисту їх від дії зворотних напівхвиль напруги. За другим законом Кірхгофа напруги на всіх елементах силового розрядного контуру РК (рис. 1, а) в нерозгалуженому колі взаємно врівноважуються, тому рівняння кола можна записати у вигляді:

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{r}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{LC} i = 0, \quad (1)$$

де  $r, L, C$ , відповідно опір навантаження, індуктивність контуру, ємність силового конденсатора. При коливальному режимі розряду корні характеристичного рівняння  $p_{1,2} = -r/2L \pm \sqrt{r^2/4L^2 - 1/LC}$  мають бути комплексними (за умови  $r < 2\sqrt{L/C}$ ), якщо  $\alpha = r/2L$  та  $\omega = 1/\sqrt{LC}$ , то частота коливань визначається як  $\omega_0 = \sqrt{1/LC - r^2/4L^2} = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}$ , корні рівняння  $p_{1,2} = -\alpha \pm j\omega_0$ . Період коливань силового контуру  $T_0 = 2\pi/\omega_0$ . Рішенням диференційного рівняння (1) при комплексних корнях відносно напруги на конденсаторі буде

$$u_c(t) = \frac{U_0}{\sin \chi} e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 t + \chi), \quad (2)$$

де  $U_0$  – напруга на конденсаторі на початку процесу розряду;  $\chi$  – початкова фаза між струмом в розрядному контурі та напругою на конденсаторі  $\sin \chi = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}$ ;  $\alpha = r/2L$  – лінійний коефіцієнт затухання.

На практиці зручно замість лінійного коефіцієнту затухання  $\alpha = r/2L$  використовувати декремент затухання  $D$ , який визначається як:

$$D = \frac{u_c(t)}{u_c(t+T_0)} = e^{\alpha T_0}. \quad (3)$$

Виразимо лінійний коефіцієнт затухання з (3) через декремент затухання:

$$\alpha = \frac{\ln D}{T_0}; \ln D = \lambda; \alpha = \frac{\lambda}{T_0}, \quad (4)$$

де  $\lambda = \ln D$  – логарифмічний декремент затухання.

Тоді, якщо  $T_0 = 2\pi / \omega_0$ ,  $\omega_0 = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}$  визначимо  $\alpha$ :

$$\frac{\lambda}{\alpha} = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega^2 - \alpha^2}}; \quad (5)$$

$$\alpha = \omega\lambda\sqrt{4\pi^2 + \lambda^2}. \quad (6)$$

Проведемо аналіз електротехнічних процесів в колі захисту високовольтного випрямляча ЗП ЄНЕ при реактивному струмообмеженні, тобто коли захисним елементом виступає струмообмежуюча індуктивність  $L_p$  (див. рис. 1, а). На рис. 2 показано перебіг електротехнічних процесів в колі захисту високовольтного випрямляча ЗП ЄНЕ.

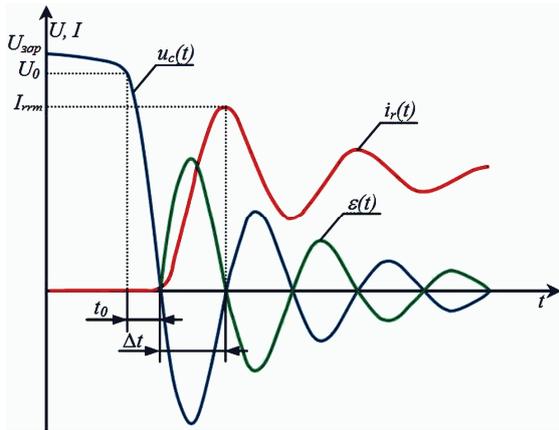


Рисунок 2 – Перебіг електротехнічних процесів в колі захисту високовольтного випрямляча ЗП ЄНЕ

Визначимо момент часу  $t_0$  початку протікання струму  $i_r(t)$  крізь діоди випрямляча:

$$t_0 = \frac{\pi - \chi}{\omega_0} = \frac{\pi - \arctg(\frac{\omega_0}{\alpha})}{\omega_0}. \quad (7)$$

Введемо величину  $\varepsilon(t)$  – напругу безпосередньо прикладену до зміщених в прямому напрямку діодів Д (рис. 2):

$$\varepsilon(t) = -u_c(t + t_0) = U_m e^{-\alpha(t+t_0)} \sin \omega_0 t. \quad (8)$$

Струм  $i_r(t)$  визначимо:

$$i_r(t) = \frac{1}{L_p} \int \varepsilon(t) dt = \frac{1}{L_p} \int U_m e^{-\alpha(t+t_0)} \sin \omega_0 t dt = \frac{U_m e^{-\alpha(t+t_0)}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)} (-\alpha \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t) + A, \quad (9)$$

де  $A$  – постійна інтегрування, яку визначимо з початкових умов кола  $t = 0$ ;  $i_r(0) = 0$ , тоді:

$$\frac{U_m e^{-\alpha t_0}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)} (-\alpha \sin 0 - \omega_0 \cos 0) + A = 0; A = \frac{U_m \omega_0 e^{-\alpha t_0}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)}.$$

Остаточний вираз для струму:

$$i_r(t) = \frac{U_m e^{-\alpha(t+t_0)}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)} (-\alpha \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t) + \frac{U_m \omega_0 e^{-\alpha t_0}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)} = \frac{U_m \omega_0 e^{-\alpha t_0}}{L_p (\alpha^2 + \omega_0^2)} \left( \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_0} (-\alpha \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t) + 1 \right). \quad (10)$$

Якщо  $U_m = \frac{U_0}{\sin \chi}$ ;  $\sin \chi = \frac{\omega_0}{\sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}}$ , тоді:

$$i_r(t) = \frac{U_0 e^{-\alpha t}}{L_p \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} \left( \frac{e^{-\alpha t}}{\omega_0} (-\alpha \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t) + 1 \right). \quad (11)$$

Ударний струм діодів  $I_{rrm}$  є амплітудне значення струму  $i_r(t)$ . Визначимо час зростання  $\Delta t$  струму  $i_r(t)$  до максимальної величини. Вираз  $-\alpha \sin \omega_0 t - \omega_0 \cos \omega_0 t$  набуває найбільшого значення при  $\Delta t = t = \frac{\pi}{\omega_0}$ . Ударний струм визначимо:

$$I_{rrm} = \frac{U_0 e^{-\alpha \Delta t}}{L_p \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} \left( \frac{e^{-\alpha \Delta t}}{\omega_0} (-\alpha \sin \omega_0 \Delta t - \omega_0 \cos \omega_0 \Delta t) + 1 \right) = \frac{U_0 e^{-\alpha \Delta t}}{L_p \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} \left( \frac{e^{-\alpha \Delta t}}{\omega_0} (-\alpha \sin \pi - \omega_0 \cos \pi) + 1 \right) = \frac{U_0 e^{-\alpha \Delta t}}{L_p \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} \left( e^{\frac{-\alpha \pi}{\omega_0}} + 1 \right). \quad (12)$$

З (11) знайдемо величину захисної індуктивності  $L_p$  при заданому значенні максимальної величини ударного струму діодів  $I_{rrm}$ :

$$L_p = \frac{U_0 e^{-\alpha t_0}}{I_{rrm} \sqrt{\alpha^2 + \omega_0^2}} \left( e^{\frac{-\alpha \pi}{\omega_0}} + 1 \right). \quad (13)$$

**Комп'ютерне моделювання та експериментальне дослідження отриманих теоретично залежностей.** Перевірку отриманих теоретично залежностей проведемо як експериментально, так і за допомогою комп'ютерного моделювання. Для розрахунку за виразами (12), (13), використаємо пакет для вирішення математичних задач SMATH Studio Desktop версія 0.97.5346. Комп'ютерна симуляція кола показаного на рис. 1 виконувалась в пакеті LTSpice IV. Для експериментального дослідження використовувався ПС з параметрами:  $U_0 = 3-8$  кВ,  $L = 10$  мкГн,  $C = 2$  мкФ,  $r = 0,5$  Ом. Використаємо захисну індуктивність  $L_p = 50$  мГн (розраховану з (13) для ударного струму в 1 А при  $U_0 = 8$  кВ). На рис. 3 показано розрахунок (рис. 3, а) за (8) і (10) та комп'ютерне моделювання кола показаного на рис. 1 (рис. 3, б) при  $U_0 = 5,8$  кВ,  $L = 10$  мкГн,  $C = 2$  мкФ,  $r = 0,5$  Ом,  $L_p = 50$  мГн.

Для виміру струму в колі високовольтного випрямляча використовувалися лінійний датчик струму на ефекті Хола CSNR161 компанії Honeywell, активно-емнісний подільник напруги 1:100 для цифрових осцилографів з входом 1 МОм, 15пФ фірми Tektronix Inc з максимальною входною імпульсною напругою 10 кВ, для виміру напруги, та цифровий осцилограф Witting technologies W2012A. Вимірювалася тільки амплітуда ударного струму кола високовольтних діодів випрямляча та напруга початку розряду  $U_0$  на емнісному накопичувачі енергії  $C$ . Експериментальні результати та їх порівняння з розрахунком та моделюванням наведено в табл. 1 при різних значеннях напруги початку розряду  $U_0$ . Результати досліджень вка-

зують на практично повний збіг теоретичних, симуляційних та експериментальних результатів.

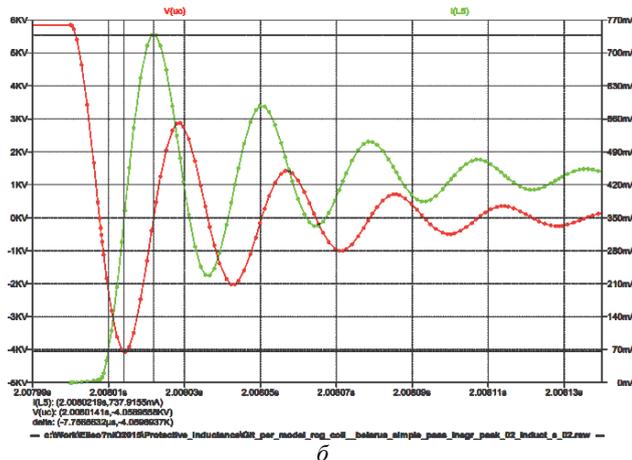
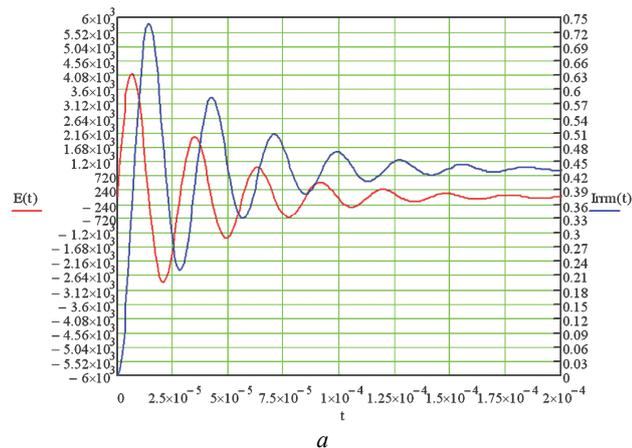


Рисунок 3 – Результати розрахунку (а) та моделювання (б)

Таблиця 1 – Експериментальні результати та їх порівняння з розрахунком та моделюванням

$U_0$ , кВ	Результати розрахунку $I_{rzm}$ , А	Результати моделювання $I_{rzm}$ , А	Результати експерименту $I_{rzm}$ , А
5,8	0.73	0.73	0.7
6.7	0.84	0.84	0.8
7.6	0.96	0.95	0.9

**Висновки.** На основі аналізу існуючих методик розрахунку захисних струмообмежуючих елементів генераторів імпульсних струмів з ємнісним накопичувачем енергії виявлено їх недосконалість в плані точного розрахунку параметрів захисних елементів і ударного струму високовольтних діодів. На основі аналізу електротехнічних процесів в силовому розрядному контурі визначено найбільш небезпечні режими для високовольтного випрямляча. На основі аналізу електротехнічних процесів в колі захисту високовольтного випрямляча зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії за умовою реактивного струмообмеження отримано залежність ударного струму від параметрів силового контуру та знайдено величину захисної індуктивності  $L_p$  при заданому значенні максимальної величини ударного струму діодів  $I_{rzm}$ . На основі комп'ютерного моделювання та експериментального дослідження отриманих теоретично залежностей доведено їх достовірність.

### Список літератури

1. Электрический разряд в жидкости и его применение :Сб. научн. тр. / Отв. ред. Г.А.Гульй. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.
2. Курач А. М. Методика расчета высоковольтного двухкатушечного реактора на стороне выпрямленного тока / А. М. Курач, Л. Н. Мирошниченко. – Николаев: ПКБЭ, 1982. – 12 с.
3. Курач А. М. Методика расчета выпрямителя-трансформатора / А. М. Курач, Л. Н. Мирошниченко. – Николаев: ПКБЭ, 1985. – 68 с.
4. Адамьян Ю. Э. Электроэнергетика. Испытательные и электрофизические установки высокого напряжения / Ю. Э. Адамьян, И. М. Богатенков. – СПб: СПбГПУ, 2012. – 232 с.
5. Дашук П.Н. Техника больших импульсных токов и магнитных полей / П.Н. Дашук, С.Л. Зайенц, В.С. Комельков и др. – М: Московская типография № 4, 1970. – 472 с.
6. Кривицкий Е.В. Переходные процессы при электрическом разряде в жидкости / Е.В. Кривицкий, В.В. Шамко. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.
7. Вовченко А.И. Синтез емкостных нелинейно-параметрических источников энергии для разрядно-импульсных технологий / А.И. Вовченко, Р.В. Тертилов // Збірн. наук. праць Національного університету кораблебудування. – 2010. – № 4. – С. 118–124.
8. Щерба А.А. Закономерности повышения скорости нарастания разрядных токов в нагрузке при ограничении их максимальных значений / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. электродинамика. – 2012. – № 5. – С. 3–9.
9. Щерба А.А. Синтез электрических цепей с емкостными накопителями энергии в полупроводниковых формирователях мощных разрядных импульсов / А.А. Щерба, Н.И. Супруновская // Техн. электродинамика. – 2014. – № 1. – С. 3–11.

### Bibliography (transliterated)

1. Elektricheskiy razrjad v zhidkosti i ego primenenie :Sb. nauchn. tr. Отв. ред. G.A.Gulyj. Kiev: Naukova dumka, 1977, 176 p.
2. Kurach A. M., Miroshnichenko L. N. Metodika raschjota vysokovol'tnogo dvuhkatushechnogo reaktora na storone vuprjamlenno go toka. Nikolaev: PKBE, 1982, 12 p.
3. Kurach A. M., Miroshnichenko L. N. Metodika raschjota vuprjamitel'ja-transformatora. Nikolaev: PKBE, 1985, 68 p.
4. Adam'jan Ju. Je., Bogatenkov I. M. Jelektrojenergetika. Ispytatel'nye i jelektrofizicheskie ustanovki vysokogo naprjazhenija. Sankt-Peterburg: SPbGPU, 2012, 232 p.
5. Dashuk P.N., Zajenc S.L., Komel'kov V.S. i dr. Tehnika bol'shih impul'snyh tokov i magnitnyh polej. Moscow: Moskovskaja tipografija No 4, 1970, 472 p.
6. Krivickij E.V., Shamko V.V. Pehodnye processy pri jelektricheskom razrjade v zhidkosti. Kyiv: Nauk.dumka, 1979, 208 p.
7. Vovchenko A.I., Tertilov R.V. Sintez emkostnyh nelinejno-parametricheskikh istochnikov jenerгии dlja razrjadno-impul'snyh tehnologij. Zbirn. nauk. prats' Natsional'noho universtetu korablebuduvannya, 2010, No 4, pp. 118–124.
8. Shcherba A.A., Suprunovskaja N.I. Zakonomernosti povyshenija skorosti narastanija razrjadnyh tokov v nagruzke pri ogranicenii ih maksimal'nyh znachenij. Tehn. elektrodinamika, 2012, No 5, pp. 3–9.
9. Shcherba A.A., Suprunovskaja N.I. Sintez jelektricheskikh cepej s emkostnymi nakopitel'jami jenerгии v poluprovodnikovyh formirovatel'jah moshnyh razrjadnyh impul'sov. Tehn. elektrodinamika, 2014, No 1, pp. 3–11.

Надійшла (received) 09.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Визначення параметрів елементів захисту високовольтного випрямляча зарядного пристрою в генераторах імпульсних струмів / Д. В. Вінниченко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 15-19. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

**Определение параметров элементов защиты высоковольтного выпрямителя зарядного устройства в генераторах импульсных токов / Д. В. Винниченко** // Вісник НТУ «ХП». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХП», 2016. – № 36 (1208). – С. 15-19. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

**Determining the parameters protection elements of high voltage rectifier in charger devices pulse current generators / D. V. Vinnichenko** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 15-19. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

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

**Вінниченко Дмитро Валерійович** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, Миколаїв, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

**Вінниченко Дмитрій Валерьевич** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, Николаев, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

**Vinnichenko Dmytro Valerijovich** – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

УДК 537.5:622.766.4:622.332

**Т. Д. ДЕНИСЮК, А. Н. РАЧКОВ**

**ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ – ПЕРСПЕКТИВНЫЙ ПУТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ГУМИНОВЫХ ВЕЩЕСТВ**

Наведено відомості про можливість застосування новітніх технологій електророзрядного приготування стійких водно-вугільних суспензій для виробництва біодобрива. Встановлені режими високовольтних імпульсних розрядів для одержання стабільної водно-вугільної суспензії, збагаченої гуміновими кислотами та макро- і мікроелементами. Створений технологічний процес може бути задіяний в технологічних комплексах для одержання гумінового добрива з бурого вугілля при зниженні енергетичних показників і тривалості циклу.

**Ключові слова:** буре вугілля, гумінові добрива, гумінові кислоти, макро- і мікроелементи, мінералізація, електророзрядна технологія.

Приведены сведения о возможности применения новейших технологий электроразрядного приготовления устойчивых водно-угольных суспензий для производства биоудобрения. Установлены режимы высоковольтных импульсных разрядов для получения стабильной водно-угольной суспензии, обогащенной гуминовыми кислотами и макро- и микроэлементами. Созданный технологический процесс может быть задействован в технологических комплексах для получения гуминового удобрения из бурого угля при снижении энергетических показателей и продолжительности цикла.

**Ключевые слова:** бурый уголь, гуминовые удобрения, гуминовые кислоты, макро- и микроэлементы, минерализация, электроразрядная технология.

The information about the possibility of using the latest technology of an electric cooking-resistant water-coal suspensions for the production of bio-fertilizers. Selectable modes of high-voltage pulsed discharges to produce a stable water-coal slurry enriched with humic acids, macro-and micronutrients. Created process may be involved in technological complexes for humic fertilizer from lignite with a decrease in power performance and cycle life.

**Keywords:** humic fertilizers, lignite, humic acids, macro- and micronutrients, mineralization, electric discharge technology

**Постановка задачі.** Біологізація і екологізація земледілля являється однією з актуальних задач сільськогосподарського виробництва, яка може бути вирішена при використанні біологічно активних органічних і органічно-мінеральних добрив на основі бурого вугілля. В органічній частині бурих угілля в результаті довготривалої еволюційної біотрансформації рослинного сировини, залишків тваринних і білкових тіл мікроорганізмів міститься багато цінних гумінових речовин. Комплексне біостимулююче добриво на основі бурого вугілля не

тільки суттєво підвищує урожайність зернових і овочевих культур, але і сприяє рекультивувати ґрунту [1].

Звичайні добрива, які сьогодні використовуються в сільському господарстві, в основному, є мінеральними. Вони дають непоганий результат по урожайності, але викликають деградацію ґрунту, пов'язану з їх мінералізацією [2]. Ідеальний ґрунт – це глобулярна структура, яка забезпечує ґрунтове «дихання», пов'язане з рухом води і повітря в горизонтальному і перпендикулярному напрямку,

что обеспечивает поступление питательных веществ к растениям. При минерализации почв происходит сращивание глобул в единую массу, препятствует обменным процессам. Такую деградировавшую почву можно восстановить внесением в нее органо-минеральных удобрений, полученных из бурого угля. Учитывая объемы запасов бурого угля и его доступность, можно сказать, что нет достойной альтернативы для крупномасштабного улучшения агротехнических свойств почв.

Однако гуминовые вещества, содержащиеся в буром угле, переходят в физиологически активное состояние и эффективно действуют как стимуляторы роста растений и источники элементов питания только после «активации». Традиционное производство гуминовых удобрений из бурого угля (наиболее распространенный химический способ) является многостадийным, сложным и энергоемким. Оно включает предварительную очистку бурого угля, обработку экстрагентом под действием высоких температур и давлений, измельчения в несколько стадий, обработку водным раствором щелочи при постоянном перемешивании, перемешивание полученной массы сначала с минералосодержащими компонентами, а затем с пластификатором [3]. Кроме того, значительная часть исходного бурого угля при традиционном способе изготовления гуминового удобрения не утилизируется и направляется, в основном, в отвалы. В минеральной части этих отходов остаются такие элементы, как бор, медь, марганец и другие микроэлементы, которые могли бы повысить удобрительную ценность углегуминовых препаратов [4].

Химический способ выделения гуминовых веществ не обеспечивает эффективную экстракцию гуминовых веществ и не отвечает требованиям экологии и техники безопасности. В процессе экстракционного извлечения в раствор гуминов переходит большое количество высокодисперсных частиц, глинистых минералов и примесей. Зольность гуминов, полученных химическим способом, составляет от 26 до 70% [5]. Кроме этого разрушается природная структура гуминовых препаратов, полученных химической экстракции. Щелочная реакция растворов гуминов и наличие в них остатков непрореагировавшей щелочи, ограничивает их применение областью, где гумины применяются в низких концентрациях. В качестве веществ для интоксикации почв такие гумины не применяются.

Одним из эффективных методов физического воздействия на материалы с целью их активации и повышения реакционной способности служит подводный электрический разряд. Он уже давно и успешно применяется в машиностроении, химико-технологических процессах, гидроакустике, горнодобывающей отрасли, нефтедобывающих производствах, в так называемых силовых процессах строительной индустрии: разрушение старых фундаментов и негабаритов, уплотнение просадочных грунтов при подготовке строительной площадки и т.п. [6]. В электроразрядных установках материалы подвергаются комплексному воздействию волн сжатия, кавитации, высокоскоростных гидротоков [7], кроме того, про-

исходит изменение химических свойств рабочей жидкости – воды – в результате воздействия электрического разряда на ее структуру.

Разработанная ранее в ИИПТ НАН Украины электроразрядная технология дезинтеграции бурых углей предусматривает за счет действия импульсных высоковольтных разрядов как источника энергии высокой плотности одностадийное измельчение угля до тонкодисперсного состояния и получение устойчивых водно-угольных суспензий (ВУС) со значительно меньшими затратами энергии [8, 9]. Электроразрядная технология дезинтеграции качественно отличается от обычной механической дезинтеграции, в первую очередь тем, что полученные суспензии имеют более высокую степень устойчивости. В процессе электроразрядного измельчения бурого угля в воде протекают деструктивные реакции разложения, одновременно в электромагнитном поле электроразряда происходит образование диполей и так называемого механического барьера при столкновении частиц активной твердой фазы. Эти процессы сдерживают оседание или прилипание частиц, что обеспечивает седиментационную устойчивость суспензии. В настоящей работе необходимо решить ряд вопросов, связанных с определением эффективных методов высоковольтной разрядно-импульсной обработки гуминосодержащих материалов для получения высококачественных органических удобрений.

**Цель работы** – установить режимы и параметры электроразряда, обеспечивающие тонкую дезинтеграцию бурого угля, максимальное извлечение гуминовых веществ из закрытых частиц бурого угля и седиментационную устойчивость полученной суспензии.

**Методика исследований.** Объект исследований – процессы электроразрядной дезинтеграции компонентов водно-угольной суспензии на основе бурого угля. Твердой фазой при приготовлении суспензии служили куски бурого угля марки Б - бурый, имеющие максимальные размеры от 100 до 20 мм. В качестве рабочей среды использовалась водопроводная вода с удельным сопротивлением от 8 до 10 Ом·м. В экспериментах применялось оборудование: генератор импульсных токов ГИТ-50, электроразрядная камера объемом 10 дм<sup>3</sup>. Блок-схема экспериментальной установки представлена на рис. 1.

При проведении исследований обеспечивались постоянными следующие параметры: рабочее напряжение, индуктивность разрядного контура, длина межэлектродного промежутка, процентное содержание твердой фазы и жидкой фазы (по массе), начальная температура рабочей жидкости  $T = 293\text{K}$ .

Для оптимизации процесса варьировали следующие параметры:

- энергия в импульсе  $W$ , кДж 0,625; 1,25; 2,5;
- частота следования импульсов  $f$ , Гц 6,0; 5,0; 4,0.

В качестве параметра оптимизации было выбрано количество бурого угля, измельченного до фракционного состава от 0,2 мм и ниже, удовлетворяющего требованиям производства устойчивых суспензий. Для определения фракционного состава угля использован микро-

скопический и ситовый анализ по ГОСТ 4790-93 [10]. При проведении экспериментов в разрядную камеру поступали одновременно бурый уголь и вода в соотношении 60 % массы к 40 % массы соответственно.

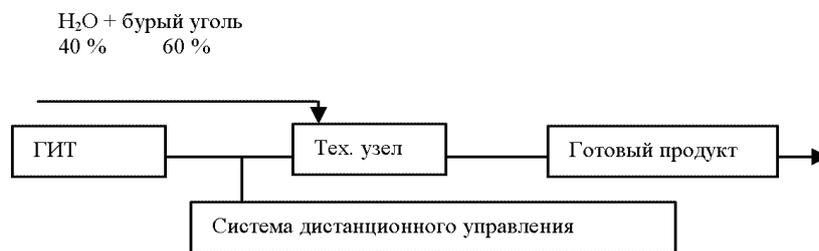


Рисунок 1 – Блок – схема установки

**Результаты и обсуждение.** Весь процесс разрушения можно разделить на три стадии (рис. 2):

I стадия – образование сжимающими нагрузками трещин и развитие их до критического состояния;

II стадия – сжимающими и растягивающими нагрузками измельчение угля до размеров 200 мкм и менее;

III стадия – измельчение и округление зерен до размеров менее 50 мкм.

Распределение частиц по фактору формы - показателю округленности частиц (отношение наименьшего к наибольшему размеру частицы) после электроразрядной обработки при микроскопическом анализе готового продукта показано на рис. 3. Из гистограммы видно, что преобладающее количество частиц имеет форму, близкую к сферической, и, можно считать, что дальнейшее их измельчение потребует значительного количества энергии. Т.е., фракция измельчения достигла своего оптимального значения.

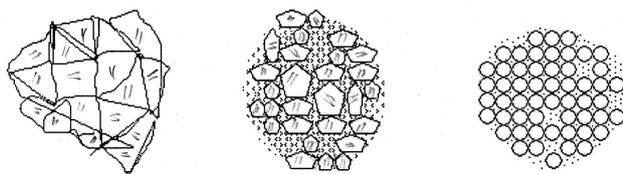


Рисунок 2 – Постадийная электроразрядная дезинтеграция бурого угля

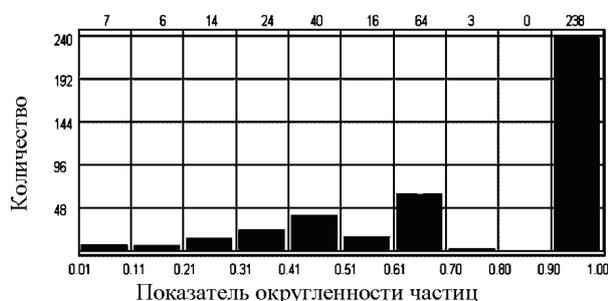


Рисунок 3 – Распределение частиц угля после обработки по фактору формы

В процессе электроразрядного измельчения бурого угля одновременно происходят деструктивные реакции разложения воды. Молекулы воды под влиянием высоких температур и давлений диссоциируют,

Для каждого из трех значений запасенной энергии, соблюдая равенство удельных затрат энергии, проводилось по три эксперимента с целью установления влияния на выходной продукт параметров  $W, f$ .

происходит так называемый термолиз воды с понижением pH и образованием сверхактивных молекул  $H_2O_2$  и ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , т.е. образуется активированная жидкая среда. Результатом этих процессов являются различные окислительно-восстановительные реакции в растворах неорганических веществ (азота, фосфора, кальция), присутствующих в бурых углях, увеличение содержания гуминовых кислот [11]. В процессе электроразрядной обработки бурого угля в активированной среде происходят процессы физико-химического разложения каустобионитов, деструкция и расщепление крупных частиц на радикалы до полного выхода гуминовых кислот. Одновременно осуществляется выщелачивание из минеральной части таких элементов, как азот, фосфор, бор, медь, марганец и других микроэлементов, что еще больше может повысить удобрительную ценность гуминовых препаратов.

Электроразрядная тонкая дезинтеграция угля возможна за счет управляемости дозирования энергии путем оптимизации параметров и режимов разряда. В табл. 1 представлены результаты обработки 54 кг бурого угля (по 6 кг в каждом опыте) высоковольтными электроразрядами с параметрами и режимами обработки, ранее установленными в работе [12] при измельчении аналогичных по свойствам материалов.

Таблица 1 – Фракционный состав измельченного бурого угля

Запасенная энергия $W$ , кДж	$f$ , Гц	Фракционный состав суспензии, %			
		50 мкм	от 50 до 100 мкм	от 100 до 200 мкм	> 200 мкм
0,625	6,0	–	–	67,0	33,0
	6,0	–	–	80,0	20,0
	6,0	–	–	99,0	1,0
1,25	5,0	–	–	92,0	5,0
	5,0	–	90,0	5,0	2,6
	5,0	93,0	4,0	2,0	1,0
2,5	4	93,0	5,0	1,0	1,0
	4	95,0	1,2	1,2	2,6
	4	93,0	4,7	1,6	0,7

Исходя из анализа полученных результатов, наиболее целесообразным для дезинтеграции бурых углей с целью получения удобрений является режим электроразрядной обработки с энергией в импульсе 2,5 кДж и частоте следования импульсов 4 Гц, при котором достигнуто измельчение бурого угля на фракции

50 мкм и меньше, что составило более 90 % от общего объема [13]. Физиологическая активность гуминовых препаратов с таким фракционным составом увеличивается, поскольку они эффективнее усваиваются мембранами клеточной структуры растений.

Проведенные лабораторные исследования позволили установить, что массовое содержание питательных веществ и микроэлементов в электрогидравлически обработанном буром угле резко повысилось, в сравнении с исходным. Так, массовое содержание аммиачного азота возрастает в 2,4 раза, а водорастворимого органического вещества – в 3,5.

**Выводы.** Проведенные исследования показали возможность использования электроразрядной обработки для получения устойчивых водно-угольных суспензий из бурого угля для производства удобрений.

Высоковольтный разрядно-импульсный метод получения гуминового удобрения позволит совместить дезинтеграцию бурого угля до фракции от 0,2 мм и меньше и создание активной среды, и за счет этого получить стабильную и устойчивую суспензию, обогащенную гуминовыми кислотами и макро- и микроэлементами.

Использование электроразрядов для получения удобрений на базе бурых углей имеет достаточно хорошую перспективу.

#### Список литературы

1. Орлов Д.С. Свойства и функции гуминовых веществ / Д.С. Орлов // Гуминовые вещества в биосфере. – М.: Наука, 1993. – С. 16-27.
2. Горювая А.И. Гуминовые вещества / А.И. Горювая, Д.С. Орлов, О.В. Щербенко. – К.: Наукова думка, 1995. – 303 с.
3. Бондарюк Т.С. Джерела та технології отримання гумінових препаратів / Т.С. Бондарюк, В.О. Гнеушев // Досягнення та перспективи застосування гумінових речовин у сільському господарстві: матер. Міжнар. наук.-практ. конф., 20-22 лютого 2008 р. – Дніпропетровськ: Дніпропетровський державний аграрний університет, 2008. – С.100-102.
4. Денисюк Е.А. Технологии получения гуминовых веществ / Е.А. Денисюк, И.А. Кузнецова, Р.А. Митрофанов // Вестник НГИЭИ. – 2014. – № 2. – С. 66-80.
5. Пат. РФ № 2125039, МПК<sup>7</sup> C05F7/00. Гуминовый концентрат, способ его получения, устройство для электрохимического получения гуминового концентрата / Шульгин А.И., Шаповалов А.А., Пуцькин Ю.Г.
6. Круглицкий Н.Н. Физико-химическая механика дисперсных систем в сильных импульсных полях / Н.Н. Круглицкий, Г.Г. Горювенко, П.П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 192 с.
7. Малюшевский П.П. Основы разрядно-импульсной технологии / П.П. Малюшевский. – К.: Наукова думка, 1983. – 272 с.
8. Ризун А.Р. Электроразрядное измельчение бурого угля как компонента водно-угольного топлива / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Электронная обработка материалов. – 2009. – № 3. – С. 96–99.
9. Ризун А.Р. Электроразрядная дезинтеграция бурого угля для изготовления водно-угольного топлива / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Импульсные процессы в механике сплошных сред; матер. VIII Междунар. науч. конф., 17-21 августа 2009 г. – Николаев: Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, 2009. – С. 130-131.
10. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава

промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1987. – 264 с.

11. Юцишина А.Н. Изучение химических реакций при электроразрядном воздействии в воде и водных растворах неорганических веществ / А.Н. Юцишина, Н.И. Кускова, А.П. Малюшевская // Электронная обработка материалов. – 2007. – № 5. – С. 52-55.

12. Ризун А.Р. Разработка и внедрение электроразрядного процесса дезинтеграции компонентов для водно-угольного топлива / А.Р. Ризун, Ю.В. Голень, Т.Д. Денисюк // Наука та іновачії. – 2009. – №15. – С. 42-46.

13. Пат. України № 107536, МПК (2006.01) C05F 11/02, B02C 19/18. Спосіб одержання гумінового добрива / Ризун А.Р., Денисюк Т.Д., Домерщикова А.О.; заявник і патенто власник Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України. – № u201512641; заявл. 21.12.15; опубл. 10.06.16, Бюл. № 11, <http://www.uipv.org>.

#### Bibliography (transliterated):

1. Orlov D.S. Features and functions of humic substances. Humic substances in the biosphere. Moscow: Nauka, 1993, pp. 16-27.
2. Gorovaya A.I., Orlov D.S., Shcherbenko O.V. Humic substances. Kyiv: Naukova Dumka, 1995, 303 p.
3. Bondaryuk T.S., Hnyeushev V.A. Sources and technologies of humic preparations. Achievements and prospects of humic substances in agriculture: mater. Intern. nauk. and practical. Conf., 20-22 February 2008. Dnipropetrovsk, Dnipropetrovsk State Agrarian University, 2008, pp. 100-102.
4. Denisjuk E.A., Kuznetsov I.A., Mitrofanov R.A. Technology for production of humic substances. Bulletin NGIEI, 2014, No 2, pp. 66 - 80.
5. Pat. Russian Federation No 2125039, IPC 7 C05F7 / 00. Humic concentrate its production method, a device for the electrochemical production of humic concentrate. Shulgin A.I., Shapovalov A.A., Putsykin Y.G.
6. Kruglitsky N.N., Horovenko G.G., Malyushevsky P.P. Physico-chemical mechanics of disperse systems in strong pulsed fields. Kyiv: Naukova Dumka, 1983, 192 p.
7. Malyushevsky P.P. Basics of Running-pulse technology. Kyiv: Naukova Dumka, 1983, 272 p.
8. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisjuk T.D. Electric discharge milling of brown coal as a component of water-coal fuel. Electronic processing of materials, 2009, No 3, pp. 96-99.
9. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisjuk T.D. Electrical discharge disintegration of brown coal for the production of water-coal fuel. Switching processes in continuum mechanics; Mater. VIII Intern. scientific. conf, 17-21 August 2009, Nikolaev. Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2009, pp. 130-131.
10. Kouzov P.A. Basics of disperse composition of industrial dust and shredded materialov. Leningrad: Chemistry, 1987, 264 p.
11. Yushchyshyn A.N., Kuskova N.I., Malyushevskaya A.P. Study of the chemical reactions of the discharge exposure in water and aqueous solutions of inorganic compounds. Electronic processing of materials, 2007, No 5, pp. 52-55.
12. Rizun A.R., Holen Y.V., Denisjuk T.D. Development and implementation of an electric component of the process of disintegration of the water-coal fuel. Science that innovatsii, 2009, No 15, pp. 42-46.
13. Pat. Ukraine No 107536, IPC (2006.01) S05F 11/02, B02C 19/18. A method for producing humic fertilizer. Rizun A.R., Denisjuk T.D., Domerschikova A.O.; patent owner Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, No u201512641; appl. 21.12.15; publ. 10.06.16, Bull. Number 11, <http://www.uipv.org>.

Поступила (received) 01.10.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Електророзрядна технологія – перспективний шлях одержання гумінових речовин / Т. Д. Денисюк, О. М. Рачков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 19-23. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

**Электроразрядная технология – перспективный путь получения гуминовых веществ / Т. Д. Денисюк, А. Н. Рачков** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 19-23. – Бібліогр.: 13 назв. – ISSN 2079-0740.

**Electric cooking technology is a perspective method of humic substances making / T. D. Denisyuk, A. N. Rashkov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 19-23. – Bibliogr.: 13. – ISSN 2079-0740.

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

**Денисюк Тетяна Дмитрівна** – молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

**Денисюк Татьяна Дмитриевна** – младший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

**Denisyuk Tatiana** – Junior Researcher at the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

**Рачков Олексій Миколайович** – молодший науковий співробітник Інституту імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

**Рачков Алексей Николаевич** – младший научный сотрудник Института импульсных процессов и технологий Национальной академии наук Украины, г. Николаев; тел. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

**Rashkov Alexey** – Junior Researcher at the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel. (0512) 58-71-21; e-mail: dpcd.iipt@com.ua.

УДК 551.594.21:62:781

**А.В. ЖУРАХІВСЬКИЙ, І.В. ЛИЩАК, Т.В. БІНКЕВИЧ**

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МИТТЄВОГО ЗНАЧЕННЯ РОБОЧОЇ НАПРУГИ НА ОЦІНКУ НАДІЙНОСТІ ГРОЗОЗАХИСТУ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ**

Розглянуто існуючі моделі врахування миттєвого значення робочої напруги під час розрахунку грозостійкості ліній електропередачі та обґрунтовано необхідність врахування впливу робочої напруги. Запропоновано новий метод врахування робочої напруги, який забезпечить адекватну відповідність природнім процесам під час врахування робочої напруги. Проведено розрахунок запропонованим методом на прикладі лінії електропередачі напруга якої становить 220 кВ та виконана проміжними опорами типу П – 220 – 2. Побудовано діаграми розподілу кутів пробоя для різних фаз лінії електропередачі та криві небезпечних параметрів.

**Ключові слова:** лінія електропередачі, надійність грозозахисту, робоча напруга, крива небезпечних параметрів, випадкові фактори, ймовірність пробоя ізоляції.

Рассмотрены существующие модели учета мгновенного значения рабочего напряжения при расчете грозостойкости линий электропередачи и обоснована необходимость учета влияния рабочего напряжения. Предложен новый метод учета рабочего напряжения, который обеспечит адекватное соответствие естественным процессам во время учета рабочего напряжения. Проведен расчет предложенным методом на примере линии электропередачи напряжение которой составляет 220 кВ и выполненной промежуточными опорами типа П - 220 - 2. Построены диаграммы распределения углов пробоя для различных фаз линии электропередачи и кривые опасных параметров.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, надежность грозозащиты, рабочее напряжение, кривая опасных параметров, случайные факторы, вероятность пробоя изоляции.

The existing model of accounting instantaneous operating voltage when calculating lightning protection of transmission lines and the necessity of taking into account the influence of the operating voltage is considered. It is proposed a new method of working voltage, which will ensure adequate compliance with the natural processes during the operating voltage. It is conducted the calculation of the proposed method by the example of the power line voltage which is 220 kV and intermediate supports made of type II - 220 - 2. It is built breakdown angle distribution diagrams for the various phases of the transmission line parameters and dangerous curves. After analyzing dangerous curves the proposed method increases the area of safety parameters in comparison with existing methods.

**Keywords:** transmission line, reliability of lightning protection, power supply, dangerous curve parameters, random factors, the probability of insulation breakdown

**Вступ.** Ефективність функціонування електроенергетичних систем залежить від багатьох факторів, в тому числі від грозозахисту їх об'єктів, в першу чергу ліній електропередачі і підстанцій. Лінії електропередачі є досить важливими об'єктами енергосистем, оскільки ними відбувається пересилання електричної енергії споживачам. Тому вони повинні бути надійно захищеними від впливу зовнішніх факторів, в тому числі від атмосферних перенапруг.

Надійність грозозахисту повітряних ліній електропередачі та підстанцій тим вище, чим менше кількість аварійних відключень через грози за певний період часу. Характерною особливістю об'єктів електроенергетичних систем є повне відновлення їх захисних властивостей після ліквідації аварій, викликаних грозою. Тому тут немає тимчасової корекції грозових пошкоджень і їх інтенсивність визначається тільки частотою грозових впливів і здатністю об'єкта протистояти кожному удару блискавки.

**Основна частина.** В момент розряду блискавки на ізоляцію повітряної лінії електропередачі (гірлянди ізоляторів та повітряні проміжки) діє перенапряження. Електричні, електромагнітні та магнітні складові цієї перенапруги залежать від конструктивних параметрів опори, опору заземлення опори та від крутизни наростання струму на фронті імпульсної хвилі струму блискавки. Для електричних мереж середнього, високого та надвисокого класів напруг значний вплив має також миттєве значення робочої напруги  $u_0$  в момент розряду блискавки.

Згідно з [1] приймається, що в момент удару блискавки, на проводі наявна робоча напруга, протилежна по знаку імпульсній напрузі на опорі, яка збільшує величину перенапруги та сприяє перекриттю ізоляції. Перекриття виникає за умови, коли сума імпульсних і робочого значення напруги проводу досягає розрядної напруги лінійної ізоляції, яка визначається вольт-секундною характеристикою для розрядів на фронті імпульсу перенапруги, тобто коли:

$$U_{\text{лн}}(t) + u_0(\varphi) \geq U_{\text{розр}}^+(t). \quad (1)$$

Під час врахування миттєвого значення  $u_0$  робочої напруги лінії електропередачі в момент розряду блискавки здійснюються деякі спрощення. В існуючих моделях вплив напруги  $u_0$  на ймовірність порушення грозостійкості об'єктів еквівалентують шляхом збільшення напруги на ізоляції  $u(t)$ , розрахованої без врахування робочої напруги, на величину  $u_{\text{сп}}$  – середнього за півперіод значення фазної робочої напруги. Відповідно до [2]  $u_0 = 0,655 \cdot u_{\text{роб.нб}}$ . Такий спосіб врахування  $u_0$  є штучним, можливість такого врахування не оцінювалася.

Для забезпечення адекватної відповідності природним процесам, під час врахування робочої напруги, у випадку розміщення траверс на різній висоті, слід досліджувати перекриття ізоляційних проміжків не лише для верхньої (геометрично) фази, а й для інших фаз (середньої та нижньої). Досвід експлуатації стверджує, що біля 35 % зворотних перекриттів виникають на нижніх фазах. Під час удару блискавки в опору ЛЕП, фази якої мають різну висоту підвісу проводів,

значення функції  $u(t)$  завжди є найбільшим для ізоляції верхньої фази. Очевидно, що перекриття ізоляції нижніх фаз стає можливим, якщо миттєве значення  $u_0$  робочої напруги на одній з цих фаз разом з напругою на ізоляції  $u(t)$  за удару блискавки в опору викликають напругу  $u'_c(t)$  або  $u'_n(t)$ , яка буде більшою ніж відповідна напруга  $u_a(t)$ . Отже, робоча напруга викликає перерозподіл перекриттів між фазами, збільшує їх кількість і таким чином знижує грозостійкість об'єкта.

Нами запропонований наступний спосіб врахування впливу напруги  $u_0$ . Розділимо період зміни миттєвого значення робочої напруги на  $n$  інтервалів. Збільшення кількості інтервалів поділу збільшує час розрахунку, але й підвищує точність розрахунку. Вибір кількості інтервалів має бути коректно обґрунтованим. Розрахуємо для всіх  $n$  інтервалів миттєве значення робочої напруги  $u_0$ , напруги на ізоляції  $u'(t) = u_0 + u(t)$  та ймовірність  $p(u')$  для кожної із трьох фаз. Якщо для  $m$  інтервалів  $p(u)' = 1$  хоча б для однієї з фаз, то ймовірність порушення міцності ізоляції об'єкта з врахуванням впливу робочої напруги  $p(u, u_0)$  буде рівна відношенню  $m/n$ . При цьому можна визначити також ймовірність перекриття ізоляції в кожній фазі окремо.

Викладені вище міркування відобразимо під час виконання розрахунків на прикладі ЛЕП, напруга якої становить 220 кВ, яка виконана опорами типу П–220–2.

Розділяємо період робочої напруги  $u_0 = u_{\text{роб}}$  на 9 інтервалів та визначаємо її значення в кожному інтервалі за формулою:

$$u_{\text{роб}_i} = u_{\text{роб.нб}} \cdot \cos \left[ (n-i) \cdot \Delta\varphi + \frac{\Delta\varphi}{2} \right], \quad (2)$$

де  $u_{\text{роб}}$  – значення найбільшої робочої напруги;  $n$  – кількість інтервалів поділу;  $i$  – номер інтервалу;  $\Delta\varphi$  – градусна міра відповідного сектору.

Рівняння, яке визначає можливість перекриття ізоляційних проміжків має вигляд:

$$U_{\text{ВСХ}}(t_i) = A_i \cdot f(t_i) + U'_{\text{роб}}, \quad (3)$$

де  $A_i$  – крутизна фронту блискавки для  $i$ -го часу фронту блискавки;  $U'_{\text{роб}} = 0,655 \cdot U_{\text{роб.нб}}$  – емпіричне значення робочої напруги;  $f(t_i)$  – закон розподілу часу фронту блискавки для  $i$ -го інтервалу.

За формулами [1] обчислюємо закони розподілу часу фронту блискавки – залежності  $f_a(t_i)$ ,  $f_c(t_i)$ ,  $f_n(t_i)$ . Результати розрахунків закону розподілу часу фронту блискавки відображено на рис. 1.

Алгоритм розрахунку ймовірностей  $p(u, u_0)$  для ЛЕП базується на використанні  $n$ -кратного інтегралу по області  $D$  від щільності розподілу  $f(\vec{x})$   $n$ -мірного вектора  $\vec{x}$  випадкових величин.

$$p = \int \dots \int f(\vec{x}) \prod_{k=1}^n dx_k, \quad (4)$$

де в якості  $\vec{x}$  необхідно прийняти вектор випадкових величин, який визначає грозостійкість об'єкта, а в якості області  $D$  (замкнений контур інтегралу) – область значень цих величин, за яких настає порушення міцності ізоляції (область небезпечних параметрів).

У відповідності з наведеним виразом (4) для ймовірності  $p$  порушення міцності ізоляції при одному

ударі блискавки і випадкових значеннях всіх величин, які визначають надійність грозозахисту об'єкта з метою реалізації чисельного інтегрування, представимо у вигляді:

$$p = \sum_{x_n} \Delta F(x_n) \dots \sum_{x_2} \Delta F(x_2) \cdot \sum_{x_k} \Delta F(x_k) = \prod_{k=1}^n \sum_{x_k} \Delta F(x_k), \quad (5)$$

де  $\Delta F(x_k)$  – імовірність попадання  $k$ -ї випадкової величини в заданий інтервал, яка відповідає значенню функції розподілу  $F(x_k)$  по краях заданого інтервалу.

Чисельно інтегрування згідно з (5) реалізується шляхом варіювання величини  $x_k$  по елементах  $\Delta x_k$ , які належать до області небезпечних параметрів. Формула (5) справедлива для незалежних випадкових величин, проте її можна застосовувати для корельованих величин, якщо використовувати умовні закони розподілу.

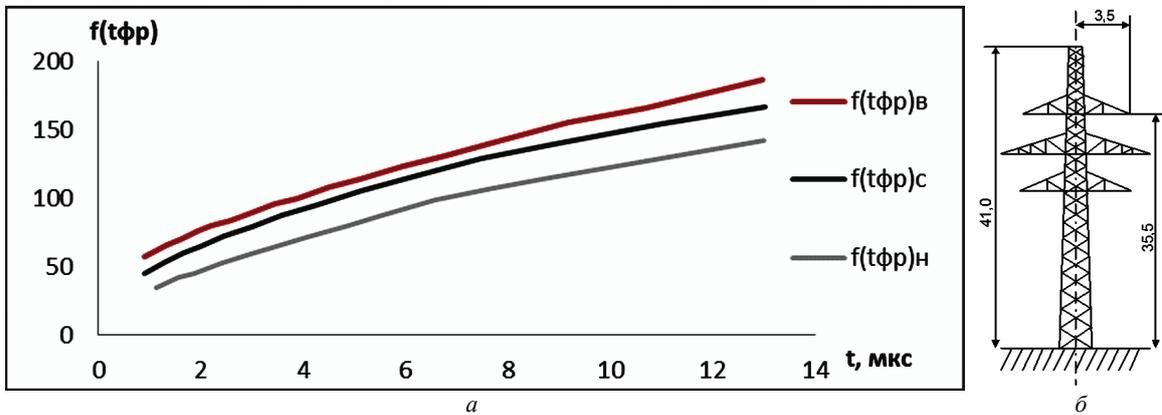


Рисунок 1 – Закон розподілу часу фронту блискавки для трьох фаз (а); ескіз опори типу П-220-2 (б)

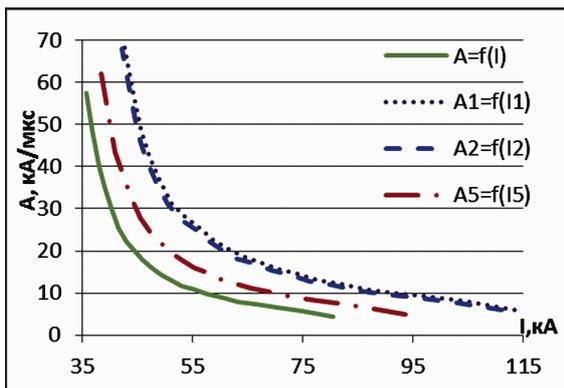


Рисунок 2 – КНП для 1,2 та 5 інтервалів та КНП при врахуванні середнього за півперіод значення фазної робочої напруги

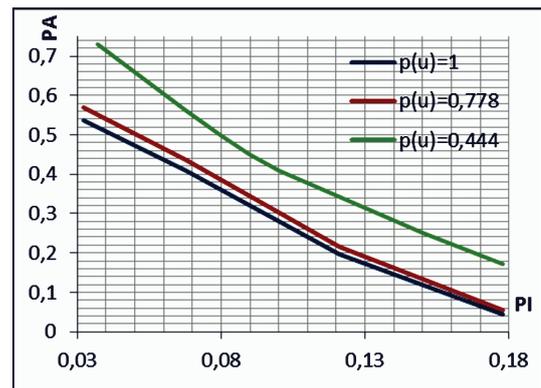


Рисунок 3 – КНП для 1,2 та 5 інтервалів та КНП за врахування середнього за півперіод значення фазної робочої напруги побудовані в ймовірнісних координатах

Виділимо з координат вектора  $\vec{x}$  величини, які формують на ізоляції об'єкта перенапругу  $u(t)$  випадкової форми. Це параметри хвилі струму блискавки  $I, A, \tau$ , миттєве значення робочої напруги  $u_0$  в момент розряду блискавки, віддалення  $l$  місця удару блискавки від об'єкта який захищається, відстань  $b$  від місця удару блискавки в землю до осі лінії, яке враховується при взаємодії індукованих напруг. Згрупуємо їх в окремий вектор і запишемо формулу наступним чином:

$$p = \sum_l \Delta F(l) \cdot \sum_b \Delta F(b) \cdot \sum_I \Delta F(I) \cdot \sum_A \Delta F(A) \cdot \sum_\tau \Delta F(\tau) \times = \times p(u, u_0). \quad (6)$$

Під час виконання розрахунків за врахування реального значення  $u_0$  достатньо враховувати лише три випадкових фактори:  $I, A, u_0$ . Враховуючи твердження, що перекриття ізоляційного проміжку (гірлянди) відбувається на фронті хвилі, амплітуда та крутизна

фронту хвилі струму блискавки пов'язані залежністю  $I = A_i \cdot t_{\phi p_i}$  формулу (6) можна записати у вигляді:

$$p = \sum_A \Delta F(A) \cdot p(u, u_0). \quad (7)$$

Для вибраних значеннях  $A_i$  беремо значення  $u_0$  для найнесприятливішого випадку, коли  $u_0$  зменшує величину перенапруги прикладеної до ізоляційного проміжку (гірлянди ізоляторів). Для прискорення розрахунків можна використати формулу:

$$A_i = \frac{U_{BCX}(t_i) - u_{0_i}}{f(t_i)}. \quad (8)$$

Звідси для найнесприятливішого значення  $u_0$  (для кутів  $170^\circ$  або  $190^\circ$ ) визначаємо  $A_i$ . За таких значень  $A_i$  та  $u_0$  (для кутів  $170^\circ$  або  $190^\circ$ ) перекриття ізоляційного проміжку становить 100 %. Змінюємо значення  $u_0$  і визначаємо чи за таких значень  $A_i$  є можливим перекриття ізоляційного проміжку на середній та нижніх фазах. Після розрахунку масиву значень  $A_i$  отримуємо

сімейство кривих та будуюмо криву небезпечних параметрів (рис. 2).

Імовірність перекриття для цього значення  $A_i$  знаходимо як відношення  $m/n$ . Массив розрахованих значень  $A_i$  перетворюємо в ймовірнісні значення та розраховуємо значення  $I_i$  для побудови КНП в ймовірнісних координатах. Розраховуємо значення площ обмежених сімейством кривих та осями для розрахунку загальної ймовірності перекриття ізоляції

$$p = \sum S_{p_i} \cdot p_i = 0,0575 \cdot 1 + 0,0065 \cdot 0,788 + 0,0325 \cdot 0,444 = 0,077$$

Результати розрахунків відтворюємо у вигляді діаграм (рис. 4) на яких відображено розподіл кутів пробую для кожного проводу. Діаграма відтворює період робочої напруги, який поділено на  $n$  інтервалів та містить вектори фаз відносно яких розподілено сектори поділу для кожної з фаз. Сектори симетричні відповідно до вектора

конкретної фази для руху за і проти годинникової стрілки. На рис. 4, а відображено можливий розподіл пробитих секторів фаз. На рис. 4, б відображено розподіл пробитих секторів для  $A_i = 7,14$  кА/мкс за якого верхня фаза пробивається в 4-9 секторах, середня в 7-9 секторах та нижня у 8-9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,94. На рис. 4, в відображено розподіл пробитих секторів для  $A_i = 5,905$  кА/мкс за якого верхня фаза пробивається в 2-9 секторах, середня в 8-9 секторах та нижня у 8-9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,88. На рис. 4, г відображено розподіл пробитих секторів для  $A_i = 5,667$  кА/мкс за якого верхня фаза пробивається в 3-9 секторах, середня в 8-9 секторах та нижня у 9 секторі. За такого розподілу ймовірність перекриття становитиме 0,83.

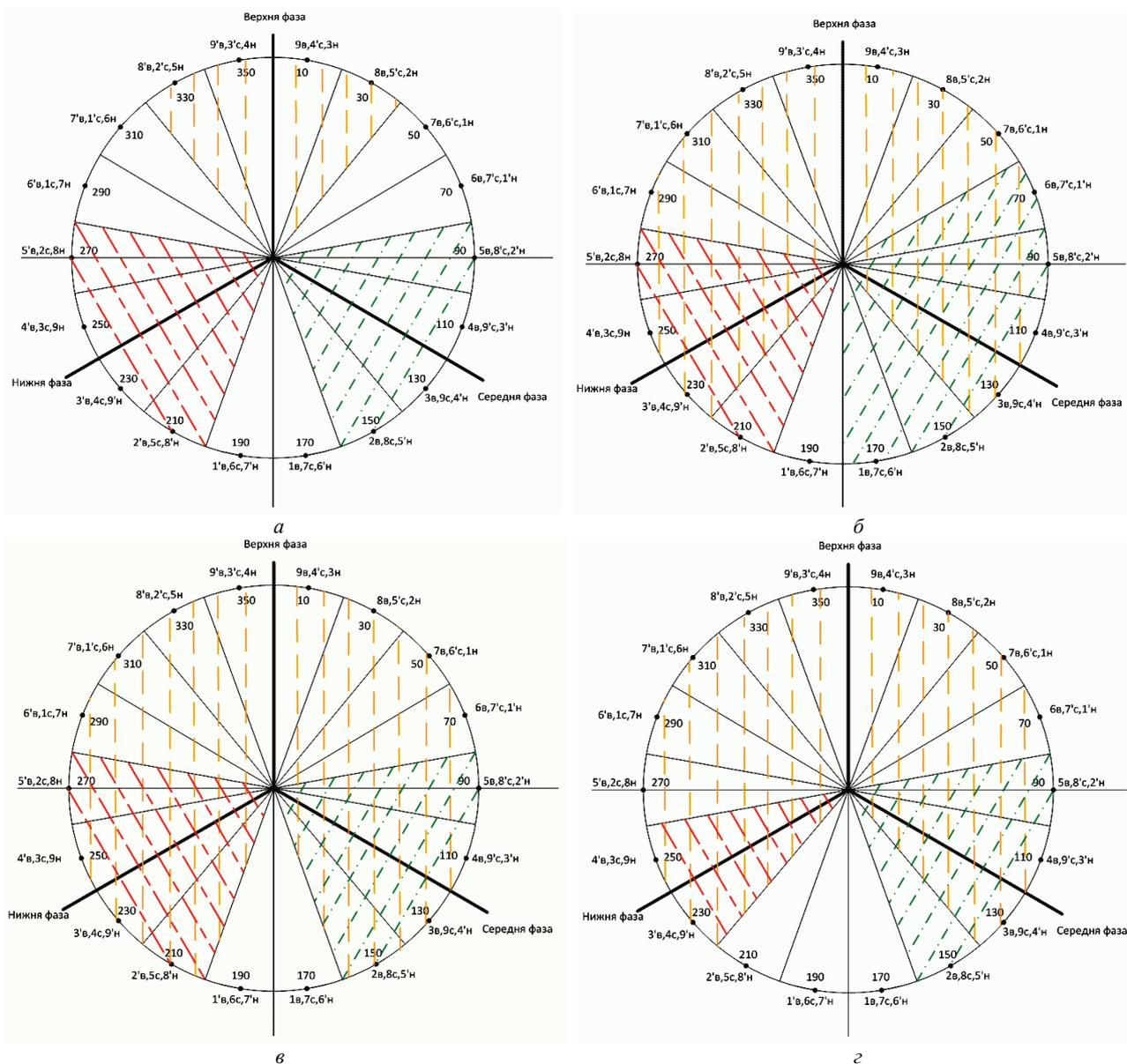


Рисунок 4 – Діаграми розподілу кутів пробую для різних проводів ЛЕПП

**Висновки.** В статті розглянуто існуючі моделі врахування миттєвого значення робочої напруги при розрахунку грозостійкості ліній електропередавання

та обґрунтовано необхідність врахування впливу робочої напруги. Для забезпечення адекватної відповідності природнім процесам під час врахування робочої

напруги запропоновано новий метод врахування робочої напруги. Проведено розрахунок запропонованого методу на прикладі лінії електропередавання напруга якої становить 220 кВ та виконана проміжними опорами типу П – 220 – 2. Результатами проведених досліджень є побудова діаграми розподілу кутів пробою для різних проводів лінії електропередавання та кривих небезпечних параметрів в різних координатах. Аналізуючи КНП в абсолютних одиницях варто зазначити, що використання запропонованого методу збільшує площу безпечних параметрів в порівнянні з існуючими методиками та зменшує ймовірність перекрыття ізоляції.

#### Список літератури

1. Руководство по защите электрических сетей 6-1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений / Под науч. ред. акад. РАН Н.Н.Тиходеева. 2-е изд. СПб: ПЭИПК Минтопэнерго РФ, 1999.
2. Передача энергии постоянным и переменным током // Труды НИИПТ. – Л.: «Энергия», Ленинградское отделение, 1985. – Выпуск 21-22. – С. 172-191.
3. Лищак І. В. Оцінка надійності схем грозозахисту повітряних ліній електропередавання / І. В. Лищак, Т. В. Бінкевич // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2014. – № 736.
4. Інструкція із застосування, монтажу та експлуатації засобів захисту від перенапруг в електроустановках напругою 6-750 кВ. – Київ, 2013.
5. Tarasiewicz E. Transmission line arrester energy, cost and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines / E. Tarasiewicz, F. Rimmer, A. Morched // IEEE Trans. Power Delivery. – July 2000. – Vol. 15. – P. 919-924.
6. Hileman A. R. Insulation Coordination for Power Systems» / A. R. Hileman // CRC Press, USA. – 2002.

7. Vernon Cooray Lightning Protection // The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2010.

8. Правила улаштування електроустановок : вид. 3, перероб. і доп. – Київ, Мінпаливенерго України, 2010. – С. 736.

9. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів // Міністерство палива та енергетики України. – Х.: Видавництво «Форт», 2012. – 368 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Rukovodstvo po zashchite elektrycheskykh setey 6-1150 kV ot hrozovykh y vnutrennykh perenapryazheniy / Pod nauch. red. akad. RAN N.N.Tykhodeeva. 2-e yzd. SPb: PЭYPK MynTOPЭnerho RF, 1999.
2. Trudy NYYPT, Peredacha enerhiyu postoyannym y peremennym tokom. Vypusk 21-22, Enerhiya, Lenynhradskoe otdelennye, 1985, pp. 172-191.
3. Lishchak I. V., Binkevych T. V. Otsinka nadiynosti skhem hrozozakhystu povitryanykh liniy elektroperepylyannya. Visn. Nats. un-tu "L'viv. politekhnika", 2014, No 736.
4. Instruksiya iz zastosuvannya, montazhu ta ekspluatatsiyi zasobiv zakhystu vid perenapruh v elektroustanovkakh napruhoyu 6-750 kV. Kyiv, 2013.
5. Tarasiewicz E., Rimmer F., Morched A. Transmission line arrester energy, cost and risk of failure analysis for partially shielded transmission lines. IEEE Trans. Power Delivery, July 2000, vol. 15, pp. 919-924.
6. Hileman A. R. Insulation Coordination for Power Systems. CRC Press, USA, 2002.
7. Vernon Cooray Lightning Protection. Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2010.
8. Pravyla ulashtuvannya elektroustanovok. vyd.3, pererob. i dop. Minpalyvenerho Ukrayiny, Kyiv, 2010, pp. 736.
9. Pravyla tekhnichnoyi ekspluatatsiyi elektroustanovok spozhyvachiv. Ministerstvo palyva ta enerhetyky Ukrayiny, Kharkiv: Vydavnytstvo «Fort», 2012, 368 p.

Надійшла (received) 10.10.2016

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

Дослідження впливу миттєвого значення робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній / А.В. Журахівський, І.В. Лищак, Т.В. Бінкевич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 23-27. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследование влияния мгновенного значения рабочего напряжения на оценку надежности грозозащиты воздушных линий / А.В. Жураховский, И.В. Лищак, Т.В. Бинкевич // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 23-27. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Research of influence of the instantaneous value of the operating voltage to the evaluation of there liability of lightning protection of overhead lines / A.V. Zhurahovskiy, I.V. Lishchak, T.V. Binkevych // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 23-27. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

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

**Журахівський Анатолій Валентинович** – доктор технічних наук, професор Національного університету «Львівська політехніка».

**Жураховский Анатолий Валентинович** – доктор технічних наук, професор Національного університету «Львівська політехніка».

**Zhurakhivskiy Anatolii Valentynovich** – Doctor of Technical Sciences, Professor of Lviv Politechnic National University.

**Лищак Ігор Володимирович** – провідний спеціаліст, Національний університет «Львівська політехніка».

**Лищак Игорь Владимирович** – ведущий специалист, Национальный университет «Львівська політехніка».

**Lishchak Ihor Volodymyrovych** – Leading Specialist, Lviv Politechnic National University.

**Бінкевич Тарас Володимирович** – аспірант, Національний університет «Львівська політехніка»; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru.

**Бинкевич Тарас Владимирович** – аспирант, Национальный университет «Львівська політехніка»; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru.

**Binkevych Taras Volodymyrovych** – PhD Student, Lviv Politechnic National University; тел: (093)6974062; e-mail: 0507019417@mail.ru

УДК 621.316.97

**В. В. КНЯЗЄВ****ОБНОВЛЕННЯ НАЦІОНАЛЬНИХ СТАНДАРТІВ В СФЕРІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ**

У статті наведено аналіз національних стандартів України у галузі електромагнітної сумісності (ЕМС) технічних засобів (ТЗ) ідентичних європейським, які прийнято методом підтвердження, з наданням чинності з 1 січня 2016 року. Порівняння вимог цих стандартів з аналогічними, які були чинні в Україні та введені методом перекладу відповідних стандартів ІЕС, має сенс з різних причин. Важливо визначити чи є між ними суттєві відмінності, які необхідно враховувати виробникам ТЗ та органами з оцінки відповідності при здійсненні випробувань ТЗ. Крім того, є формальна сторона питання, що пов'язана з необхідністю внесення змін до сфери акредитації випробувальних лабораторій. Визначено, що суттєвих відмінностей не має. Автор також вважає недоцільною відміну чинності попередніх редакцій стандартів.

**Ключові слова:** електромагнітна сумісність технічних засобів, національні стандарти, стандарти європейського союзу, стандарти міжнародної електротехнічної комісії, емісія, несприйнятливість.

В статье приведен анализ национальных стандартов Украины в области электромагнитной совместимости (ЭМС) технических средств (ТС) идентичных европейским, которые приняты методом подтверждения, в связи с вступлением в силу с 1 января 2016 года. Сравнение требований этих стандартов с аналогичными, которые действовали в Украине и введены методом перевода соответствующих стандартов МЭК, имеет смысл по разным причинам. Представляется важным определить между ними существенные различия, которые необходимо учитывать производителям ТС и органам по оценке соответствия при осуществлении испытаний ТС. Кроме того, есть формальная сторона вопроса, связанная с необходимостью внесения изменений в сферу аккредитации испытательных лабораторий. Определено, что существенных различий нет. Автор также считает нецелесообразным отмену предыдущих редакций стандартов.

**Ключевые слова:** электромагнитная совместимость технических средств, национальные стандарты, стандарты европейского союза, стандарты международной электротехнической комиссии, эмиссия, невосприимчивость.

This scientific paper analyzes the National Standards of Ukraine on the electromagnetic compatibility (EMC) of technical equipment identical to European. The standards were approved using the method of attestation, and came into effect on January 1, 2016. The comparison of the requirements provided for by European Standards with those that were in force in Ukraine and were introduced by way of the translation of relevant IEC standards makes sense for different reasons. It is rather important to draw essential distinctions between them that should be taken into consideration by the manufacturers of equipment and Conformity Assessment Bodies, when carrying out the tests of equipment. In addition, there is also a formal aspect of this issue related to the need of making the amendments in the accreditation of test laboratories. It has been established that essential differences are not available. The author also believes that the annulment of the previous wordings of standards is pointless.

**Keywords:** electromagnetic compatibility of technical equipment, national standards, EU standards, International Electrotechnical Commission standards, emissions, immunity.

**Вступ.** Наказом МЕРТ України від 29.12.2014 №1483 та Наказом УкрНДНЦ від 12.02.2016 №34 здійснено прийняття нормативних документів України, змін та поправок до національних стандартів України, гармонізованих з міжнародними та європейськими нормативними документами та скасування національних документів і міждержавних стандартів в Україні. Серед цих документів є низка таких що стосуються галузі електромагнітної сумісності. Нові стандарти прийняте методом підтвердження з наданням чинності з 1 січня 2016 року. У зв'язку з цим виникла потреба проаналізувати наявність суттєвих відмінностей між стандартами, які введено, та їх аналогами, які вже скасовано, чи буде скасовано з 1 січня 2018 року. Задача обумовлена необхідністю мати таку інформацію виробникам продукції та органам з оцінки відповідності.

**Мета роботи.** Надати інформацію фахівцям зі стандартизації у галузі електромагнітної сумісності, органам з оцінки відповідності та виробникам обладнання, на яке поширюється вимоги Технічного регламенту України з ЕМС, щодо відмінності стандартів чинних з 01.01.2016р. від відповідних заміненних стандартів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Перелік стандартів у галузі ЕМС, які прийняте методом підтвердження та надано чинності з 01.01.2016 за Наказом УкрНДНЦ від 12.02.2016 №34, наведено в табл. 1. У табл. 1 вказане лише стандарти, які відносяться до частини 3 «Норми» та частини 6 «Родові стандарти» серії EN 61000-4. Номер у першому стовпчику таблиці відповідає номеру у Наказі.

Перелік стандартів у галузі ЕМС, які прийняте методом підтвердження та надано чинності з 01.01.2016 за Наказом МЕРТ України від 29.12.2014 №1483, наведено в табл. 2. До табл. 2 включено лише стандарти, які мають найбільш широке застосування на практиці. У Наказі міститься понад 85 стандартів на продукцію, які не може бути розглянуте у рамках даної статті.

Для досягнення визначеної мети необхідно проаналізувати ланцюг прийняття кожного стандарту. Національні стандарти України (ДСТУ) які розглядаємо прийняте методом підтвердження конкретної редакції відповідного стандарту Європейського Союзу (EN) мовою оригіналу (англійською). В свою чергу, стандарти Європейського Союзу є ідентичними відповідним стандартам Міжнародної Електротехнічної Комісії (ІЕС), та приймаються паралельним голосу-

ванням IEC та CENELEC (відповідний Європейський комітет стандартизації). В наслідок чого, стандарт EN фактично містить декілька сторінок із зазначенням факту ідентичності стандарту IEC та іноді доповнення, які не стосуються технічних аспектів. Раніше, в

Україні було надано чинності, як правило, стандартам IEC, методом перекладу. Таким чином, необхідно аналізувати зміст стандартів IEC які впроваджено шляхом підтвердження, з тими редакціями, які були чинні раніше.

Таблиця 1 – Стандарти яким надано чинності Наказом УкрНДНЦ від 12.02.2016 №34

Номер	Позначення стандарту	Назва стандарту
118	ДСТУ EN 61000-3-2:2015 (EN 61000-3-2:2006, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу). — Вперше
119	ДСТУ EN 61000-3-2:2015/Зміна № 1:2015 (EN 61000-3-2:2006/A1:2009, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу)
120	ДСТУ EN 61000-3-2:2015/Зміна № 2:2015 (EN 61000-3-2:2006/A2:2009, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 3-2. Норми. Норми на емісію гармонік струму (для сили вхідного струму обладнання не більше ніж 16 А на фазу)
121	ДСТУ EN 61000-3-3:2015 (EN 61000-3-3:2008, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Норми. Нормування флюктуацій напруги і флікера в низьковольтних системах електропостачання для устаткування з номінальним струмом силою не більше ніж 16 А. – Вперше
122	ДСТУ EN 61000-6-1:2015 (EN 61000-6-1:2007, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-1. Родові стандарти. Несприйнятливості обладнання у житловому і торговому середовищах та у виробничих зонах з малим енергоспоживанням. На заміну ДСТУ IEC 61000-6-1:2007
123	ДСТУ EN 61000-6-2:2015 (EN 61000-6-2:2005, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-2. Родові стандарти. Несприйнятливості обладнання в промисловому середовищі. На заміну ДСТУ IEC 61000-6-2:2008
124	ДСТУ EN 61000-6-2:2015/ Поправка № 1:2015 (EN 61000-6-2:2005/AC:2005, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-2. Родові стандарти. Несприйнятливості обладнання в промисловому середовищі
125	ДСТУ EN 61000-6-3:2015 (EN 61000-6-3:2007, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-3. Родові стандарти. Емісія завод у житловому і торговому середовищах та у виробничих зонах з малим енергоспоживанням – На заміну ДСТУ IEC 61000-6-3:2007
126	ДСТУ EN 61000-6-3:2015/Зміна № 1:2015 (EN 61000-6-3:2007/A1:2011, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-3. Родові стандарти. Емісія завод у житловому і торговому середовищах та у виробничих зонах з малим енергоспоживанням
127	ДСТУ EN 61000-6-3:2015 / Зміна № 1:2015/Поправка № 1:2015 (EN 61000-6-3:2007 /A1:2011/AC:2012, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-3. Родові стандарти. Емісія завод у житловому і торговому середовищах та у виробничих зонах з малим енергоспоживанням
128	ДСТУ EN 61000-6-4:2015 (EN 61000-6-4:2007, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-4. Родові стандарти. Емісія завод у виробничих зонах – На заміну ДСТУ IEC 61000-6-4:2009
129	ДСТУ EN 61000-6-4:2015/Зміна № 1:2015 (EN 61000-6-4:2007/A1:2011, IDT)	Електромагнітна сумісність. Частина 6-4. Родові стандарти. Емісія завод у виробничих зонах

Таблиця 2 – Стандарти яким надано чинності Наказом МЕРТ України від 29.12.2014 №1483

Позначення національних стандартів	Назва національних стандартів	Позначення європейських стандартів
ДСТУ EN 55011:2014	Обладнання промислове, наукове та медичне радіочастотне. Характеристики електромагнітних завод. Норми та методи вимірювання – На заміну ДСТУ CISPR 11:2007	EN 55011:2009 EN 55011:2009/A1:2010
ДСТУ EN 55022:2014	Обладнання інформаційних технологій. Характеристики радіозавод. Норми та методи вимірювання – На заміну ДСТУ CISPR 22:2007	EN 55022:2010 EN 55022:2010/AC:2011
ДСТУ EN 55024:2014	Обладнання інформаційних технологій. Характеристики несприйнятливості до завод. Норми та методи вимірювання – На заміну ДСТУ CISPR 24:2008	EN 55024:2010
ДСТУ EN 61000-3-3:2014	Електромагнітна сумісність. Частина 3-3. Норми. Норми на рівні флюктуацій напруги та флікера в низьковольтних системах електроживлення для устаткування з номінальною силою струму до 16 А на фазу, не призначеного для підключення за певних умов – На заміну ДСТУ EN 61000-3-3:2012 та ДСТУ EN 61000-3-3:2004	EN 61000-3-3:2013

У табл. 3 наведено ланцюги для кожного зі стандартів. Слід відмітити, що публікації CISPR у рамках

цієї статі розглядаються як стандарти IEC. Цей підхід ґрунтується на таких обставинах: Комітет CISPR є

структурним підрозділом ІЕС, тому процедура прийняття стандартів EN не відрізняється від описаної вище. Проаналізуємо дані табл. 3.

Стандарти ДСТУ EN 55011:2014, ДСТУ EN 55022:2014 та ДСТУ EN 55024:2014 базуються на нових редакціях стандартів (публікаціях) CISPR. Тому, за формальним ознакою не можуть бути визнані ідентичними попереднім редакціям національних стандартів. Проте, суттєвими з точки зору практики є відмінності що стосуються деталізації норм лише у публікації CISPR 11:2009, де введено норми на рівень випромінювання магнітного поля у діапазоні частот від 9 кГц до 30 кГц. Слід відзначити, що вже існує нова редакція CISPR 11:2015 Ed.6.0.

Публікація CISPR 22:2008 (Ed.6.0) має несуттєві відмінності від CISPR 22:2006 (Ed.5.2), про що прямо вказане у Передмові до стандарту.

З таблиці 3 видно, що чинні стандарти серії ДСТУ EN 61000-6-\*:2015 відрізняються від стандартів серії ДСТУ ІЕС61000-6-\*, які буде скасоване 01.01.2018 р., лише доповненнями. Зміст цих доповнень стосується лише організаційних питань та онов-

лення переліку нормативних посилань. Отже, з технічної точки зору ці редакції ДСТУ еквівалентні.

Більш складна ситуація зі стандартами ДСТУ EN 61000-3-2:2015 та ДСТУ EN 61000-3-3:2015. Стандарт ДСТУ EN 61000-3-2:2015 є ідентичним стандарту ІЕС 61000-3-2:2006, якому був ідентичним скасований стандарт ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2008. Таким чином, зроблена заміна має лише відмінність у позначені стандарту. Слід також відмітити, що у ЄС вже надано чинності новій редакції EN 61000-3-2:2014, імплементація якої до національних нормативних документів мало бути здійснено до 30.03.2015р., а попередню редакцію має бути скасоване до 30.06.2017. Отже, слід очікувати наступних змін.

Стандарт ДСТУ EN 61000-3-3:2014 є ідентичним стандарту ІЕС 61000-3-3:2008. Саме цьому стандарту був ідентичним скасований з 01.01.2016 ДСТУ EN 61000-3-3:2012. Проте, попередня редакція стандарту ДСТУ ІЕС 61000-3-3:2004 залишається чинною до 01.01.2018. Слід враховувати, що ІЕС надано чинності новій редакції ІЕС 61000-3-3:2013, що також буде враховане у най ближчим часом.

Таблиця 3 – Порівняння редакцій стандартів яким надано чинності з такими які замінено

Стандарт України чинний з 01.01.2016	Стандарт EN	Стандарт ІЕС	Замінений стандарт України	Стандарт EN	Стандарт ІЕС
ДСТУ EN 55011:2014	EN 55011:2009; AC:2010	CISPR 11:2009 Ed.5.0	ДСТУ CISPR 11:2007 <sup>1</sup>	-	CISPR 11:2004 Ed.4.1
ДСТУ EN 55022:2014	EN 55022:2010; AC:2011	CISPR 22:2008 Ed.6.0	ДСТУ CISPR 22:2007 <sup>1</sup>	-	CISPR 22:2006 Ed. 5.0
ДСТУ EN 55024:2014	EN 55024:2010	CISPR 24:2010	ДСТУ CISPR 24:2008 <sup>1</sup>	-	CISPR 24:1997
ДСТУ EN 61000-3-2:2015; Зміна №1:2015; Зміна №2:2015	EN 61000-3-2:2006; A1:2009 A1:2009	ІЕС 61000-3-2:2006	ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2004 <sup>1</sup> ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2008 <sup>1</sup>	-	ІЕС 61000-3-2:2004 ІЕС 61000-3-2:2006
ДСТУ EN 61000-3-3:2014	EN 61000-3-3:2008	ІЕС 61000-3-3:2008	ДСТУ ІЕС 61000-3-3:2004 <sup>2</sup> ДСТУ EN 61000-3-3:2012 <sup>1</sup>	EN 61000-3-3:1995 EN 61000-3-3:2008	ІЕС 61000-3-3:1994 ІЕС 61000-3-3:2008
ДСТУ EN 61000-6-1:2015	EN 61000-6-1:2007	ІЕС61000-6-1:2005	ДСТУ ІЕС61000-6-1:2007 <sup>2</sup>	-	ІЕС61000-6-1:2005
ДСТУ EN 61000-6-2:2015; Правка №1:2105	EN 61000-6-2:2005; AC:2005	ІЕС61000-6-2:2005	ДСТУ ІЕС61000-6-2:2008 <sup>2</sup>	-	ІЕС61000-6-2:2005
ДСТУ EN 61000-6-3:2015; Зміна №1:2015; Поправка №1:2015	EN 61000-6-3:2007; A1:2011; A1:2011/AC:2012	ІЕС61000-6-3:2006	ДСТУ ІЕС61000-6-3:2007 <sup>2</sup>	-	ІЕС61000-6-3:2006
ДСТУ EN 61000-6-4:2015; Зміна №1:2015	EN 61000-6-4:2007; A1:2011	ІЕС61000-6-4:2006	ДСТУ ІЕС61000-6-4:2009 <sup>2</sup>	-	ІЕС61000-6-4:2006

Примітки:

<sup>1</sup> Стандарти скасовано з 01.01.2016.

<sup>2</sup> Стандарти буде скасовано з 01.01.2018.

**Висновки.** Важливими для фахівців зі стандартизації у галузі електромагнітної сумісності, органів з оцінки відповідності та виробників обладнання, на яке поширюється вимоги Технічного регламенту України з ЕМС затвердженого Постановою Кабінету міністрів України від 16 грудня 2015 р. № 1077, є такі ствердження:

Стандарти ДСТУ EN 55011:2014, ДСТУ EN 55022:2014 та ДСТУ EN 55024:2014 базуються на нових редакціях публікації CISPR. Тому, за формальним ознакою не можуть бути визнані ідентичними попереднім редакціям національних стандартів. Проте, суттєвими з точки зору практики є відмінності що стосуються деталізації норм лише у публікації CISPR

11:2009, де введено норми на рівень випромінювання магнітного поля у діапазоні частот від 9 кГц до 30 кГц.

Публікація CISPR 22:2008 (Ed.6.0) має несуттєві відмінності від CISPR 22:2006 (Ed.5.2), про що прямо вказане у Передмові до стандарту. Тому, ДСТУ EN 55022:2014 та ДСТУ CISPR 22:2007 за технічних вимог є ідентичними.

Чинні стандарти серії ДСТУ EN 61000-6-1:2015 - ДСТУ EN 61000-6-4:2015 з технічної точки зору еквівалентні стандартам ДСТУ ІЕС61000-6-1:2007, ДСТУ ІЕС61000-6-2:2008, ДСТУ ІЕС61000-6-3:2007, ДСТУ ІЕС61000-6-4:2009, відповідно.

Стандарт ДСТУ EN 61000-3-2:2015 є ідентичним стандарту ІЕС 61000-3-2:2006, якому був ідентичним скасований стандарт ДСТУ ІЕС 61000-3-2:2008. Таким чином, зроблена заміна має лише відмінність у позначенні стандарту.

Стандарт ДСТУ EN 61000-3-3:2014 є ідентичним стандарту ІЕС 61000-3-3:2008. Саме цьому стандарту був ідентичним скасований з 01.01.2016 ДСТУ EN 61000-3-3:2012.

Отже, більшість з розглянутих нових стандартів не містить принципових технічних відмінностей від попередніх редакцій.

Поступила (received) 14.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Оновлення національних стандартів в сфері електромагнітної сумісності / В.В. Князев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 28-31. – ISSN 2079-0740.**

**Обновление национальных стандартов в сфере электромагнитной совместимости / В.В. Князев // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 28-31. – ISSN 2079-0740.**

**Updating national standards in the field of electromagnetic compatibility / V.V. Kniaziev // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 28-31. – ISSN 2079-0740.**

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

**Князев Володимир Володимирович** – провідний науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Науково-дослідний та проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

**Князев Владимир Владимирович** – ведущий научный сотрудник, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», тел.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

**Knyaziev Volodymyr Volodymyrovych** – Principal Scientist, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Staff Scientist, Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-68-68; e-mail: knyaz2@i.ua.

УДК 621.762: 621.762.5: 621.314

**А. А. КОВАЛЕНКО, О. Н. СИЗОНЕНКО**

**МЕТОД УМЕНЬШЕНИЯ ВСПЛЕСКА НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДНЫХ ДИОДАХ ШОТТКИ УСТРОЙСТВА ИСКРОПЛАЗМЕННОГО СПЕКАНИЯ ДИСПЕРСНЫХ КОМПОЗИЦИЙ**

У роботі вирішено задачу зменшення сплеску зворотної напруги на діодах Шоттки у пристрої іскроплазмового спікання (ІПС) дисперсних композицій шляхом використання RC-демпфера, запропоновано методику розрахунку його параметрів (ємності та опору). Використання RC-демпфера забезпечило зменшення величини зворотної напруги на діодах на 40 % та збільшення вхідної напруги пристрою ІПС до 380 В трифазної змінної напруги, що дозволить здійснювати спікання тугоплавких дисперсних композицій.

**Ключові слова:** іскроплазмове спікання, метод розрахунку RC демпфера, діод Шоттки, сплеск напруги, RC-ланцюг, моделювання перехідних процесів.

В работе решена задача уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки в установке искроплазменного спекания (ИПС) дисперсных композиций путем применения RC-демпфера, предложена методика расчета его параметров (емкости и сопротивления). Применение RC-демпфера обеспечит уменьшение величины обратного напряжения на диодах на 40 % и увеличение входного напряжения устройства ИПС до 380 В трехфазного переменного напряжения, что позволит осуществлять спекание тугоплавких дисперсных композиций.

**Ключевые слова:** искроплазменное спекание, метод расчета RC демпфера, диод Шоттки, всплеск напряжения, RC-цепь, моделирование переходных процессов.

The paper solved the problem of reducing the surge voltage at the output Schottky diodes in the setup for spark plasma sintering (SPS) of dispersed compositions by the addition of the damping circuit. The methods of calculating the snubber circuit to reduce the surge voltage of the Schottky diodes, which, owing to the regularities obtained in the analysis of literary sources and the results of

specially performed experiments allow determining the parameters of the damping circuit elements (capacitance and resistance) and ensuring the trouble-free operation of the device, the resistor power. The application of damping RC circuits in the SPS setups and the methods of calculation of its parameters allows to eliminate short-term emissions and high-frequency fluctuations, to protect the diodes from over-voltage, to reduce the magnitude of reverse voltage on the diodes by 40 % (from 43.6 V to 26.4 V). The use of the damping circuit will increase the input voltage of the experimental specimen of the SPS generator device up to 380 V three-phase AC with a common neutral, which in turn will increase the current for sintering the dispersed compositions and carry out the sintering of refractory powders, as well as sintering of specimens of dispersed compositions with a diameter of 20 mm.

**Keywords:** spark plasma sintering, method of calculation of RC damper, Schottky diode, voltage surge, RC circuit, simulation of transients.

**Введение.** Современные технологии, в которых используются дисперсно-упрочненные ультрадисперсными частицами композиционные материалы, позволяют значительно повысить физико-механические характеристики функциональных материалов.

Для сохранения мелкозернистой структуры материала используют методы консолидации концентрированными потоками энергии, которые отличаются высокими скоростями нагрева и меньшим временем выдержки при максимальной температуре, чем при использовании традиционных методов спекания (горячее прессование, спекание сверхвысоким давлением, горячее изостатическое прессование). Одним из таких методов является искроплазменное спекание (ИПС) [1, 2].

Процесс ИПС представляет собой пропускание суперпозиции тока высокой частоты с постоянной составляющей через дисперсный порошок при использовании специализированного генератора ИПС.

В настоящее время в ИИПТ НАН Украины разработана установка ИПС [3], которая имеет параметры: входное напряжение 220 В, выходной ток 1100 А и выходное напряжение до 10 В. Эта установка позволяет спекать порошки при температурах от 600 °С до 1300 °С при диаметре спекаемого образца – 10 мм. Для того чтобы перейти к спеканию тугоплавких порошков, а также спеканию образцов большего диаметра (20 мм), необходимо разработать генератор большей мощности.

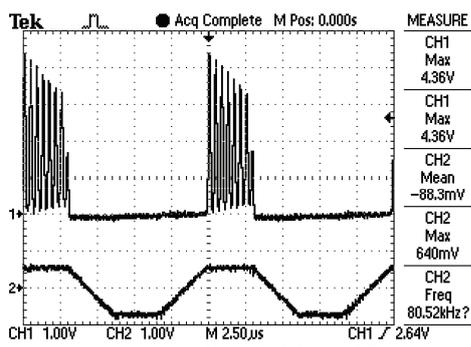


Рисунок 1 – Осциллограмма обратного напряжения на диодах экспериментального образца устройства ИПС (при измерении использовался делитель напряжения 1:10), при входном напряжении источника 230 В

Выполняя физическое моделирование, при разработке электрической схемы генератора для спекания дисперсных композиций было установлено, что в процессе спекания происходит всплеск напряжения на выходных диодах Шоттки экспериментального образца устройства. Так, при питающем напряжении сети

230 В происходит всплеск напряжения на диодах 43,6 В (см. рис. 1, осциллограмма 1-го канала), а максимальное допустимое напряжение – 45 В [4], поэтому дальнейшее увеличение питающего напряжения, которое необходимо для разработки более мощной установки, может привести к выходу из строя оборудования.

Учитывая все вышесказанное была определена цель данной работы – поиск метода решения проблемы уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах устройства ИПС.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- выбор метода уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки;
- разработка методики расчета демпфирующей цепи для уменьшения всплеска напряжения диодов Шоттки;
- выбор программной среды для моделирования схематического решения проблемы;
- моделирование схемы силовой части установки ИПС;
- экспериментальная проверка полученных результатов.

**Поиск метода уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки.** Проанализировав литературные источники [5-9] и проведя ряд экспериментов – уменьшение всплеска напряжения на диодах Шоттки в установке ИПС возможно за счет методов, представленных в табл. 1.

Анализ полученных экспериментальных результатов показал, что помеха, вызывающая всплеск напряжения на выходных диодах возникает из-за индуктивности рассеивания в трансформаторе.

В работе [5] описано решение проблемы режима работы ключевых элементов, в которой устранены кратковременные выбросы и высокочастотные колебания, а также сведены к минимуму коммутационные потери в ключевых элементах, что в целом гарантирует надежную работу устройства, за счет шунтирования диодов демпфирующими RC-цепями.

Подобный метод описан и в работах [6–11], в которых показано, что необходимо устанавливать параллельно выходным диодам демпфер колебаний (в зарубежных источниках snubber (снаббер) – последовательно соединенные конденсатор и резистор, так называемый RC-демпфер), который «поглощает» всплеск электрической энергии.

Расчет демпфера заключается в определении номиналов конденсатора и резистора, а также в определении мощности резистора.

На основании анализа литературных источников и проведенных экспериментов были выявлены закономерности, позволяющие определить номиналы элементов демпфирующей цепи.

Таблица 1 – Методы уменьшения всплеска напряжения на диодах Шоттки

Метод решения проблемы	Достоинства	Недостатки
Уменьшение входного напряжения в установку ИПС	Уменьшается амплитуда обратного напряжения на диодах.	Остаются кратковременные выбросы и высокочастотные колебания. Уменьшается выделяемая мощность для спекания образцов.
Уменьшение индуктивности рассеивания трансформатора	Уменьшается амплитуда обратного напряжения на диодах.	Необходима перемотка трансформатора. Невозможно полностью избавиться от индуктивности рассеивания для уменьшения кратковременных выбросов.
Добавление демпфирующей цепи	Уменьшится амплитуда обратного напряжения на диодах, а также кратковременные выбросы и высокочастотные колебания.	Сложность коммутационных процессов и влияние паразитных параметров не позволяет рассчитать аналитически параметры демпфирующей цепи существующими методами. Усложнение схемы.

Для расчета параметров  $R$  и  $C$  в первую очередь необходимо определить индуктивность рассеивания вторичной обмотки трансформатора и частоту колебаний обратного напряжения на диоде. Индуктивность рассеивания вторичной обмотки трансформатора была измерена LCR – метром (MCP BR2820 LCR METER), и составляла  $L_{S2} = 0,4 \cdot 10^{-6}$  (Гн), а частота колебаний определялась из осциллограммы (см. рис. 2) с помощью встроенного расчетного блока осциллографа (Tektronix TDS 1012B),  $f_{н.к.} = 2,347 \cdot 10^6$  (Гц).

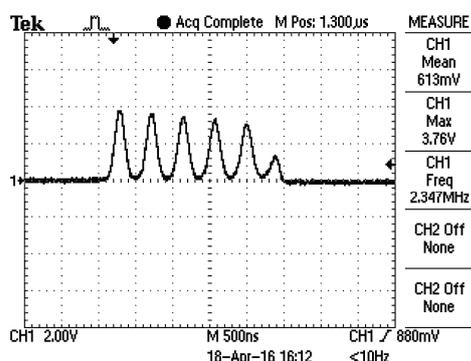


Рисунок 2 – Осциллограмма обратного напряжения на диодах экспериментального образца устройства спекания дисперсных композиций (при измерении использовался делитель напряжения 1:1), при входном напряжении источника 40 В.

**Расчет демпфирующей цепи для диода.** На основании анализа литературных данных [4 – 12] и ре-

зультатов экспериментальных исследований была получена эмпирическая закономерность определения параметров сопротивления резистора и емкости конденсатора и разработан метод расчета демпфирующей цепи для диода.

Индуктивное  $X_L$  (1) и емкостное  $X_C$  (2) сопротивления цепи, Ом.

$$X_L = \omega \cdot L_{S2}, \quad (1)$$

где  $L_{S2}$  – паразитная индуктивность, индуктивность рассеивания вторичной обмотки трансформатора, Гн;

$$X_C = 1/(\omega \cdot C), \quad (2)$$

где  $C$  – емкость демпфирующей цепи, Ф;  $\omega$  – угловая частота в радианах в 1 с.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{н.к.}, \quad (3)$$

где  $f_{н.к.}$  – частота паразитных колебаний.

Расчетное значение индуктивного сопротивления цепи  $X_L = 5,9$  Ом.

В ходе проведенных экспериментов была получена эмпирическая зависимость, которая определяет номинал сопротивления резистора (4) и емкостное сопротивление (5) RC-демпфирующей цепи.

$$R = X_L / K, \quad (4)$$

$$X_C = X_L / K^2, \quad (5)$$

где  $K$  – эмпирический коэффициент, полученный во время экспериментов для шести сдвоенных диодов Шоттки типа STPS24045TV, подключенных параллельно,  $K = 3,5$ ;

Для определения сопротивления RC-цепи использовались зависимости индуктивного сопротивления цепи (1), угловой частоты (3) и эмпирической зависимости сопротивления резистора RC-демпфирующей цепи (4):

$$R = 2 \cdot \pi \cdot f_{н.к.} \cdot L_{S2} / K. \quad (6)$$

Также была определена емкость RC-цепи. Для этого использовали зависимости емкостного сопротивления (2), угловой частоты (3) и эмпирической зависимости емкостного сопротивления RC-демпфирующей цепи (5):

$$C = (K / (2 \cdot \pi \cdot f_{н.к.} \cdot L_{S2})) / L_{S2}. \quad (7)$$

Расчетные значения емкости и сопротивления для рассматриваемого случая составили:

$$R = 1,685 \text{ Ом};$$

$$C = 0,141 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Для защиты резистора от перегрева был выполнен расчет максимальной его мощности в процессе работы.

Мощность резистора рассчитывалась по формуле (8)

$$P_R = E_C \cdot f_p, \quad (8)$$

$$E_C = C \cdot U^2 / 2, \quad (9)$$

где  $E_C$  – энергия, запасенная в конденсаторе;  $f_p$  – рабочая частота силовой части, Гц;  $U$  – максимально допустимое обратное напряжение на диоде, В.

На основании уравнений (8) и (9) получена зависимость в виде (10).

$$P_R = f_p \cdot C \cdot U^2 / 2. \quad (10)$$

Расчетное значение мощности демпфирующего

резистора  $P_r = 11,407$  (Вт).

Прежде чем приступить к реализации выбранного метода уменьшения всплеска напряжения необходимо провести математическое моделирование электрической цепи с RC-демпфером.

**Моделирование схемы.** Проанализировав достоинства и недостатки программ схемотехнического моделирования [13–20], была выбрана программа LTspice IV от корпорации Linear Technology, которая в настоящее время относится к наиболее популярным эксплуатируемым системам схемотехнического моделирования для персонального компьютера.

Принципиальная схема силовой части экспериментального образца устройства ИПС без демпфирующей цепи, представлена на рис. 3, а осциллограмма, полученная при моделировании обратного напряжения на диодах, представлена на рис. 4.

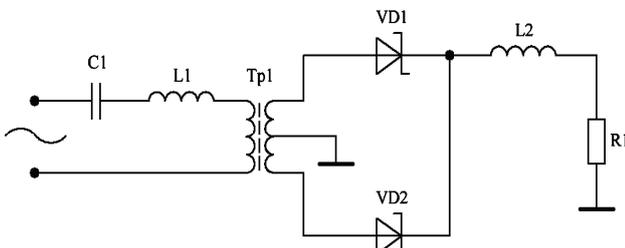


Рисунок 3 – Принципиальная схема силовой части, без демпфирующей цепи

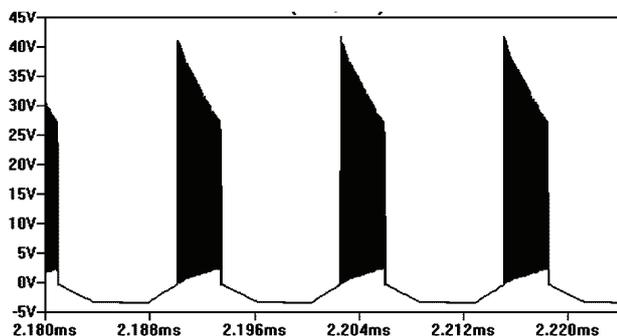


Рисунок 4 – Расчетная осциллограмма обратного напряжения на диодах экспериментального образца устройства спекания дисперсных композиций без демпфирующей цепи

При моделировании диоды Шоттки в схеме, были приняты идеальными. Поэтому высокочастотные колебания в модели несколько отличаются от реальных, это связано с несоответствием емкости модели, которая была выбрана максимально приближенной к реальным условиям по напряжению, и реальных диодов.

Однако дальнейшее моделирование схемы силовой части ИПС показало, что добавление расчетных демпфирующих RC-цепей (R2C2 и R3C3 на рис. 5) устраняет кратковременные выбросы и высокочастотные колебания (рис. 6)

В связи со сложностью подбора элементов соответственно расчетным, были выбраны ближайшие по номиналу, конденсатор типа K78-2 0,15 мкФ  $\pm 5\%$  1000 В, а резистор был подобран, при напряжении на

входе источника 230 В, из трех параллельно соединенных двухваттных резисторов по 5 Ом.

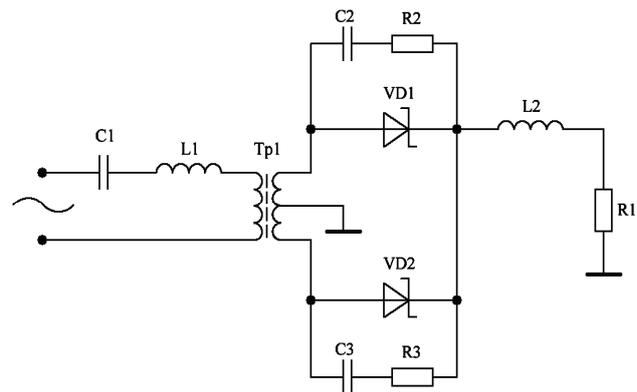


Рисунок 5 – Принципиальная схема силовой части с демпфирующими цепями

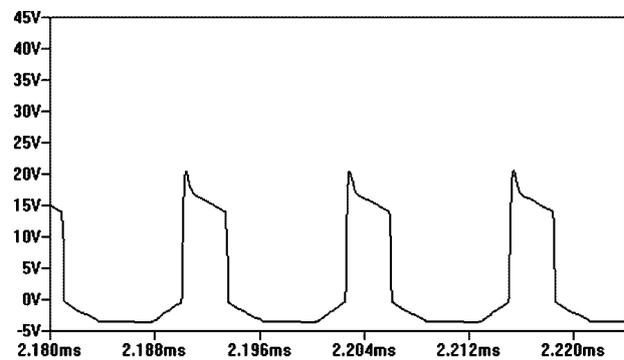


Рисунок 6 – Расчетная осциллограмма обратного напряжения на диодах экспериментального образца устройства спекания дисперсных композиций с расчетной демпфирующей цепью, моделируемой в программе LTspice IV

Для проверки результатов расчета и моделирования был поставлен специальный эксперимент, осциллограмма которого приведена на рис. 7.

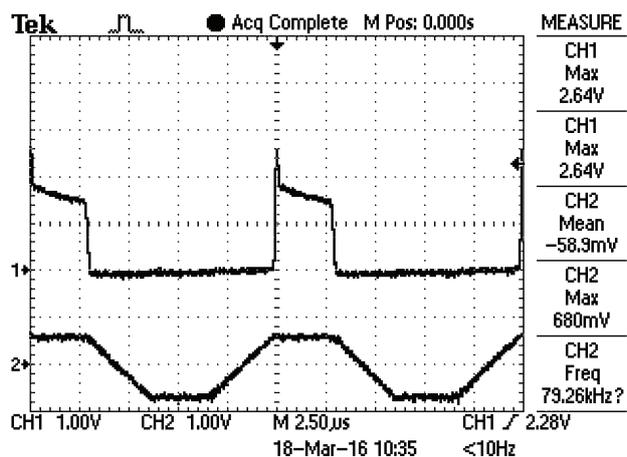


Рисунок 7 – Осциллограмма обратного напряжения на диодах с демпфирующей цепью экспериментального образца устройства спекания дисперсных композиций (при измерении использовался делитель напряжения 1:10), при входном напряжении источника 230 В

Из осциллограммы (см. рис. 7, осциллограмма 1-го канала) видно, что амплитуда обратного напря-

жения на диодах уменьшилась примерно на 40 %, устранены кратковременные выбросы и высокочастотные колебания.

Питание установки ИПС большей мощности осуществляется напряжением 380 В. Перед разработкой этого устройства, было проведено моделирование силовой части ИПС без демпфирующей цепи, расчетная осциллограмма представлена (рис.8) и с демпфирующими цепями, расчетная осциллограмма представлена (рис.9).

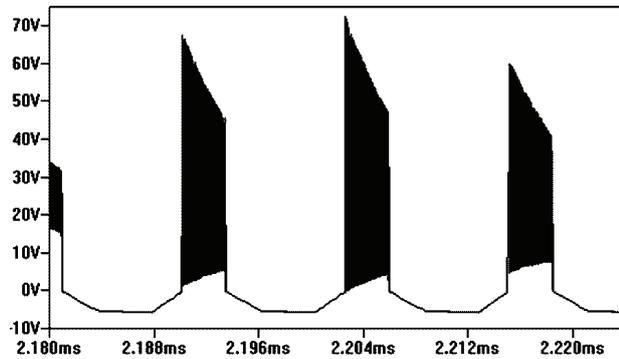


Рисунок 8 – Расчетная осциллограмма обратного напряжения на диодах без демпфирующей цепи

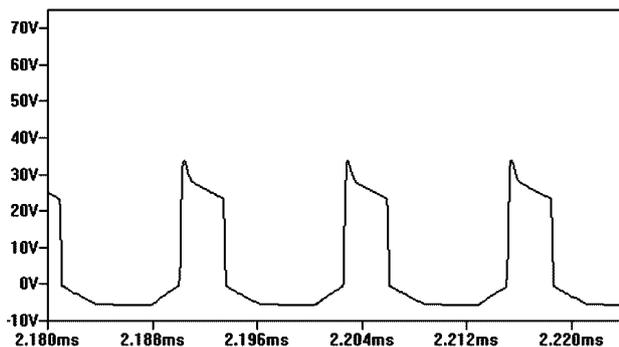


Рисунок 9 – Расчетная осциллограмма обратного напряжения на диодах с реальной демпфирующей цепью

Полученные результаты показали, что амплитуда обратного напряжения на диодах уменьшилась, при использовании демпфирующей цепи, примерно вдвое. Устранены кратковременные выбросы и высокочастотные колебания.

Использование демпфирующей цепи позволит увеличить входное напряжение в экспериментальном образце устройства генератора ИПС до 380 В, что в свою очередь позволит увеличить ток для спекания дисперсных композиций. При переходе с 230 В до 380 В требуется замена резистора  $RC$ -цепи для удовлетворения условия по максимальному обратному напряжению на диоде согласно его документации [4], при мощности резистора не менее 11,5 Вт.

**Выводы.** Установлено, что для уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки, генератора устройства ИПС, необходимо выполнить их шунтирование демпфирующими  $RC$ -цепями.

Применение  $RC$ -демпфера позволило уменьшить величину обратного напряжения на диодах на 40 % (с 43,6 В до 26,4 В).

Разработана методика расчета параметров эле-

ментов демпфирующей  $RC$ -цепи для диодов Шоттки, применяемых в установке ИПС.

#### Список литературы

1. Райченко А. И. Основы процесса спекания порошков пропусканием электрического тока / А. И. Райченко. – М.: Металлургия, 1987. – 129 с
2. Hong P. Spark Plasma Sintering of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm University S-10691. – Stockholm, Sweden, 2004. – 104 p.
3. Пат. України № 101575, МПК (2006) B22F 3/14, B22F 3/105, B30B 15/02. Пристрій для іскроплазмового спекання порошків / О. М. Сизоненко, А. І. Івлієв, О. І. Райченко, В. В. Литвинов, А. Д. Зайченко, С. В. Конотоп; заявник та патентовласник Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України. – № а 2012 00975; заявл. 30.01.2012; опубл. 10.04.2013, Бюл. №7. – 4 с.
4. STPS24045TV Power Schottky Rectifier. Електронний ресурс: <http://datasheet.octopart.com/STPS24045TV-STMicroelectronics-datasheet-40703.pdf>
5. Глазко Т. А. Схемотехнические и конструктивные методы обеспечения электромагнитной совместимости транзисторных преобразователей постоянного напряжения / Глазко Т. А., Сеньков В. И. – Электричество. – 1989. – № 2. – С. 37–42.
6. Rudy Severns. Design of snubbers for power circuits. Электронный ресурс: <http://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf>
7. William P. Robbins. Lecture Notes. Snubber Circuits. Электронный ресурс: <http://aboutme.samexent.com/classes/spring09/ee5741/Snubbers.pdf>
8. Иоффе Д. Разработка адаптера на 65 Вт с применением ШИМ-контроллера NCP1237 фирмы On Semiconductor / Д. Иоффе. – Компоненты и технологии. – 2011. – № 12. – С. 138–146.
9. Общий подход к расчету снабберных  $RC$ -цепей. Электронный ресурс: <http://www.proton-electrotex.com/ru/articles/obshhij-podxod-k-raschetu-snabbernyx>
10. Хоровиц П. Искусство схемотехники: в 2-х томах / П. Хоровиц, У. Хилл. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – Т. 1. 589 с.
11. Барегамян Г. В. Расчет параметров снаббера транзисторного ключа. / Г. В. Барегамян // Изв. НАН РА и ГИ-УА. Сер. ТН. – 2000. – Т. LIII, № 1.
12. Бакалов В. П. Основы теории цепей : Учебник для вузов / В. П. Бакалов, В. Ф. Дмитриков, Б. И. Круж // Под ред. В.П. Бакалова. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 597 с. – ISBN 5-256-01472-2.
13. SPICE Frequently Asked Questions. Электронный ресурс: <http://www.synopsys.com>
14. Цвенгер И. Г. Моделирование в среде PSpice: методические указания к лабораторным работам / И. Г. Цвенгер, В. Г. Макаров, А. М. Шарятов, А. Н. Миляшов, А. В. Васильев, Р. Ф. Сабитов, Д. Д. Михайлов, И. Р. Хайруллин. – Казан. гос. технолог. ун-т. – Казань, 2008. – 72 с.
15. Разевиг В. Д. Схемотехническое моделирование с помощью Micro-Cap 7 / В. Д. Разевиг. – М.: Горячая линия - Телеком, 2003. – 368 с.: ил. ISBN 5-93517-127-9
16. CircuitMaker 2000 User Manual. Электронный ресурс: [http://www.cs.nccu.edu.tw/~whliao/ds2003/cm\\_usermanual.pdf](http://www.cs.nccu.edu.tw/~whliao/ds2003/cm_usermanual.pdf)
17. ISSPICE4 User's Guide Электронный ресурс: <http://physics.usask.ca/~angie/ep311/isspice4.pdf>
18. Spectre Circuit Simulator Reference. Электронный ресурс: [http://eece.cu.edu/~fhussien/Spectre\\_tutorial.pdf](http://eece.cu.edu/~fhussien/Spectre_tutorial.pdf)
19. Linear Technology Corporation. Электронный ресурс: <http://www.linear.com>
20. Володин В. Краткое руководство по симулятору

LTspice Електронний ресурс: <http://valvolodin.narod.ru/articles/LTspice.pdf>

### References (transliterated):

1. Rajchenko A.I. Osnovy processa spekanija poroshkovopropuskaniem jelektricheskogo toka [Fundamentals of the process of sintering of powders by passing an electric current]. Moscow, Metallurgy, 1987. 129 p.
2. Hong Peng. Spark Plasma Sintering of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Based Ceramics. Doctoral Dissertation. Department of Inorganic Chemistry Stockholm University S-10691, Stockholm, Sweden, 2004, 104 p
3. Pat. Ukrayiny # 101575, MPK (2006) B22F 3/14, B22F 3/105, B30B 15/02. Prystriy dlya iskroplazmovoho spikannya poroshkiv / O.M. Syzonenko, A.I. Ivliyev, O.I. Raychenko, V.V. Lytvynov, A.D. Zaychenko, S.V. Konotop; zayavnyk ta patentovlasnyk Instytut impul'snykh protsesiv ta tekhnolohiy NAN Ukrayiny. – No a 2012 00975; zayavl. 30.01.2012; opubl. 10.04.2013, Byul. #7. 4 p.
4. STPS24045TV Power Schottky Rectifier. Jelektronnyj resurs: <http://datasheet.octopart.com/STPS24045TV-STMicroelectronics-datasheet-40703.pdf> (accessed 16.05.2016).
5. Glazenko, T.A., Sen'kov V.I. Shemotehnicheskie i konstruktivnye metody obespechenija jelektromagnitnoj sovmestimosti tranzistornyh preobrazovatelej postojannogo naprjazhenija. [Schematic design and methods of electromagnetic compatibility transistor converters a constant voltage], Jelektrichestvo, No 2, 1989, pp 37-42.
6. Rudy Severns. Design of snubbers for power circuits. Jelektronnyj resurs: <http://www.cde.com/resources/technical-papers/design.pdf> (accessed 16.05.2016).
7. William P. Robbins. Lecture Notes. Snubber Circuits. Jelektronnyj resurs: <http://aboutme.samexent.com/classes/spring09/ee5741/Snubbers.pdf> (accessed 16.05.2016).
8. Ioffe, D. Razrabotka adaptera na 65 Vt s primeneniem ShIM-kontrollera NCP1237 firmy On Semiconductor. [Development adapter 65W using NCP1237 PWM controller of the company On Semiconductor] Komponenty i tekhnologii, No 12, 2011, pp. 138–146.
9. Obshhij podhod k raschetu snabbernyh RC cepej. [General view on calculation of snubber RC-circuits] Jelektronnyj resurs: <http://www.proton-electrotex.com/ru/articles/obshhij-podhod-k-raschetu-snabbernyh-rc-cepej> (accessed 16.05.2016).

podhod-k-raschetu-snabbernyh (accessed 16.05.2016).

10. Horovitz Paul, Hill Winfield. The Art of Electronics. 1st Revised ed. Cambridge, London, New York, New Rochelle, Melbourne and Sydney, Cambridge University Press, 1980. (Rus. ed.: Horovic P., Hill U. Iskustvo shemotehniki, tom 1. Moscow, Mir, 1983 589 p).
11. Bagegamjan G.V. Raschet parametrov snabbera tranzistorного kljucha [Calculation of the parameters of the transistor switch snubber]. Izv. NAN RA i GIUA, Ser. TN, 2000, vol. LIII, No 1.
12. Bakalov V.P., Dmitrikov V.F., Kruk B.I. Osnovy teorii cepej [Fundamentals of circuit theory]: Uchebnik dlja vuzov; Pod red. V.P. Bakalova. Moscow: Gorjachaja linija – Telekom, 2007, 597 p. ISBN 5-256-01472-2.
13. SPICE Frequently Asked Questions. <http://www.synopsys.com>. (accessed 16.05.2016).
14. Cvenger I.G. Modelirovanie v srede PSpice: metodicheskie ukazaniya k laboratornym robotam/sost [Modelling in the environment PSpice: guidelines for laboratory work]. I.G. Cvenger, V.G. Makarov, A.M. Sharjapov, A.N. Miljashov, A.V. Vasil'ev, R.F. Sabitov, D.D. Mihajlov, I.R. Hajrullin. Kazan. gos. tehnolog. un-t, Kazan', 2008, 72 p.
15. Razevig V.D. Shemotehnicheskoe modelirovanie s pomoshh'ju Micro-Cap 7 [Circuit simulation using the Micro-Cap 7]. V.D. Razevig, Moscow: Gorjachaja linija-Telekom, 2003, 368 p. ISBN 5-93517-127-9
16. CircuitMaker 2000 CircuitMaker User Manual Jelektronnyj resurs: [http://www.cs.nccu.edu.tw/~whliao/ds2003/cm\\_usermanual.pdf](http://www.cs.nccu.edu.tw/~whliao/ds2003/cm_usermanual.pdf) (accessed 16.05.2016).
17. ISSPICE4 User's Guide Jelektronnyj resurs: <http://physics.usask.ca/~angie/ep311/isspice4.pdf> (accessed 16.05.2016).
18. Spectre Circuit Simulator Reference Jelektronnyj resurs: [http://eece.cu.edu/~fhussien/Spectre\\_tutorial.pdf](http://eece.cu.edu/~fhussien/Spectre_tutorial.pdf) (accessed 16.05.2016)
19. Linear Technology Corporation Jelektronnyj resurs: <http://www.linear.com>
20. Volodin V. Kratkoe rukovodstvo po simuljatoru LTspice. [Quick Guide to the simulator LTspice] Jelektronnyj resurs: <http://valvolodin.narod.ru/articles/LTspice.pdf> (accessed 16.05.2016).

Поступила (received) 02.11.2016

### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Метод зменшення сплеску напруги на вихідних діодах Шоттки пристрою іскроплазмового спікання дисперсних композицій / О. О. Коваленко, О. М. Сизоненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 31-36. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Метод уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки устройства искроплазменного спекания дисперсных композиций / А. А. Коваленко, О. Н. Сизоненко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 31-36. – Бібліогр.: 20 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Method of reducing surge voltage applied to the output Schottky diodes of devices for spark plasma sintering of dispersed compositions / O. O. Kovalenko, O. M. Syzonenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 31-36. – Bibliogr.: 20. – ISSN 2079-0740.**

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

**Коваленко А. А.** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (097) 716-19-75; e-mail: kovalenko\_a\_iipt@mail.ru.

**Коваленко А. А.** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, тел.: (097) 716-19-75; e-mail: kovalenko\_a\_iipt@mail.ru.

**Kovalenko O. O.** – Researcher Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPT, NASU), Mykolaiv, tel.: (097) 716-19-75; e-mail: kovalenko\_a\_iipt@mail.ru.

**Сизоненко Ольга Николаевна** – провідний науковий співробітник; доктор технічних наук, професор, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**Сизоненко Ольга Николаевна** – ведущий научный сотрудник; доктор технических наук, профессор, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, тел.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

**Syzonenko Olga Mykolayivna** – Leading Researcher, Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine (IPT, NASU), Mykolaiv, tel.: (066) 341-08-89; e-mail: sizonenko43@rambler.ru.

УДК 621.3

Г. М. КОЛИУШКО, А. В. ПЛИЧКО, Е. Г. ПОНУЖДАЕВА

## СОЗДАНИЕ УСТАНОВКИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ МАСЛА УИМ – 90, ЭТАПЫ ЕЕ МОДЕРНИЗАЦИИ

Розглянуто переваги та недоліки розробленого раніше пристрою для випробування масла УИМ – 90. Описано етапи удосконалення пристрою. Представлені основні технічні характеристики модернізованого УИМ – 90, маса і габарити якого значно знижені. Показані переваги нового пристрою у порівнянні з аналогами: підвищена надійність та точність вимірювання пробивної напруги, зменшений, наявність електромагнітного пристрою перемішування проби рідкого діелектрика, електронне управління, автоматичний режим роботи.

**Ключові слова:** пристрій для випробування масла, рідкий діелектрик, пробиття, вимірювальна чарунка, пробивна напруга, електромагнітний пристрій перемішування.

Рассмотрены преимущества и недостатки разработанной в 2001 г. установки для испытания масла УИМ–90. Описаны этапы усовершенствования установки. Представлены основные технические данные модернизированной УИМ–90, массогабаритные характеристики которой значительно снижены. Показаны преимущества новой установки по сравнению с аналогами: повышенная надежность, повышенная точность измерения пробивного напряжения, уменьшение тока в канале пробоя, наличие электромагнитного устройства перемешивания пробы жидкого диэлектрика, электронное управление, автоматический режим работы.

**Ключевые слова:** установка для испытания масла, жидкий диэлектрик, пробой, измерительная ячейка, пробивное напряжение, электромагнитное устройство перемешивания.

The features and unsatisfactory features of oil testing machine developed in 2001 were considered. Improvement stages were described. Main technical details of upgraded OTM-90 (УИМ-90) were presented, which mass-dimensional parameters were reduced dramatically. The advantages of new testing machine compared with analogues were illustrated: improved reliability, breakdown's voltage measurements improved accuracy, top-down in breakdown path, availability of electromagnetic device for dielectric's sample blending, electronic control, automatic operation, contemporary design, possibility to select the parameters of test sequence, availability of volatile memory, availability of main memory, which contains last test results, availability of remote control for testing machine calibration, availability of high voltage's turn-on interlock in the absence of sample cell, in the testing machine were applied the shut-down triplex system of test voltage excess for high voltage transformer: software, electronic and mechanical.

**Keywords:** oil testing machine, liquid dielectric, breakdown, test vessel, breakdown voltage, electromagnetic device blending.

**Введение.** Повышение безопасности работы персонала при испытаниях жидких диэлектриков на электрическую прочность, а также надежность работы испытательных установок является весьма актуальной задачей. Ряд проблем можно решить применением полной автоматизации режима работы, а также использованием защитных блокировок. Внедрение передовых решений с использованием «интеллектуального» управления, повышает надежность работы в целом.

**Постановка задачи.** В 1999 г. НИПКИ «Молния» НТУ «ХПИ» получил предложение от Северной энергосистемы НЭК «Укрэнерго» (г. Харьков) разработать и изготовить новый прибор для определения пробивного напряжения трансформаторного масла и других жидких диэлектриков, работающих в качестве изоляции в высоковольтных установках [1]. Находящийся в эксплуатации на этот момент времени аппарат для испытания масла АИМ–80 (изготовитель «Мосрентген» г. Москва), внешний вид которого представлен на рис. 1, имел возможность поднимать напряжение лишь до 80 кВ, тогда как появились изоляционные жидкости, пробивные значения напряжения которых превышали эту величину. В условиях распада СССР актуальным решением было создание отечественного прибора.

В результате работы специалистов института такой прибор, получивший название – установка для

испытания масла УИМ–90, был разработан в соответствии с [1]. Первая такая установка, модернизированная в 2012 г., до сих пор работает в Северной энергосистеме НЭК «Укрэнерго», зарекомендовав себя надежной и простой в эксплуатации.



Рисунок 1 – Аппарат АИМ–80

Внешний вид УИМ–90 в рабочем виде и в момент подготовки к работе изображен на рис. 2 и рис. 3. Установка включает в себя высоковольтный

испытательный стенд (рис. 3), выполненный в виде переносного пульта. В корпусе 1 стенда испытательного имеется испытательный отсек 2, в котором размещена измерительная ячейка 3 для испытываемого диэлектрика, выполненная в соответствии с [1]. Испытательный отсек закрывается прозрачной крышкой 4, снабженной блокировкой, предотвращающей подачу высокого напряжения при ее открывании. Слева от испытательного отсека расположена панель управления 5, содержащая элементы управления и индикации



Рисунок 2 – Установка для испытания масла УИМ-90

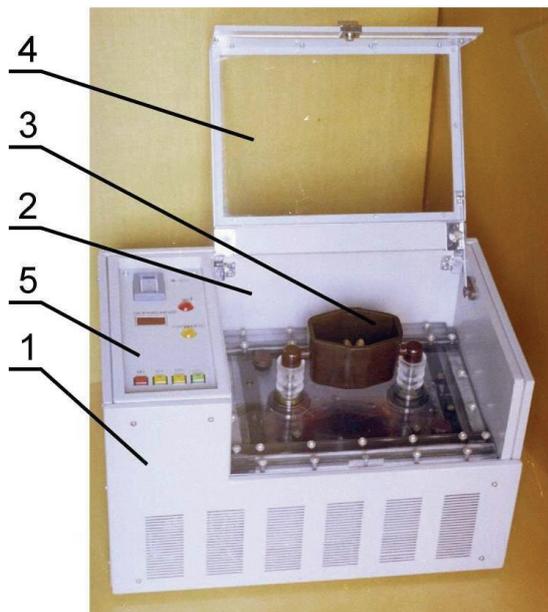


Рисунок 3 – Стенд испытательный установки УИМ-90:  
1 – корпус, 2 – испытательный отсек, 3 – измерительная ячейка, 4 – крышка, 5 – панель управления

На созданную установку были разработаны технические условия [2].

Установка УИМ-90 обладала рядом преимуществ, а именно: имела современный внешний вид; испытательное напряжение было увеличено до 90 кВ; имелись ряд блокировок, а также пульт дистанционного управления для проведения аттестации установки (на рис.3 не показан).

Установки УИМ-90 первой модификации экс-

плуатируются в Украине, России, Казахстане и в других странах, многие из них, проработав более 15 лет, зарекомендовали себя надежными в эксплуатации.

Тем не менее, установки этой модификации имели ряд недостатков: большие габариты (530x325x345 мм) и масса (50 кг); существенные трудозатраты при сборке установки (рис. 4); использование в качестве коммутационных аппаратов пускателей, создающих шум при работе и повышающих потребляемую мощность; использование в качестве регулятора подъема напряжения энергоемкого и ненадежного реверсивного двигателя ДСД-2-П1 [3]. При работе с установкой УИМ – 90 первой модификации обязательным было присутствие оператора для регистрации пробивного напряжения испытываемой жидкости. Необходимость перемешивания пробы диэлектрика специальной палочкой перед каждым подъемом напряжения создавала неудобства в обслуживании установки. Для устранения этих недостатков было принято решение модернизировать существующую модификацию.

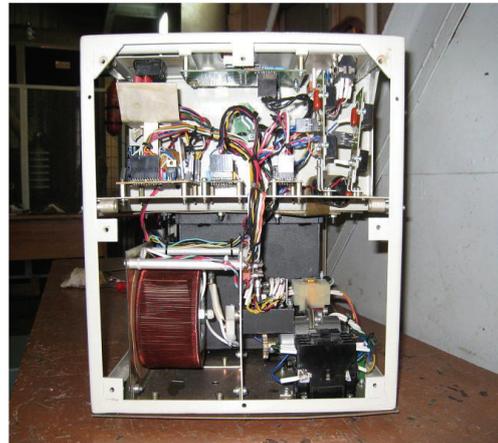


Рисунок 4 – Стенд испытательный УИМ-90 со снятой боковой панелью

**Описание разработки.** Основными результатами усовершенствования установки стали: создание электромеханического устройства перемешивания образца жидкого диэлектрика после пробоя; разработка новых схемных решений подъема напряжения, что позволило убрать стальные шестерни редуктора и заменить двигатель ДСД-2-П1 на шаговый двигатель; замена электромеханических реле на полупроводниковые ключи, что позволило снизить энергопотребление и шум; разработка платы индикации с применением жидкокристаллического дисплея, позволяющего увеличить количество отображаемой информации; наличие электронного процессорного управления, что обеспечило возможность работы и в ручном, и автоматическом режиме работы.

В результате нововведений уменьшились габариты и масса установки.

Внешний вид усовершенствованной установки представлен на рис. 5.

На дне испытательного отсека под ячейкой измерительной установлено устройство для перемешивания пробы жидкого диэлектрика. Устройство состоит

из двигателя, закрепленного на боковой стенке испытательного отсека, вала, передающего вращение на коническую зубчатую передачу, размещенную в цилиндрическом корпусе, где также находятся магниты. Вращение магнитов приводит в движение активатор, размещенный в испытательной ячейке и выполненный из ферромагнитного материала, что обеспечивает перемешивание пробы диэлектрика. Конструкция установки позволяет проводить перемешивание в ручном и в автоматическом режимах. В автоматическом режиме работы устройство для перемешивания включается на заданное время после электрического пробоя диэлектрика. В результате изменения платы регистрации электрического пробоя жидкого диэлектрика, ток в канале пробоя уменьшен и, тем самым, снижено разложение диэлектрика.



Рисунок 5 – Установка УИМ–90 с электромеханическим устройством перемешивания образца диэлектрика

На лицевой панели установки расположен жидкокристаллический цифровой индикатор, на котором отображаются информация о режиме управления установкой, параметры испытаний, а также результаты испытаний. На индикатор выводится информация, соответствующая следующему режиму работы установки: режим «Готовность»; режим «Работа»; режим «Настройка»; режим «Просмотр времени». В автоматическом режиме управления установка выполняет последовательность действий в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 6. Количество циклов испытания, включение/выключение перемешивания, а также значения времени отставания и перемешивания, задаются оператором в режиме «Настройка».

После нажатия кнопки «ПУСК», установка переходит в режим «Работа». Вся текущая информация отображается на жидкокристаллическом индикаторе: значение оставшегося времени отставания после заполнения ячейки; текущее значение действующего напряжения, приложенного к электродам ячейки; оставшееся время перемешивания; время отставания после перемешивания.

На время перемешивания после пробоя в нижней строке индикатора отображается значение напряжения

последнего пробоя. После окончания полного цикла работы установка переходит в режим «Готовность». Полная информация о текущем времени доступна к отображению в режиме «Просмотр времени».

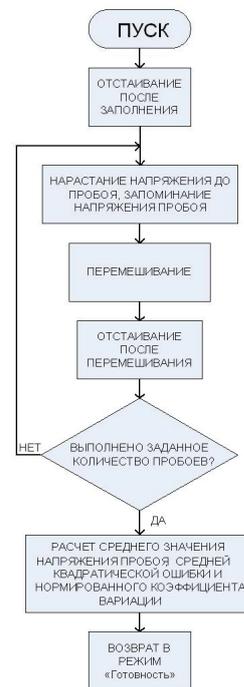


Рисунок 6 – Алгоритм управления установкой в автоматическом режиме

Дальнейшее усовершенствование установки велось в направлении снижения массы, уменьшения габаритов, повышения надежности работы. В этих целях был разработан новый высоковольтный трансформатор, металлический корпус которого заменен пластмассовым. Это позволило уменьшить габариты корпуса, и, следовательно, объем трансформаторного масла, заполняющего его. За счет замены материала сердечника с динамной стали 2212 на сталь 3408, имеющую лучшие электротехнические характеристики [4], уменьшена толщина пластин сердечника с 0,5 мм на 0,37 мм, что позволило снизить ток холостого хода трансформатора и уменьшить количество витков на высоковольтных катушках. Все это привело к значительному снижению общей массы трансформатора.

Для уменьшения шума, возникающего при перемешивании образца диэлектрика вследствие вращения механических деталей (шестерней конической зубчатой передачи, вала, деталей двигателя), было принято решение разработать электромагнитное устройство перемешивания. В новом устройстве, расположенном под ячейкой измерительной, вращающееся магнитное поле, обеспеченное схемным решением, вызывает вращение магнитного активатора, находящегося в измерительной ячейке, наполненной диэлектриком. Новое решение позволило убрать двигатель, редуктор, вал, что привело к уменьшению массы установки, повышению надежности ее работы и снижению шума.

Разработана новая схема управления установкой, собранная на одной моноплате с использованием современной элементной базы. Использование SMD

монтажа позволяет значительно минимизировать размеры и вес элементов установки. Громоздкий блок питания заменяется современным импульсным блоком питания промышленного производства, что повышает надежность и снижает энергопотребление установки.

В 2013–2014 гг. выполнена разработка и проведена модернизация УИМ-90, связанная с растущей необходимостью сохранения результатов испытаний и распечатки их на принтере. Введен модуль беспроводной связи установки с персональным компьютером, и разработано соответствующее программное обеспечение, что позволило сохранять все результаты испытаний на ПК, работать с базой данных испытаний, в том числе сортировать их по заданным оператором критериям, распечатывать результаты, выполнять их анализ.



Рисунок 7 – Внешний вид установки УИМ-90 последней модификации

Таблица 1 – Основные технические характеристики последней модификации УИМ-90

Наименование параметра	Значение
1 Диапазон испытательных напряжений (действующие значения), кВ	от 10 до 90
2 Приведенная погрешность измерения испытательного напряжения, %	$\pm 3$
3 Объем измерительной ячейки, см <sup>3</sup> , не более	400
4 Напряжение питающей сети однофазного переменного тока, В	$220^{+15}_{-10}$
5 Частота питающей сети, Гц	$50 \pm 1$
6 Потребляемая мощность, кВт·А, не более	0,5
7 Масса, кг, не более	28
8 Габаритные размеры, мм, не менее	520×315×320

В результате последних усовершенствований получена установка, внешний вид которой изображен на рис. 7. Такой установкой оснащена электротехническая лаборатория ЭТЛ – 35 для комплексной диагностики трансформаторов [5].

Установка является полностью унифицированной, что позволяет проводить модернизацию любой более ранней ее модели.

Основные технические характеристики установки УИМ-90 последней модификации представлены в табл. 1.

**Выводы.** В результате нескольких этапов модернизации установки УИМ-90 получен прибор, имеющий следующие преимущества:

- электронное управление;
  - полностью автоматический режим работы: от выдержки времени после заполнения ячейки, до обработки результатов испытания (с возможностью ручного управления);
  - возможность выбрать параметры цикла испытания в соответствии с [6] или другие, по усмотрению оператора;
  - возможность при выборе цикла испытания в соответствии с [6], осуществлять шесть последовательных пробоев (с перемешиванием диэлектрика и интервалами между пробоями, равными 5 мин.), рассчитывать среднее арифметическое значение пробивного напряжения, среднюю квадратическую ошибку и значение коэффициента вариации. Если значение коэффициента вариации превышает 20 %, установка позволяет произвести шесть пробоев дополнительной пробы испытываемого диэлектрика и обрабатывает результаты 12 пробоев;
  - наличие энергонезависимой памяти, в которой сохраняются все настройки предыдущих испытаний;
  - наличие оперативной памяти, в которой сохраняются результаты последнего испытания;
  - наличие бесшумного автоматизированного устройства перемешивания образца жидкого диэлектрика в измерительной ячейке после пробоя;
  - наличие жидкокристаллического экрана, на котором отображаются все параметры и результаты испытаний;
  - повышенная точность измерения пробивного напряжения (в соответствии с [7]);
  - наличие блокировки включения высокого напряжения при отсутствии измерительной ячейки;
  - наличие защиты высоковольтного трансформатора от перегрузок при пробое испытываемого жидкого диэлектрика и от превышения максимально допустимого значения испытательного напряжения.
- Продолжается работа по усовершенствованию установки. Ведется разработка электронного устройства подъема напряжения, что позволит снизить массу прибора и повысить его надежность.

#### Список литературы

1. ГОСТ 6581–75 – Материалы электроизоляционные жидкие. Методы электрических испытаний.
2. Установка для испытания масла УИМ-90 – ТУ У33.2–14102968–003–2002.
3. ГОСТ 2641–61 – Микродвигатели синхронные для приборов.
4. ГОСТ 21427.2–83 – Сталь электротехническая холоднокатаная изотопная тонколистовая.
5. Гуртяк О. В. Шляхи підвищення ефективності експлуатації обладнання служб електропостачання на залізниці / О. В. Гуртяк // Українська залізниця. – 2016. – № 8 (38). – С. 34–38.
6. ГОСТ Р МЭК 60156-2013 – Жидкости изоляционные. Определение напряжения пробоя на промышленной частоте.
7. Испытательная установка. Программа и методика аттестации ПМА 29–4/1922.

**Bibliography (transliterated)**

1. GOST 6581-75 – Materialyi elektroizolyatsionnyie zhidkie. Metodyi elektricheskikh ispytaniy.  
 2. Ustanovka dlya ispytaniya masla UIM-90 – TU U33.2-14102968-003-2002.  
 3. GOST 2641-61 – Mikrodvigateli sinhronnyie dlya priborov.  
 4. GOST 21427.2-83 – Stal elektrotehnicheskaya holodnokatanaya izotopnaya tonkoistovaya.

5. Gurtyak O. V. Shlyahi pidvischennya effektivnosti ekspluatatsiyi obladnannya sluzhb elektropostachannya na zaliznitsi. *Ukrainska zaliznitsya*, 2016, No 8 (38), pp. 34-38.

6. GOST R MEK 60156-2013 – Zhidkosti izolyatsionnyie. Opredelenie napryazheniya proboya na promyshlennoy chas-tote.

7. Ispytatelnaya ustanovka. Programma i metodika attes-tatsii PMA 29-4/1922.

*Поступила (received) 07.11.2016*

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Створення установки для випробувань масла УІМ – 90, етапи її модернізації / Г. М. Коліушко, А. В. Плічко, О. Г. Понуздаєва // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 37-41. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Создание установки для испытания масла УИМ – 90, этапы ее модернизации / Г. М. Колиушко, А. В. Пличко, Е. Г. Понуздаева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 37-41. – Бібліогр.: 7 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Oil testing machine OTM – 90 development, it's upgrading stages / G. M. Koliushko, A.V. Plichko, H. G. Ponuzhdayeva // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 37-41. – Bibliogr.: 7. – ISSN 2079-0740.**

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

**Коліушко Георгій Михайлович** – провідний науковий співробітник, канд. техн. наук, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Коліушко Георгій Михайлович** – ведущий научный сотрудник, канд. техн. наук, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Koliushko Georgiy Mykchailovych** – Principal Scientist, Senior Staff Scientist, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Плічко Андрій Валерійович** – молодший науковий співробітник, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Пличко Андрей Валерьевич** – младший научный сотрудник, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», тел.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Plichko Andrii Valeriyovych** – Junior Scientist, Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-66-71; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Понуздаєва Олена Геннадіївна** – зав. лабораторією, Науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут «Молнія» Національного технічного університету «ХПІ», тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Понуздаєва Елена Геннадьевна** – зав. лабораторией, Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт «Молния» Национального технического университета «ХПИ», тел.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

**Ponuzhdayeva Helena Gennad'evna** – Laboratory Manager, Research and Design Institute "Molniya" National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-61-77; e-mail: nio5\_molniya@ukr.net.

УДК 621.396.67

*А.И. КОРОБКО, З.И. КОРОБКО***ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОТРАЖЕНИЯ ОТ ОТКРЫТОЙ АПЕРТУРЫ БИКОНИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ И РЕГУЛЯРНОГО ТЕМ РУПОРА СИММЕТРИЧНОГО ТИПА В ЧАСТОТНОМ И ВРЕМЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ МЕТОДОМ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

У статті методом імітаційного моделювання в середовищі Micro-Cap отримано рішення завдання по визначенню коефіцієнта відбиття від відкритого кінця біконічної антени у частотному та часовому вигляді. При цьому використовувалась відома схема заміщення біконічної антени у вигляді довгої лінії, що має на кінці комплексний опір, який залежить від частоти. Ця відома схема була спрощена шляхом обліку частотної залежності тільки мінливої частини цього комплексного опору, що дозволило моделювати поведінку біконічної антени з відкритою апертурою як у частотному, так і в часовому вигляді. Запропоновано регулярний ТЕМ рупор симетричного типу моделювати за допомогою еквівалентної біконічної антени. Визначені характеристики елементів схеми заміщення ТЕМ рупору. Проведено визначення коефіцієнта відбиття від відкритої апертури ТЕМ рупору у частотному та часовому вигляді. Наведено співпадіння величин коефіцієнта відбиття по запропонованій методиці з відомими аналогічними даними у частотному вигляді.

**Ключові слова:** коефіцієнт відбиття, біконічна антена, ТЕМ рупор, частотний вигляд, часовий вигляд, середовище моделювання Micro-Cap.

В статье методом имитационного моделирования в среде Micro-Cap решена задача определения коэффициента отражения от открытой апертуры биконической антенны в частотном и временном представлениях. При этом использовалась известная схема замещения биконической антенны в виде длинной линии, нагруженной на конце на комплексное сопротивление, которое зависит от частоты. Данная известная схема была упрощена путем учета частотной зависимости только мнимой части этого комплексного сопротивления, что позволило моделировать поведение биконической антенны с открытой апертурой, как в частотном, так и во временном представлении. Предложено регулярный ТЕМ рупор симметричного типа моделировать с помощью эквивалентной биконической антенны. Определены характеристики элементов схемы замещения ТЕМ рупора. Проведено определение коэффициента отражения от открытой апертуры ТЕМ рупора в частотном и временном представлении. Показано совпадение величины коэффициента отражения по предложенной методике с известными аналогичными данными в частотном представлении.

**Ключевые слова:** коэффициент отражения, биконическая антенна, ТЕМ рупор, частотное представление, временное представление, среда моделирования Micro-Cap.

This scientific paper uses the method of Micro-Cap simulation modeling to solve the problem on defining the coefficient of reflection from the open aperture of biconical antenna as a function of frequency and time. For this purpose we used the known equivalent circuit of biconical antenna in the form of a long line loaded at the end with the impedance that depends on the frequency. This known circuit was simplified by taking into consideration the frequency dependence of only imaginary portion of this impedance, which allowed us to simulate the behavior of biconical antenna with the open aperture both as a function of frequency and time. It was suggested to simulate the regular TEM horn of a symmetric type using the equivalent biconical antenna. The coefficient of reflection from the open aperture of TEM horn was determined as a function of frequency and time. It has been shown that the reflection coefficient value determined using the proposed method agrees with known similar data obtained for the frequency representation.

**Keywords:** coefficient reflective, buconical antenna, TEM horn, frequency representation, time representation, simulation environment Micro-Cap.

**Введение.** ТЕМ рупор и биконическая антенна являются сверхширокополосными (СШП) антенными системами, которые используются для излучения и приема как относительно узкополосных радиосигналов, так и для излучения и приема СШП импульсных сигналов.

Первый случай характерен, например, для систем радиосвязи, радиомониторинга, радиоразведки и систем радиоэлектронной борьбы [1].

Для этого случая характерным является факт, что занимаемая полоса рабочих частот полезного сигнала существенно меньше средней частоты полосы рабочих частот. При этом главным требованием, предъявляемом к СШП антенным системам, является возможность приема и передачи этих сигналов в широком диапазоне значений средней частоты без перестройки антенной системы.

Второй случай характерен для их использования в качестве излучателей импульсного электромагнит-

ного поля в виде радио- и видеоимпульсов с широким частотным спектром, например, для целей видеолокации и генерирования мощных импульсных СШП электромагнитных полей [2,3]. Для анализа первого случая больше подходит частотное представление основных характеристик антенн, для второго случая – временное представление.

Следует отметить, что для регулярного ТЕМ рупора и для биконической антенны общим является основной тип распространяющейся электромагнитной волны (без учета отражений от их конца) – сферическая ТЕМ волна с фазовым центром в месте схождения их проводников [4]. Это определяется идентичностью физических процессов в них при излучении и приеме электромагнитных сигналов. Отличаются данные антенны по своей сути исключительно видом диаграммы направленности в Н-плоскости (круговым у симметричной биконической антенны и направленным у ТЕМ рупора).

**Основная часть.** Одной из основных характеристик СШП антенн является коэффициент отражения от открытой апертуры, так как временная форма излучаемого импульса электромагнитного поля может существенно отличаться от формы возбуждающего электрического сигнала на входе антенны за счет отражений от апертуры.

Следует отметить, что решение данной задачи непосредственно во временной области численными методами, например методом FDTD и другими методами конечных элементов, возможно для объема, который не превышает несколько длин волн, что существенно ограничивает их практическое применение. Недостатки данных методов особенно проявляются в случае необходимости учета влияния источника и линии передачи на параметры излучаемого СШП сигнала. По этой причине получили развитие схемные подходы решения данной задачи, когда СШП антенна и процессы в ней моделируются некой идеализированной синтезированной схемой замещения, которая должна в максимальной степени моделировать процессы в антенне.

Такой подход не нов, так в работе [5] были предложены схемы замещения для электрически коротких излучателей, что существенно ограничивает их ценность. Для электрически длинных излучателей Щелкуновым была предложена схема замещения на основе сравнения тонкой биконической антенны и диполя с цилиндрическими проводниками [6], что также ограничивает область ее применения. Эти недостатки устранены в схеме замещения биконической антенны, предложенной в [7], которая моделирует частотные зависимости ее входного импеданса в широкой области электрических длин и углов раскрытия: от очень тонкого биконуса до сферической антенны с узкой щелью между электродами.

Эта СШП схема замещения симметричной биконической антенны представлена на рис. 1.

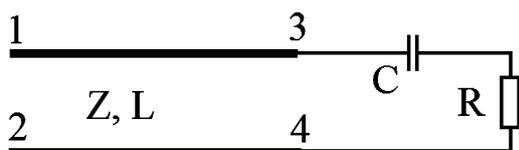


Рисунок 1 – Схема замещения симметричной биконической антенны

При этом биконическая антенна моделируется линией без потерь с волновым сопротивлением  $Z$  и длиной  $L$  (равной длине образующей одного плеча биконической линии), к которой в точках раскрытия 3 и 4 подключено комплексное сопротивление, состоящее из частотнозависимого резистора  $R$  и конденсатора  $C$ . Точки 1 и 2 – точки питания антенны. Частотная зависимость величины  $R$  определялась следующим выражением:

$$R = Z \cdot th^2(kL), \quad (1)$$

где  $k$  – волновое число, равное  $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi F}{c}$ ;  $F$  – частота;  $c$  – скорость света;  $Z$  – волновое сопротивле-

ние бесконечно длинной биконической антенны.

Величина  $Z$  равна:

$$Z = 120 \ln \left( \cotg \frac{\theta}{2} \right), \quad (2)$$

где  $\theta$  – половина угла при вершине конусного электрода.

Величина  $C$  определяется из следующего выражения для реактивного сопротивления:

$$X_c = -jZ \frac{k_1 L}{kL} \operatorname{tg} \Delta, \quad (3)$$

а величины  $\Delta$  и  $k_1 L$  определяются из соотношения:

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - k_1 L = 0,75 \sqrt{\sin 2\theta}. \quad (4)$$

С учетом соотношений (3) и (4) величина емкости  $C$  равна:

$$C = \frac{L}{Z \cdot k_1 L \cdot \operatorname{tg} \Delta}. \quad (5)$$

Выражения (1) – (5) позволяют расчетным путем определить в частотном представлении входной импеданс биконической антенны (точки 1,2) и коэффициент отражения от открытой апертуры только в случае полного согласования биконической антенны со стороны точек 1 и 2.

Подключение же к точкам 1 и 2 линии передачи с подключенным источником питания существенно усложняет решение.

Для распространения данной методики схемотехнического моделирования [5] на временную область и для учета характеристик линии питания и источника питания необходимо исключить из нее частотную зависимость величины  $R$ .

Проведем анализ последствий исключения коэффициента  $th^2(kL)$ , который отвечает за частотную дисперсию величины  $R$ . Из анализа функции  $th^2(kL)$  вытекает, что наибольшее отличие величин  $R$  и  $Z$  будет при малых значениях  $kL$ , то есть для малых частот  $F$  при заданной величине  $L$ . Очевидно, что максимальная длина волны  $\lambda$ , эффективно излучаемая электрически разомкнутой

симметричной антенной с длиной плеча  $L$ , составляет, ориентировочно, величину около  $4L$ , что соответствует  $kL = 25,12$ . Если еще в 10 раз увеличить длину волны (с запасом), то величина  $kL$  будет равна 2,512, а величина  $R = Z \cdot th^2(kL) = 0,9740 Z$ . При таком соотношении величин  $Z$  и  $R$  для бесконечного значения величины  $C$  коэффициент отражения от точек 3 и 4 составляет величину 0,013, что существенно меньше систематических погрешностей данного моделирования и требований к точности инженерных расчетов.

Следовательно, при использовании биконических антенн и ТЕМ рупоров в той частотной области, где они не являются электрически малыми антеннами, частотной зависимостью величины  $R$  можно пренебречь и считать  $R = Z$ .

Данный момент позволяет производить моделирование поведения этих антенн, как в частотном, так и во временном представлении с учетом характеристик источника питания и питающей антенну линии в средах имитационного моделирования Micro-Cap.

Для распространения этой методики на регулярный симметричный ТЕМ рупор необходимо определить две величины:  $Z$  и  $C$ , которые могут быть определены как экспериментально, так и расчетным путем.

Для экспериментального определения величины  $C$  регулярного ТЕМ рупора симметричного типа, представленного на рис. 2, необходимо измерить его электрическую емкость между электродами и вычестить из полученной величины расчетное значение емкости бесконечно длинной Т-линии, образованной его электродами на конечном участке длиной  $L$ .

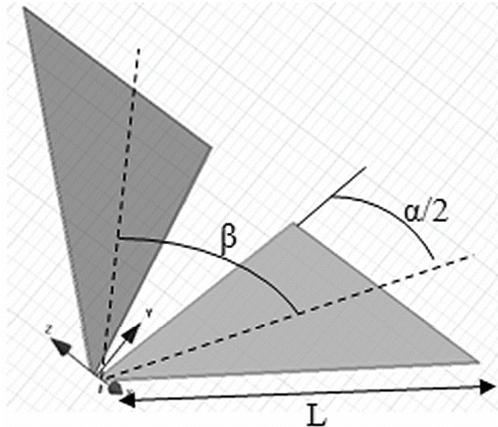


Рисунок 2 – Регулярный симметричный ТЕМ рупор

При этом величина эквивалентной емкости  $C$  для ТЕМ рупора равна:

$$C = C_1 - \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 120\pi L}{Z}, \quad (6)$$

где  $C_1$  – измеренное значение емкости симметричного регулярного ТЕМ рупора с волновым сопротивлением  $Z$  и длиной  $L$ .

Таким образом, имея значения величин  $C$ ,  $C_1$ ,  $Z$ ,  $L$  можно проводить моделирование процессов в биконической симметричной антенне и симметричном регулярном ТЕМ рупоре в частотном и временном представлении.

Для проверки корректности предложенной методики были проведены исследования в частотной области симметричного регулярного ТЕМ рупора с апертурой 100 x 100 мм, коэффициент отражения от открытой апертуры которого был исследован в частотном представлении различными методами в работе [8].

Данный рупор имел следующие характеристики:  $\alpha = 70^\circ$ ;  $\beta = 62^\circ$ ;  $Z = 150$  Ом;  $L = 100$  мм. Измеренная величина  $C_1$  равна 3,17 пФ; рассчитанная по формуле (6) величина  $C$  равна 0,95 пФ.

Приведенные данные были использованы для проведения исследований симметричного регулярного ТЕМ рупора в частотном и временном представлении в имитационной среде Micro-Cap (см. рис. 3).

В этой схеме введение дополнительной линии  $T2$ , аналогичной исследуемой линии  $T1$ , обусловлено необходимостью иметь неискаженную падающую волну напряжения в т. 5 схемы.

При этом коэффициент отражения  $K$  от открытой

апертуры (т. 3 схемы) и в частотном и во временном представлении определяется следующим известным соотношением:

$$K = \frac{U(3) - U(5)}{U(5)}. \quad (7)$$

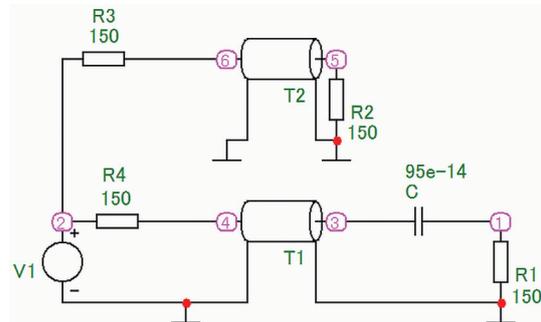


Рисунок 3 – Схема исследований в имитационной среде Micro-Cap

Результаты моделирования в частотном представлении представлены на рис. 4, а для сопоставления на рис. 5 представлены результаты расчетов по данным [8]. Графики 1 и 2 соответствуют рассматриваемому сочетанию параметров рупора ( $\alpha = 70^\circ$ ;  $\beta = 62^\circ$ ;  $Z = 150$  Ом;  $L = 100$  мм, апертура 100x100 мм), а графики 3 и 4 соответствуют величине  $L = 127$  мм. При этом графики 1 и 3 получены в асимптотическом приближении, а 2 и 4 – методом конечных элементов.

Как видно из сопоставления графика на рис. 4 и графиков 1 и 2 на рис. 5, расхождение между ними не превышает 1,2 дБ (14 %), что свидетельствует о корректности предложенной методики.

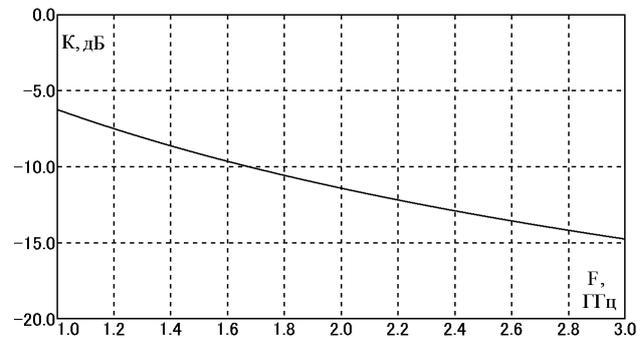


Рисунок 4 – Коэффициент отражения в частотном представлении (моделирование в среде Micro-Cap)

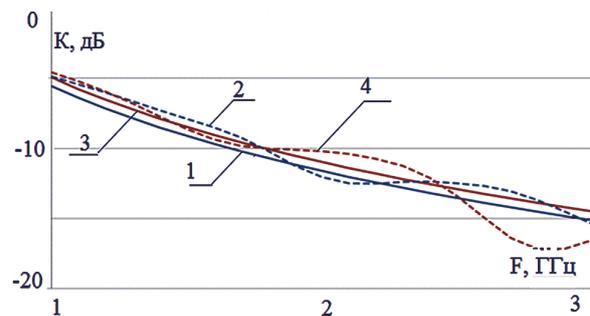


Рисунок 5 – Коэффициент отражения по данным [8] в частотном представлении для различных методов расчета

Полученные во временном представлении результаты по определению коэффициентов отражения и преломления для случая возбуждения ТЕМ рупора импульсом напряжения в виде единичного перепада  $1(t)$  представлены на рис. 6.

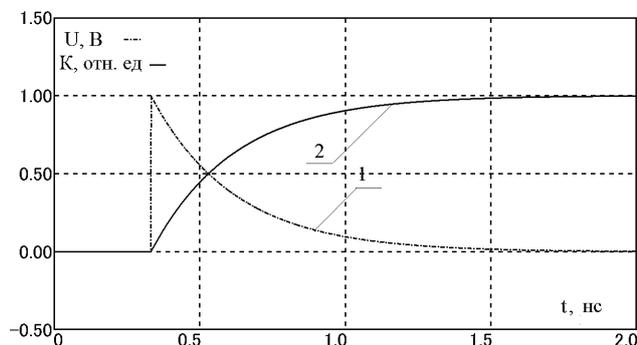


Рисунок 6 – Временная зависимость коэффициента преломления (1) и коэффициента отражения (2) при возбуждении ТЕМ рупора единичным перепадом  $1(t)$

Анализ полученных результатов во временной области свидетельствует о том, что идеальный симметричный регулярный ТЕМ рупор и симметричная биконическая антенна не имеет ограничений по минимальному значению длительности фронта СШП электромагнитного излучения (теоретически он равен нулю и определяется исключительностью корректностью  $T$  – приближения в области его фазового центра). Данным фактом подтверждена сверхширокополосность биконической антенны и ТЕМ рупора не только в частотном представлении (как показано в [7]), но и во временном представлении.

**Заключение.** Разработана и проверена методика имитационного моделирования процессов отражения от апертуры симметричных регулярных биконических антенн и ТЕМ рупоров в частотном и временном представлении.

#### Список литературы

1. Барабанов М.С. Радиоэлектронная борьба. От экспериментов прошлого до решающего фронта будущего / М.С. Барабанов, С.А. Барабанов, В.Б. Барабанов и др.; под ред. Н.А. Колесова и Н.А. Насенкова. – М.: Центр анализа стратегий и технологий, 2015. – 248 с. – ISBN 978-5-9902620-5-8. Интернет: [http://lossles.at.ua/news/radioelektronnaja\\_borba\\_ot\\_eksperimentov\\_proshlogo\\_do\\_reshajush](http://lossles.at.ua/news/radioelektronnaja_borba_ot_eksperimentov_proshlogo_do_reshajush)
2. Калугин Д.С. О визначенні часових характеристик короткоімпульсних антен методом Кірхгофа-Котлера / Д.С. Калугин, М.Г. Іванець, А.М. Безверхий // Системи озброєння і військова техніка. – 2012. – № 4. – С. 99-101. ISSN 1997-9568. Интернет: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>
3. Giri D.V. JOLT: a highly directive, very intensive, impulse-like radiator / D.V. Giri, W.L. Baker, W.D. Prather, J.M. Lehr, J.P. O'Laughlin, I.D. Smith, R. Altes, J. Fockler, D.P. McLemore, M.D. Abdalla, M.C. Skipper // Proc. IEEE. – 2004. – № 92. – P. 1096-1109.
4. Коробко А.И. Решение задачи распространения Т – волны в конической линии / А.И. Коробко, З.И. Коробко //

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Електроенергетика та перетворююча техніка». – Х.: ХПУ «ХПІ», 2003. – №1. – С. 109-112.

5. Макурин М.Н. Расчет характеристик биконической антенны методом частичных областей / М.Н. Макурин, Н.П. Макурин // Радиотехника и электроника. – 2007. – Т. 52, № 10. – С. 1199-1208. – ISSN 0033-8494 Интернет: <http://naukarus.com/raschet-harakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>

6. Щелкунов С.А. Антенны. Пер. с англ. / С.А. Щелкунов, Г. Фриис. Под ред. Бахраха Л.Д. – М.: Сов. радио, 1955. – 604 с.

7. Макурин М.Н. Эквивалентная схема, моделирующая входной импеданс биконической антенны / М.Н. Макурин, В.В. Кирьяшкин, Н.П. Чубинский // III Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН, 26-30 октября 2009г. Москва. – С. 12-16. Интернет: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/a003.pdf>

8. Калошин В.А. Исследование характеристик ТЕМ рупоров / В.А. Калошин, К.З. Калошин, Х.Ш. Нгуен // Журнал радиоэлектроники, 2015, № 10 (электронный журнал). ISSN 1684-1719. Интернет: <http://jre.cplire.ru/koi/oct15/index.html>

#### References (transliterated)

1. Barabanov M.S., Denisov S.A., Kashin V.B. i dr.; pod red. Kolesova N.A. i Nasenkova N.A. Radioelektronnaja bor'ba. Ot jeksperimentov proshlogo do reshajushhego fronta budushhego. Moscow: Centr analiza strategij i tehnologij, 2015. 248 p. ISBN 978-5-9902620-5-8 Internet: [http://lossles.at.ua/news/radioelektronnaja\\_borba\\_ot\\_eksperimentov\\_proshlogo\\_do\\_reshajush](http://lossles.at.ua/news/radioelektronnaja_borba_ot_eksperimentov_proshlogo_do_reshajush)
2. Kalugin D.S., Ivanec M. G., Bezverhij A. M. O viznachenni chasovih karakteristik korotkoimpul'snih anten metodom Kirhgofa-Kotlera. Sistemi ozbroennja i vijs'kova tehnika. 2012. No 4. pp. 99-101. ISSN 1997-9568 Internet: <http://www.hups.mil.gov.ua/periodic-app/article/2108>
3. Giri D.V., Baker W.L., Prather W.D., Lehr J.M., O'Laughlin J.P., Smith I.D., Altes R., Fockler J., McLemore D.P., Abdalla M.D., Skipper M.C. JOLT: a highly directive, very intensive, impulse-like radiator. Proc. IEEE, No 92, 2004, pp. 1096-1109.
4. Korobko A.I., Korobko Z.I. Reshenie zadachi rasprostraneniya T – volny v konicheskoy linii. Visnik Nacional'nogo tehničnogo universitetu «KhPI». Zbirknik naukovih prac'. Tematichnij vipusk «Elektroenergetika ta peretvorjujucha tehnika». Kharkiv: NTU «KhPI». 2003. No 1. pp. 109-112.
5. Makurin M.N., Chubinskij N.P. Raschet harakteristik bikonicheskoy anteny metodom chastichnyh oblastej. Radiotekhnika i jelektronika. 2007, T. 52, No 10, pp. 1199 -1208. ISSN 0033-8494. Internet: <http://naukarus.com/raschet-harakteristik-bikonicheskoy-antenny-metodom-chastichnyh-oblastey>
6. Shhelkunov S.A., Friis G. Antenny. Per. s angl. Pod red. Bahraha L.D. Moscow: Sov. radio, 1955. 604 p.
7. Makurin M.N., Kir'jashkin V.V., Chubinskij N.P. Jekvivalentnaja shema, modelirujushhaja vhodnoj impedans bikonicheskoy anteny. III Vserossijskaja konferencija «Radiolokacija i radiosvjaz'» – IRJe RAN, 26-30 oktjabrja 2009 g. Moskva, pp. 12-16. Internet: <http://jre.cplire.ru/jre/library/3conference/pdf/a003.pdf>
8. Kaloshin V.A., Nguen K.Z., Nguen H.Sh. Issledovanie harakteristik TEM ruporov. Zhurnal radioelektroniki. 2015, No 10 (jelektronnyj zhurnal). ISSN 1684-1719 Internet: <http://jre.cplire.ru/koi/oct15/index.html>

Поступила (received) 13.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Визначення коефіцієнту відбиття від відкритої апертури біконічної антени та регулярного TEM рупору симетричного типу в частотному та часовому представленні шляхом імітаційного моделювання / А. І. Коробко, З. І. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 42-46. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Определение коэффициента отражения от открытой апертуры биконической антенны и регулярного TEM рупора симметричного типа в частотном и временном представлении методом имитационного моделирования / А.И. Коробко, З.И. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 42-46. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Determination of the coefficient of reflection from the open aperture biconical antenna and regular TEM horn symmetrical type in the frequency and time representation by simulation method / A. I. Korobko, Z. I. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 42-46. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.**

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

**Коробко Анатолій Іванович** – кандидат технічних наук, завідувач відділу Науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту «Молнія», Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@ukr.net

**Коробко Анатолій Іванович** – кандидат технических наук, заведующий отделом Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния», Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@uke.net

**Korobko Anatoliy Ivanovich** – Philosophy Doctor, Head of Department of Research and Design Institute «Molnyia», National Technical University «KhPI», phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@ukr.net

**Коробко Зінаїда Іванівна** – науковий співробітник Науково-дослідного і проектно-конструкторського інституту «Молнія», Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@ukr.net

**Коробко Зинаида Ивановна** – научный сотрудник Научно-исследовательского и проектно-конструкторского института «Молния», Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@ukr.net

**Korobko Zinaida Ivanovna** – Researcher of Research and Design Institute «Molnyia», National Technical University «KhPI», phone: (057) 707-62-36; e-mail: ant\_korobko@ukr.net

УДК 537.52

**Н. И. КУСКОВА, С. В. ПЕТРИЧЕНКО, П. Л. ЦОЛИН, В. Ю. БАКЛАРЬ****ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВВОДА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ВЫХОД УГЛЕРОДНЫХ НАНОПОРОШКОВ ИЗ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ИХ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНОЙ ОБРАБОТКИ**

Представлені експериментальні залежності виходу вуглецевого нанопорошку, отриманого шляхом одночасної електророзрядної обробки органічної рідини і супутніх газів, які при цьому виділяються, а також витрати рідини від енергії одиничного розрядного імпульсу в умовах постійності сумарної введеної в міжелектродний проміжок енергії. Для запропонованого способу комбінування початкових умов здійснення розряду показано існування екстремуму залежності виходу з рідини від енергії одиничного розряду і протилежний характер аналогічної залежності виходу з газів. При цьому, насичення на кривій витрати рідини зі збільшенням енергії розряду свідчить про збільшення вмісту вуглецю в супутніх газах.

**Ключові слова:** синтез вуглецевих наноматеріалів, вихід вуглецевого нанопорошка, електророзрядна обробка вуглеводню, енергетичні режими електророзрядної обробки, витрата вуглеводневої рідини.

Представлены экспериментальные зависимости выхода углеродного нанопорошка, полученного путем одновременной электроразрядной обработки органической жидкости и сопутствующих газов, которые при этом выделяются, а также расхода жидкости от энергии единичного разрядного импульса в условиях постоянства суммарной введенной в межэлектродный промежуток энергии. Для предложенного способа комбинирования начальных условий осуществления разряда показано существование экстремума зависимости выхода из жидкости от энергии единичного разряда и противоположный характер аналогичной зависимости выхода из газов. При этом, насыщение на кривой расхода жидкости с увеличением энергии разряда свидетельствует об увеличении содержания углерода в сопутствующих газах.

**Ключевые слова:** синтез углеродных наноматериалов, выход углеродного нанопорошка, электроразрядная обработка углеводорода, энергетические режимы электроразрядной обработки, расход углеводородной жидкости.

Experimental dependencies of carbon nanopowder yield obtained by simultaneous electrical discharge treatment of the organic liquid and following gases created during the process, and liquid's consumption rate on single discharge pulse's energy in conditions of constancy of total energy inputted into the interelectrode gap were presented. The existence of extremum for dependence of liquid's yield on single discharge's energy as well as opposite nature of analogous dependence of gazes' yield were shown for the proposed method of combination of initial conditions for discharge realization. Thus, saturation on the liquid's consumption rate curve which

occurs with discharge's energy increase shows the rise in the carbon content in following gazes.

**Keywords:** Synthesis of carbon nanomaterials, the yield of carbon nanopowder, electrodischarge treatment of hydrocarbon, power modes of electrodischarge treatment, consumption of hydrocarbon liquid.

**Введение.** Основным способом развития любой промышленности является использование материалов, обладающих улучшенными и новыми свойствами. В этом отношении наиболее перспективны углеродные наноматериалы (УНМ).

Термическая и химическая стабильность, высокая прочность, микротвердость и развитая удельная поверхность, уникальные электромагнитные и триботехнические свойства углеродных наноматериалов, а также качественно новые совокупные свойства материалов и покрытий, получаемых на их основе, указывают на перспективность применения УНМ как в виде порошков или покрытий, так и в виде модификаторов для широкого спектра задач из технической, научной, медицинской и многих других областей деятельности [1-4].

Отсутствие широкомасштабного производства УНМ в Украине объясняется высокой стоимостью существующего технологического оборудования, включая лицензирование прав интеллектуальной собственности. Это ограничивает применение УНМ в промышленности и сдерживает экономический эффект от его использования. Поэтому проблема разработки новых, высокопроизводительных и энергоэффективных, а также развитие существующих методов синтеза УНМ является актуальной. С ее решением связана возможность создания технологии и оборудования, позволяющего осуществлять производство УНМ в промышленных масштабах.

К методам синтеза УНМ можно предъявить следующие основные требования:

- по качественному составу порошковых смесей УНМ и потенциальной производительности оборудования;
- по удельным энергозатратам и расходу сырья;
- по возможности регулирования фазового и/или компонентного состава порошковых смесей УНМ;
- по степени сложности практической реализации в технологическом оборудовании;
- по экологическим показателям.

Таким требованиям в той или иной степени удовлетворяет метод электроразрядной обработки (ЭРО), основанный на синтезе углеродных наноструктур из углеродсодержащей плазмы, образующейся в результате разложения органических соединений. При электроразрядном воздействии на органические среды структурное и фазовое состояние УНМ во многом будут определяться динамикой плазмохимических и термодинамических процессов, протекающих в ходе их синтеза. Это предопределяет возможность регулирования состава порошкового продукта путем изменения режимов (в том числе динамических) ввода электрической энергии в канал разряда. Ранее установлено, что электроразрядная обработка органических жидкостей, как метод, позволяет получать УНМ различного вида и состава [5] в достаточных количествах.

Метод ЭРО прост в реализации [6], однако его развитие требует определения режимов ввода электрической энергии, обеспечивающих максимальную

степень переработки углеводородного сырья при минимальных энергозатратах.

**Целью данной работы** является изучение зависимости выхода УНМ из органической жидкости и сопутствующих газов в процессе их одновременной ЭРО от энергии единичного разрядного импульса (в жидкости) при фиксированных энергозатратах.

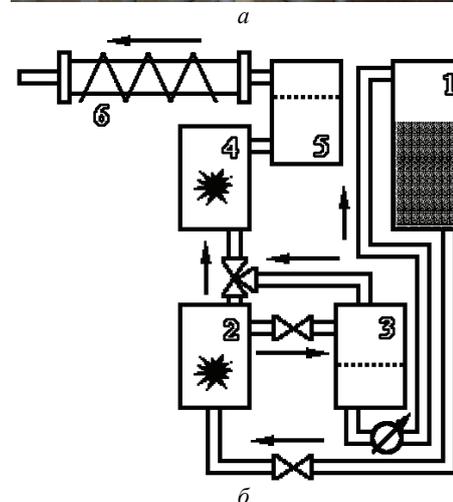


Рисунок 1 – Экспериментальная установка непрерывной трехстадийной переработки углеводородов:  
 а – внешний вид экспериментальной установки;  
 б – принципиальная схема переработки углеводородов

**Методика эксперимента.** Эксперименты проводили в режиме непрерывной электроразрядной обработки. Органическая жидкость поступала из емкости (рис. 1, б, поз. 1) в разрядную камеру (рис. 1, б, поз. 2), где осуществлялся электрический разряд с фиксированной частотой следования импульсов. Образовавшаяся в камере газовая смесь (сопутствующий газ) отводилась в следующую камеру (рис. 1, б, поз. 4), где, в свою очередь с той же частотой осуществлялся электрический разряд в газе. На фильтрах (рис. 1, б, поз. 3 и 5) отбирался образовавшийся в обеих камерах

углеродный нанопорошок. Далее, обедненная газовая смесь поступала в реактор для пиролиза (рис. 1, б, поз. 6) [7].

Обработку смеси газов проводили для всех режимов постоянно при неизменных условиях (в том числе – энергии единичного разрядного импульса).

Далее по тексту все вариации энергии единичного разрядного импульса относятся к обработке жидкости.

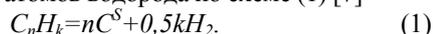
Энергию единичного разряда  $W_0$ , накопленную в конденсаторе, варьировали в диапазоне от 10 до 110 Дж, что обеспечивалось изменением зарядного напряжения и емкости конденсаторной батареи в диапазоне от 15 до 35 кВ и от 0,05 до 0,25 мкФ, соответственно. Выбор диапазона значений энергии определяли условиями по производительности синтеза, необходимостью уменьшения загрязнения получаемого порошка, (побочными) нежелательными продуктами эрозии электродов и наличием доступного запаса прочности используемых разрядных камер во время единичного разряда.

Таким образом, для одинаковых значений суммарной энергии, введенной в межэлектродный промежуток, каждый из исследованных режимов отличается собственным дозированием энергии. Суммарную введенную энергию ЭРО сырья для всех экспериментов установили на уровне 1,35 МДж. Данное значение является достаточным для получения необходимого количества порошка, позволяющего достоверно определять весовые характеристики, химический состав и анализировать вид синтезированных наноструктур [6].

Для поддержания постоянного характера разряда при изменении параметров энергоузла (в первую очередь, зарядного напряжения), изменяли ширину зазора – кольцевого межэлектродного промежутка между дисковым анодом и стенкой цилиндрической разрядной камеры. Для каждого из исследованных режимов ширину зазора определяли максимальным значением, при котором наблюдается стабильное формирование разряда при заданных параметрах энергоузла в данной жидкости. На практике таким условиям отвечает диапазон от 2 до 6 мм.

В качестве сырья использовали насыщенный углеводород – циклогексан – наиболее перспективную органическую жидкость, с точки зрения практического выхода УНМ после ЭРО (результаты сравнения выхода для различных органических жидкостей представлены в работе [8]).

**Обсуждение результатов.** При действии электро-разрядных импульсов на углеводороды или в процессе пиролиза углеводородов происходят деструкция молекул и отщепление атомов водорода по схеме (1) [7]



При этом углерод может выделяться в твердой фазе  $S$  в разных аллотропных формах.

Для теоретического расчета максимальной массы нанотуглерода  $m_{теор}$ , которая может быть получена в результате плазмохимических реакций по схеме (1) вследствие электроразрядной обработки жидкого сырья массой  $m_c$ , рассчитывали молярные массы сырья  $M_c = 12n + k$  и продукта  $M_{np} = 12n$ . Тогда

$$m_{теор} = m_c M_{np} / M_c = m_c \cdot 12n / (12n + k). \quad (2)$$

Практический выход нанотуглерода  $\gamma = \gamma^1 + \gamma^2$  рассчитывали, определяя экспериментально массу  $m_{np}^1$  и выход  $\gamma^1$  нанотуглерода, полученного в результате полной электроразрядной обработки органической жидкости, а также массу  $m_{np}^2$  и выход  $\gamma^2$  нанотуглерода, получаемого электроразрядной обработкой и пиролизом смеси газов. Если углерод выделен со всей массы сырья без остатка, то практический выход определяется выражением

$$\gamma^{1,2} = m_{np}^{1,2} / m_{теор} = (1 + k/12n) (m_{np}^{1,2} / m_c), \quad (3)$$

которое и использовано в данной работе для расчета.

Показано, что варьирование энергии в импульсе в указанном диапазоне приводит к изменению пропорций между выходом твердой фракции (порошковой смеси, содержащей алмазоподобные и графитоподобные наноматериалы, луковичные структуры углерода, например, рис. 2) в разрядной камере (рис. 1, б, поз. 2) и количеством вещества, которое вследствие плазмохимических реакций переходит в парогазовую фазу. Анализ зависимости выхода твердой фракции от энергии в импульсе при электроразрядной обработке циклогексана показал, что она имеет экстремальный характер (рис. 3, кривая 1).

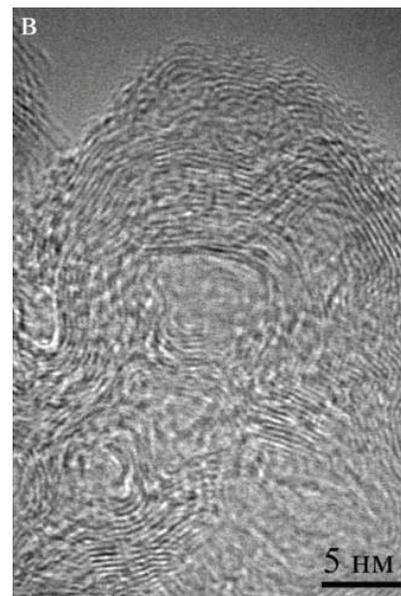


Рисунок 2 – Луковичные структуры нанотуглерода, которые образуются при электроразрядной обработке циклогексана

С увеличением энергии в импульсе до определенных величин практический выход нанотуглерода увеличивается. Дальнейшее увеличение запасенной энергии для единичного импульса приводит к уменьшению величины  $\gamma_{о.е.}^1$ .

Зависимость выхода продуктов переработки смесей углеводородных газов, которая осуществляется в камере (рис. 1, б, поз. 4) и реакторе для пиролиза (рис. 1, б, поз. 6) при постоянных условиях электроразрядного и пиролитического воздействия, начиная с 25 Дж энергии единичного разряда (в жидкости), имеет противоположный (по отношению к зависимости выхода углеводородных материалов из жидкости) характер (рис. 3 кривая 2). Очевидно, это объясняется соответ-

ствующим изменением удельного объема газообразования (по отношению к суммарной энергии обработки жидкости) и состава газовой смеси.

За пределами этого диапазона, в сторону уменьшения энергии единичного разряда в жидкости (от 25 Дж и менее), выход УНМ из газовой смеси снижается.

Продукты переработки смеси образующихся газов преимущественно состоят из одного вида УНМ: углеродные нанотрубки, нановолокна или углеродные пленки (рис. 4).

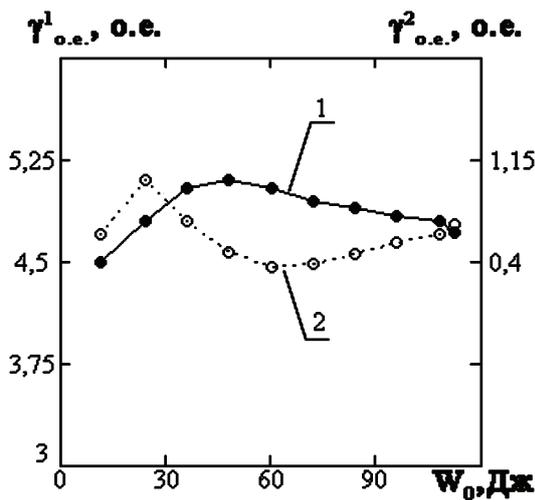


Рисунок 3 – Зависимость практического выхода углеродных наноструктур (в относительных единицах) от энергии в импульсе: 1 – ЭРО циклогексана; 2 – обработка отведенных газов (при постоянных условиях)

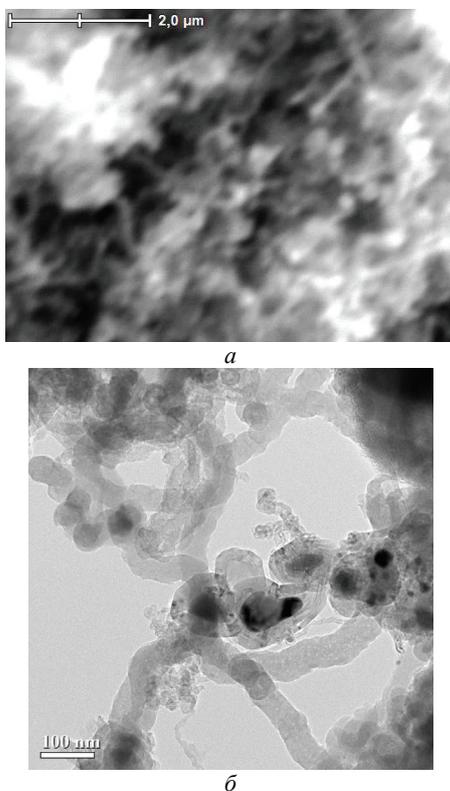


Рисунок 4 – Микрофотографии углеродных наноструктур, полученных при обработке газов: а – низкое разрешающая способность; б – высокая разрешающая способность

Общий вид масштабных фрагментов исследуемых образцов порошковых продуктов показан на рис. 5.

Важным является вопрос относительно зависимости фактических затрат сырья (циклогексан) от режимов энерговода в электроразрядном реакторе для обработки жидкости.

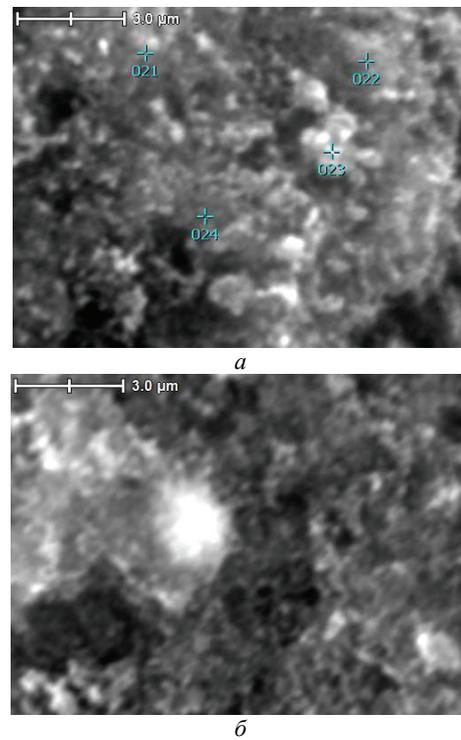


Рисунок 5 – Микрофотографии больших фрагментов электроразрядных образцов при различных энергиях в импульсе: а –  $W_0 \approx 30$  Дж; б –  $W_0 \approx 110$  Дж

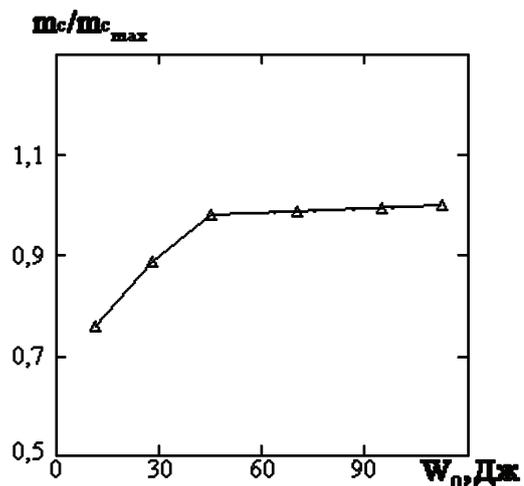


Рисунок 6 – Зависимость относительного расхода сырья от уровня дозирования энергии:  $m_c$  – масса затраченного углеводородного сырья,  $m_{c_{\text{max}}}$  – нормировочный коэффициент, соответствующий максимальным затратам углеводородного сырья

На рис 6 показана кривая зависимости расхода жидкого сырья в исследованном диапазоне энергий единичного разряда  $W_0$  от 10 до 110 Дж, при постоянном значении суммарной энергии (1,35 МДж), вве-

денной в межэлектродный промежуток. Увеличение выхода УНМ из жидкости (рис.3, кривая 1) с ростом  $W_0$  от 10 до 60 Дж сопровождается увеличением расхода жидкости (рис. 6).

При  $W_0 > 60$  Дж  $\gamma'$  уменьшается, а  $\gamma^2$  увеличивается и одновременно наблюдается насыщение кривой расхода жидкости. Такая закономерность может свидетельствовать о том, что в газовых смесях увеличивается содержание углерода (в различных соединениях).

Варьирование ширины кольцевого зазора (межэлектродного промежутка в жидкости) от 2 до 6 мм ;  $U_0=35$  кВ для двух значений емкости ( $C = 0,1$  мкФ и  $C = 0,25$  мкФ) приводит к изменению веса и выхода получаемого порошка (табл.1).

Показано, что в выбранном диапазоне присутствуют оптимальные значения ширины зазора, при которых вес порошка является максимальным. Эти же значения являются максимальной шириной зазора, при которой стабильно формируется разряд в данной жидкости (стабилизация частоты следования разрядных импульсов) при данном наборе параметров энергоузла.

Таблица 1 – Зависимость веса ЭРО порошка от ширины зазора

Энергия в импульсе, Дж	Число импульсов	Ширина зазора, мм	Вес порошка, г
61,25	5000	2	1,35
		4	5,45
		6	1,57
153,13*	2000	2	3,1
		4	4,63
		6	1,93

\*Для определения влияния ширины зазора проводили отдельную серию экспериментов в более широком диапазоне энергий единичного разряда.

Таким образом, установлены условия повышения эффективности переработки сырья и возможность регулирования фазового состава продуктов электро-разрядного синтеза УНМ. Эффективность может определяться необходимостью получения того или иного вида УНМ, расходом сырья и электроэнергии. Ее увеличение относительно указанных потребностей можно осуществлять для данной жидкости путем выбора параметров энергоузла (например, по результатам для циклогексана на рис. 2) при условии поддержания необходимой ширины разрядного промежутка, а также баланса между объемной скоростью потока жидкости и частотой следования разрядных импульсов.

Для практического применения представленных выше результатов синтеза УНМ необходимо воспользоваться следующей схемой. Для данного разрядного промежутка находят минимальное значение зарядного напряжения для формирования стабильного разряда, а изменение энергии в импульсе обеспечивают изменением емкости конденсатора. Очевидно, что на механизмы синтеза УНМ существенно влияет динамика энерговода при единичном разряде и другие начальные условия (включая геометрию электродов).

Следует заметить, что все вышеизложенное справедливо для «коротких» разрядов, плазменный

канал которых, как правило, представляют моделью эллипса или короткого цилиндра.

**Выводы.** Показано, что в условиях постоянства суммарной энергии при одновременной электроразрядной обработки жидких углеводородов и сопутствующих газов, образующихся при этом, практический выход УНМ в зависимости от энергии единичного разрядного импульса в жидкости имеет экстремум. Увеличение энергии единичного разрядного импульса в жидкости ( $W_0$ ) в условиях обеспечения минимально необходимого для стабильного разряда уровня зарядного напряжения при заданном межэлектродном промежутке, путем изменения емкости конденсатора, приводит:

– для значений энергии  $25 < W_0 < 60$  Дж - к увеличению относительного расхода углеводородной жидкости и практического выхода УНМ из жидкости, с одновременным снижением выхода УНМ из сопутствующих газов;

– для значений энергии  $W_0 > 60$  Дж – к насыщению кривой зависимости расхода жидкости, снижению практического выхода УНМ из жидкости с одновременным ростом выхода УНМ из сопутствующих газов.

Учитывая то, что порошки УНМ, полученные из углеводородной жидкости и сопутствующего газа, имеют различный компонентный состав, а также то, что зависимость суммарного выхода от  $W_0$  носит экстремальный характер, представленные результаты могут быть использованы:

– для изменения состава порошков УНМ;  
– для повышения энергоэффективности получения УНМ и снижения сырьевых затрат.

#### Список литературы

1. Мищенко С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М.: Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Крестинин А. В. Проблемы и перспективы развития индустрии углеродных нанотрубок в России / А. В. Крестинин. // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 5-6. – С. 18-23.
3. Фурсиков П. В. Каталитический синтез и свойства углеродных нановолокон и нанотрубок. / П. В. Фурсиков, Б. П. Тарасов // International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. – 2004. – № 10. – С. 24-40.
4. Золотухин А. А. Образование наноуглеродных пленочных материалов в газоразрядной плазме. / А. А. Золотухин, А. Р. Образцов, А. О. Устинов, А. П. Волков // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2003. – Т. 124, № 6. – С. 1291-1297.
5. Кускова Н. И. Зависимость выхода углеродных наноматериалов от строения молекул органических жидкостей в процессе электроразрядной обработки / Н. И. Кускова, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, В. Ю. Бакларь // ЭОМ. – 2013. – № 49 (1). – С. 14-19.
6. Кускова Н. И. Электроразрядная технология и оборудование для получения новых углеродных наноматериалов / Н. И. Кускова, К. В. Дубовенко, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, С. О. Чабан // ЭОМ. – 2013. – № 49 (3). – С. 35-42.
7. Цолин П. Л. Пат. 83143, Украина. Установка для синтеза углеродных наноматериалов / П. Л. Цолин, Н. И. Кускова, С. В. Петриченко, А. Ю. Терехов, А. А. Зубенко. – 2013. 8

8. Кускова Н. И. Синтез углеродных наноматериалов из газов, образующихся в процессе электроразрядной обработки органических жидкостей / Н. И. Кускова, В. Ю. Бакларь, А. Ю. Терехов, А. Н. Юцишина, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, А. П. Малюшевская // ЭОМ. – 2014. – № 50. – С. 1-5.

#### References (transliterated)

1. Mishhenko S. V., Tkachev A. G. Uglерodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye [Carbon nanomaterials. Production, Properties, Applications]. Moscow, Mashinostroeniye publ., 2008. 320 p.

2. Krestinin A. V. Problemy i perspektivy razvitiya industrii uglерodnykh nanotrubok v Rossii [Problems and prospects of development of the industry of carbon nanotubes in Russia]. Rossijskie nanotekhnologii. 2007, vol. 2, no. 5-6, pp. 18-23.

3. Fursikov P. V., Tarasov B. P. Kataliticheskij sintez i svoystva uglerodnykh nanovolokon i nanotrubok. [Catalytic synthesis and properties of carbon nanotubes and nanofibers]. International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology. 2004, no. 10, pp. 24-40.

4. Zolotuhin A. A., Obrazcov A. R., Ustinov A. O., Volkov A. P. Obrazovanie nanouglерodnykh pljonochnykh materialov v gazorazrjadnoj plazme [The formation of nanocarbon film materials in gas-discharge plasma]. Zhurnal jeksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki. 2003, vol. 124, no. 6, pp. 1291-1297.

5. Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Baklar' V. Yu. Zavisimost' vykhoda uglерodnykh nanomaterialov ot stroeniya molekul organicheskikh zhidkostey v protsesse elektrozrazryadnoy obrabotki [The dependence of carbon nanomaterials yield on the molecular structure of organic liquids in the process of discharge treatment]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, no. 49 (1), pp. 14-19.

6. Kuskova N. I., Dubovenko K. V., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Chaban S. O. Elektrozrazryadnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya polucheniya novykh uglерodnykh nanomaterialov [Electric discharge technology and equipment for the obtaining of novel carbon nanomaterials]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, no. 49 (3), pp. 35-42.

7. Tsolin P. L., Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Terehov A. Ju., Zubenko A. A. Ustanovka dlja sinteza uglерodnykh nanomaterialov [An equipment for the synthesis of carbon nanomaterials]. Patent UA, no. 83143 2013.

8. Kuskova N. I., Baklar' V. Ju., Terehov A. Ju., Jushhishina A. N., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Maljushevskaja A. P. Sintez uglерodnykh nanomaterialov iz gazov, obrazujushhihsja v protsesse jelektrozrazrjadnoj obrabotki organicheskikh zhidkostey [The synthesis of carbon nanomaterials from the gases generated during the electric discharge treatment of organic liquids]. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2014, no 50, pp. 1-5.

Поступила (received) 30.09.2016

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

Вплив режимів введення електричної енергії на вихід вуглецевих нанопорошків з органічних сполук в процесі їх електророзрядної обробки / Н. І. Кускова, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, В. Ю. Бакларь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 46-51. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Влияние режимов ввода электрической энергии на выход углеродных нанопорошков из органических соединений в процессе их электроразрядной обработки / Н. И. Кускова, С. В. Петриченко, П. Л. Цолин, В. Ю. Бакларь // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 46-51. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Influence of electric energy input modes on the yield of carbon nanopowders from organic compounds in the process of electrical discharge treatment / N. I. Kuskova, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, V. Yu. Baklar // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 46-51. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

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

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

**Кускова Наталія Іванівна** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий НАН 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.

**Петриченко Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, заступник директора Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrighsergey@gmail.com

**Петриченко Сергей Викторович** – кандидат технических наук, заместитель директора Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrighsergey@gmail.com

**Petrichenko Sergey Victorovich** – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrighsergey@gmail.com

**Цолин Павло Леонідович** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

**Цолин Павел Леонидович** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

**Tsolin Pavel Leonidovich** – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.

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

**Бакларь Виктор Юрьевич** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН 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.

УДК 537.528:621.763

**Н. И. КУСКОВА, А. Д. РУДЬ, С. В. ПЕТРИЧЕНКО, Д. И. ЧЕЛПАНОВ, П. Л. ЦОЛИН****ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ**

Показана перспективність методу електророзрядної обробки рідких і газоподібних вуглеводнів для синтезу радіопоглинаючих вуглецевих наноматеріалів. Досліджені електрофізичні властивості синтезованих вуглецевих наноматеріалів, що відрізняються структурним станом. Показано, що ВНТ і нановуглець цибулинної структури, які характеризуються великими величинами питомої електропровідності і містять ферромагнітні наночастинки, є ефективними поглиначами електромагнітного випромінювання в частотному діапазоні від 25 до 38 ГГц.

**Ключові слова:** електророзрядна обробка, вуглецеві наноматеріали, вуглецеві нанотрубки, цибулинні структури вуглецю, електрофізичні властивості.

Показана перспективность метода электроразрядной обработки жидких и газообразных углеводородов для синтеза радиопоглощающих углеродных наноматериалов. Исследованы электрофизические свойства синтезированных углеродных наноматериалов, отличающихся структурным состоянием. Показано, что УНТ и нанотрубка луковичной структуры, характеризующиеся большими величинами удельной электропроводности и содержащие ферромагнитные наночастицы, являются эффективными поглотителями электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц.

**Ключевые слова:** электроразрядная обработка, углеродные наноматериалы, углеродные нанотрубки, луковичные структуры углерода, электрофизические свойства.

The prospect of the method of electrical discharge treatment of liquid and gaseous hydrocarbons (hexane, cyclohexane, ethanol, kerosene and following gases) for the synthesis of radioabsorbing carbon nanomaterials was shown. Selected electrical and physical properties (specific electrical conductivity, electromagnetic radiation reduction and refraction) of various synthesized carbon nanomaterials distinguished by their structural state (amorphous carbon, carbon films, onion-like carbon, carbon nanotubes) were studied. It was shown that the carbon nanotubes and onion-like nanocarbon characterized by very high values of specific conductivity and comprising ferromagnetic nanoparticles, are efficient absorbers of electromagnetic radiation in the frequency range from 25 to 38 GHz.

**Keywords:** electrical discharge treatment, carbon nanomaterials, carbon nanotubes, onion-like carbon structures, electrical and physical properties.

**Введение.** Углеродные наноматериалы (УНМ) могут обладать рядом ценных качеств (высокая электро- и теплопроводность, прочность, устойчивость к механическим и температурным воздействиям). Специфические и уникальные свойства УНМ и углеродных нанотрубок (УНТ) – в виде порошков, пленок и композитов, – делают их перспективными для применения в качестве материалов для силовой электроники, катодов с холодной эмиссией электронов, эффективных электродов для электрических батарей и емкостей, радиочастотных фильтров, экологических сенсоров и т.д. Особый интерес представляют пленки и композиты из УНТ, которые можно использовать для создания высокоэффективных и недорогих систем защиты мобильных телефонов, микроволновых печей и компьютеров от электромагнитных излучений. Для защиты электронного коммерческого и оборонного оборудования требуются материалы с эффективностью экранирования (за счет отражения, поглощения, интерференционного гашения) более 30 дБ [1,2].

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Электроразрядная обработка (ЭРО) углеводородов, благодаря возможности создания экстремальных условий (высоких температур и давлений), приводит к деструкции и разложению молекул сырья с последующим образованием различных видов УНМ и смеси газов (водорода и низших углеводородов). Одновременная обработка как жидких, так и образующихся газообразных углеводородов в разных разрядных камерах при определенных режимах энергет-

вода, использование катализаторов, углеводородов, отличающихся степенью гибридизации атомов углерода в молекулах и строением молекул, позволяет получать различные виды УНМ в одном технологическом процессе [3-7]. Для определения эффективности применения синтезированных УНМ в различных технологиях необходимо исследовать их электрофизические свойства. Наиболее актуальными на сегодняшний день являются экспериментальные исследования электромагнитных свойств УНМ и нанокompозитов.

**Цель работы** – анализ электрофизических свойств различных УНМ (аморфного углерода, углеродных пленок, луковичных структур углерода (ЛСУ) и УНТ), синтезированных методом ЭРО углеводородов.

**Методика исследований.** Различные УНМ получали в непрерывном процессе ЭРО органических жидкостей и образующихся газов, реализованном в созданной на базе ВТМ 40-12 установке [7]. ЭРО жидкостей проводили в камере с коаксиальной системой электродов, образующиеся при этом газы обрабатывали электрическими разрядами в другой разрядной камере.

Органические жидкости отличались степенью гибридизации электронов в атомах углерода и строением молекул:

- гексан ( $C_6H_{14}$ ) – класс алканов, характеризующихся  $sp^3$ -гибридизацией атомов;
- циклогексан ( $C_6H_{12}$ ) – класс циклоалканов, ха-

рактирующихся  $sp^3$ -гибридизацией атомов в замкнутой в кольцо молекуле; также использовался циклогексан с растворенным в нем ферроценом;

– этанол ( $C_2H_5OH$ ) – одноатомный спирт, характеризующиеся  $sp^3$ -гибридизацией атомов;

– керосин ТС-1 – смесь углеводородов смешанного состава (массовая доля ароматических углеводородов 0,22; химическая брутто-формула  $C_{7.2107}H_{3.2936}$ ).

Рентгеновские исследования выполнены в Институте металлофизики НАН Украины на стандартном дифрактометре в  $Cu\ K\alpha$  и  $Mo\ K\alpha$  излучениях. Электронная микроскопия проводилась на микроскопе высокого разрешения JEOL JEM-2100F.

Измеряли электрические сопротивления порошковых УНМ в процессе сжатия. Это позволяло найти значение плотности материала, при котором дальнейшее сжатие образца не вызывает роста удельной электрической проводимости [8].

Измерения электрофизических параметров наноматериалов в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне длин волн проводили на основе разработанных физических методов. Для измерений использовали образцы различных электроразрядных УНМ в виде таблеток, полученных прессованием [9,10].

**Результаты эксперимента.** Действие электрического поля на органические жидкости порождает химические реакции сначала в жидкой, а потом в газоплазменной фазе, которые существенно отличаются. ЭРО углеводородов приводит к каскаду химических превращений, которые включают в себя процессы деструкции (разрыва углеродных связей), дегидрогенизации (разрыва связей  $C-H$ ) и полимеризации (образования новых углеродных связей) [8].

**ЭРО жидких алканов и циклоалканов.** Известно, что алканы при температуре более 450 оС распадаются на углеводороды с меньшим числом углеродных атомов. Разрыв связи  $C-C$  возможен в любом случайном месте молекулы, поэтому образуется смесь алканов и алкенов с меньшей, чем у исходного алкана, молекулярной массой. Процесс ЭРО начинается с диссоциации молекул жидкости, вследствие которой в центральных частях линейных молекул чаще всего происходят разрывы сильных  $C-C$  связей, что приводит к образованию углеродных кластеров  $C_k$ , водорода и низших углеводородов – газов



где  $k + m + p = n$ .

В процессе ЭРО циклоалканов, молекулы которых замкнуты в кольцо, часть колец не разрывается, а синтез УНМ происходит вследствие дегидратации – отрыва водорода. Энергия  $\sigma$ -связи  $C-C$  в циклоалканах в несколько раз выше энергии связи  $C=C$  и выше энергии связи  $C-H$ , поэтому более вероятным процессом является процесс дегидратации, а разрыв связей  $C-C$  приводит к образованию газообразных алканов.

Типичные микрофотографии УНМ, полученных в результате ЭРО жидких циклоалканов и имеющих  $sp^3$ -гибридизацию атомов углерода в молекуле, приведены на рис. 1. Частицы порошков собраны в агломе-

раты и имеют сложное иерархическое строение. Индивидуальные частицы имеют сфероидальную форму, размер частиц от 10 до 20 нм и характеризуются луковичной (onion-like) структурой углерода (рис. 1).

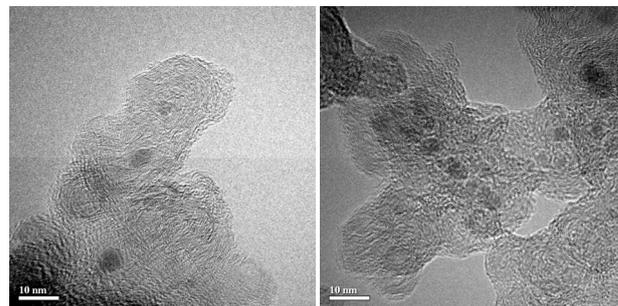


Рисунок 1 – Электронно-микроскопические изображения ЛСУ, полученных ЭРО циклогексана

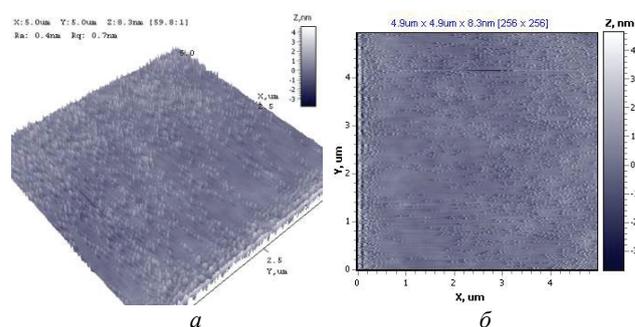


Рисунок 2 – 3D-изображение слоя углеродных частиц (а) и топография поверхности слоя на кварцевом стекле (б)

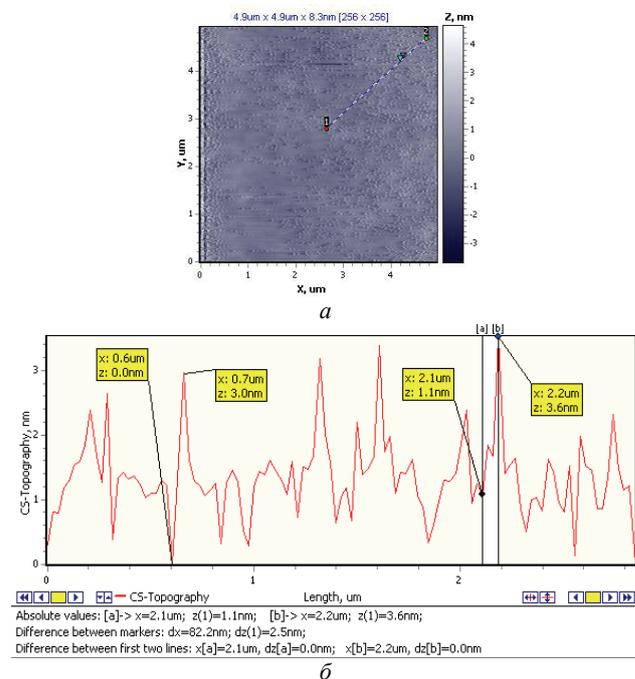


Рисунок 3 – Линия сечения (а) и профиль сечения (б)

Методом атомной силовой микроскопии (АСМ) определены диаметры сферических углеродных частиц, полученных в процессе разрядноимпульсной обработки циклогексана, которые составляют от 27,0 до 70,0 нм. Такие размеры углеродных наночастиц обусловлены их высокими сорбирующими

свойствами, которые приводят к увеличению размера вследствие налипания молекул обрабатываемой жидкости. Для определения истинных размеров частиц порошок УНМ был очищен с помощью многократной промывки растворителями (ацетоном или этилацетатом). Получено 3D-изображение слоя углеродных частиц после очистки и сушки порошка (рис. 2).

На основании следа сечения 1-2 (рис. 3, а) из профиля сечения (рис. 3, б) определены размеры частиц. Диаметр частиц составляет от 2,5 до 3,0 нм. В некоторых сечениях есть частицы до 1 нм.

Таким образом, истинный размер углеродных наночастиц, полученных ЭРО циклогексана, составляет от 1 до 3 нм.

**ЭРО образующихся газов.** Синтез УНМ в результате ЭРО газов, образующихся из гексана, происходит преимущественно на кварцевой поверхности в виде пленок (рис. 4). Внешняя поверхность пленки содержит кремний (от 10 до 20 %), а внутренняя – только углерод.

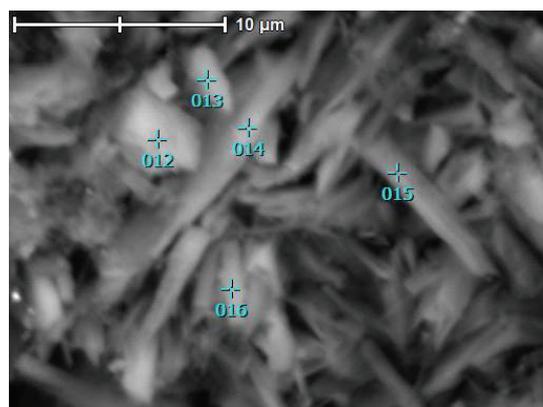
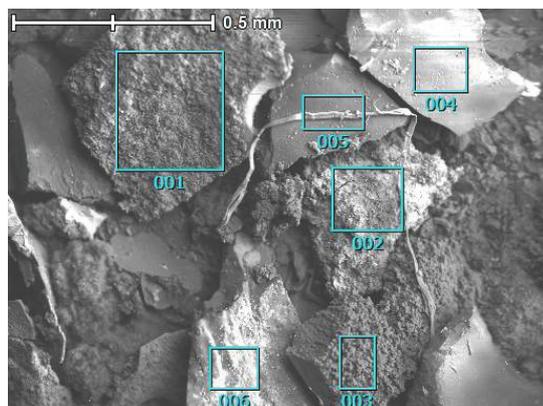


Рисунок 4 – Микрофотографии пленок, полученных на кварцевой подложке в результате ЭРО газов, образующихся из гексана

ЭРО газов, образующихся из циклоалкана, и осаждение синтезируемых УНМ происходит как на никель-хромовой – в виде УНТ, так и на кварцевой подложках – в виде пленок толщиной до 0,1 мм (рис. 5). Химический состав пленки: участок 017: С – 94,4 %; Si – 1,4 %; Cr – 1,9 %; Ni – 2,3%; участок 018: С – 94,3 %; Si – 1 %; Cr – 1,4 %; Fe – 1,5 %; Ni – 1,8 %.

Синтезированные на катализаторе УНТ (рис. 6)

полностью покрывают поверхность подложки. Размер получаемых трубок зависит от дисперсности катализатора.

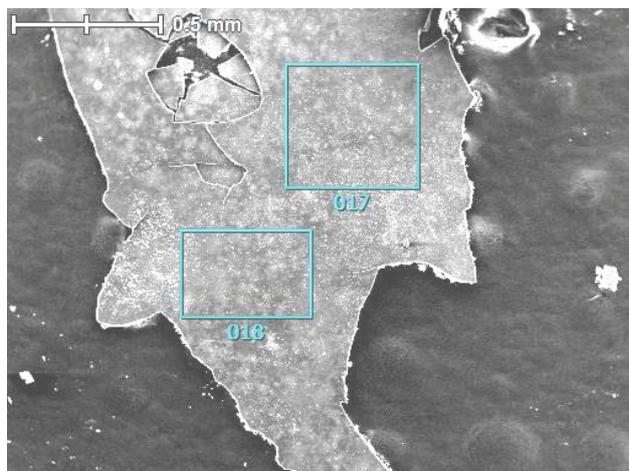


Рисунок 5 – Микрофотографии пленок, полученных на кварцевой подложке в результате ЭРО газов, образующихся из циклогексана

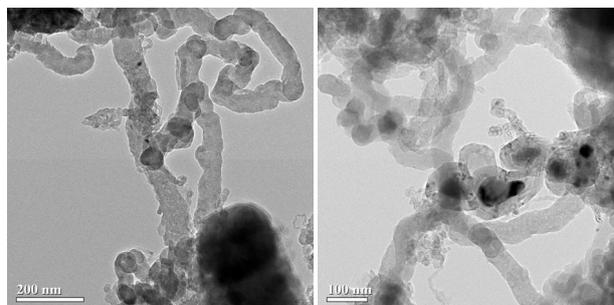


Рисунок 6 – Электронно-микроскопические фотографии УНТ, синтезированных на никелевых подложках из газов, образующихся при ЭРО циклогексана

**ЭРО одноатомных спиртов** приводит к синтезу алкенов ( $C_nH_{2n}$ ), к которым относятся этилен и др. Так, дегидратация этанола приводит к синтезу этилена  $CH_3-CH_2-OH \rightarrow CH_2=CH_2 + H_2O$ .

Газоподобные алкены сначала выделяют в жидкости, а затем поступают для дальнейшей ЭРО в газовую разрядную камеру. Энергия связи С-Н в молекулах алкенов ( $\epsilon_1 = 433$  кДж/моль) меньше, чем энергия двойной связи  $C=C$  ( $\epsilon_2 = 588$  кДж/моль), поэтому ЭРО газообразных алкенов приводит к синтезу УНМ, имеющих преимущественно  $sp^2$ -гибридизацию атомов углерода в твердой фазе. Возбужденные молекулы и радикалы алкенов, в которых электроны находятся в  $sp^2$ -состоянии, не взаимодействуют с диэлектрическими поверхностями, а вступают в реакцию только с металлическими катализаторами группы железа.

Электронная микроскопия высокого разрешения выявила сложную морфологию индивидуальных частиц синтезированных УНМ, которая зависит от типа источника углерода. ЭРО алкенов, образующихся в результате обработки одноатомных спиртов, приводит к образованию только УНТ (рис. 7).

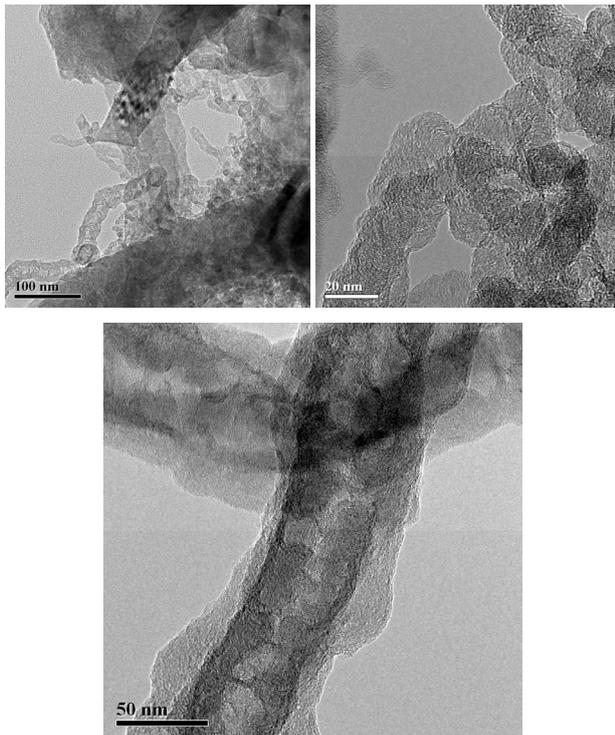


Рисунок 7 – Электронно-микроскопические фотографии УНТ, полученных из газов, образующихся при ЭРО этанола

**Электрофизические свойства электроразрядных УНМ.** Результаты измерения удельной электропроводности порошков УНМ, полученных при ЭРО жидких и газообразных углеводородов (табл. 1), показали большой разброс величин электропроводности, обусловленный различной степенью гибридизации электронов в атомах углерода обрабатываемых жидкостей и газов, а также материалом подложек. Самые высокие значения удельной электропроводности имеют УНТ.

Таблица 1 – Структурное состояние и удельная электропроводность синтезированных УНМ

№ образца	Источник углеорода	Структурное состояние синтезированных УНМ	Удельная электропроводность, См/м
1(383)	Циклогексан	Луковичные структуры углерода	$10^{-4}$
2(R009)	Гексан	Аморфный УНМ	$10^{-2}$
3(R018)	Керосин ТС-1	Аморфный УНМ	2
4(Ц1+Fe)	Циклогексан с добавлением ферроцена	Аморфный УНМ + Fe	80
5(R029)	Газ, образованный при ЭРО циклогексана	Пленочные УНМ	$10^{-3}$
6(R008)	Газ, образованный при ЭРО керосина ТС-1	УНТ + Ni	30
7(R005)	Газ, образованный при ЭРО этанола	УНТ + Ni	$10^2$

Исследование ослабления и отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) полученными образцами УНМ проведено в Институте ядерных проблем Белорусского государственного университета. Величину ослабления фиксировали как отношение средних за период мощностей волн, которые падают на УНМ и проходят сквозь него. Как видно из результатов исследования ослабления и отражения ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц, представленных на рис. 8 и 9, все УНМ, синтезированные электроразрядным методом, являются радиопоглощающими.

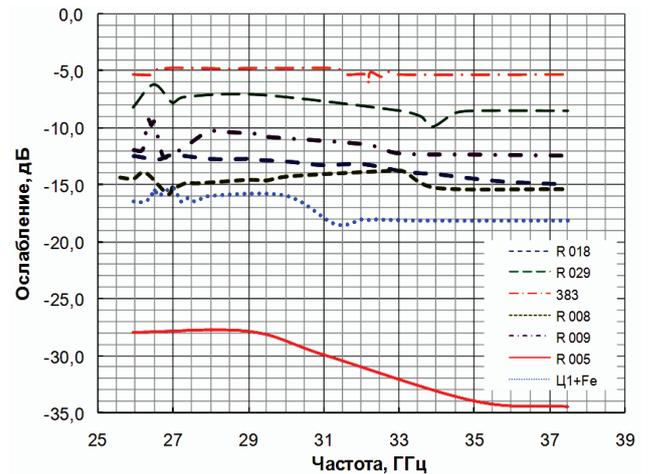


Рисунок 8 – Ослабление ЭМИ разными УНМ

Расположение кривых (сверху вниз), характеризующих рост величины ослабления ЭМИ образцами УНМ, соответствует увеличению удельной электропроводности образцов от  $10^{-4}$  до  $10^2$  См/м.

Наибольшее ослабление ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц достигнуто при использовании образца, материал которого синтезирован из смеси углеводородных газов, образующихся в процессе ЭРО этанола, на никелевом катализаторе. Этот наноматериал имеет самую большую величину удельной электрической проводимости.

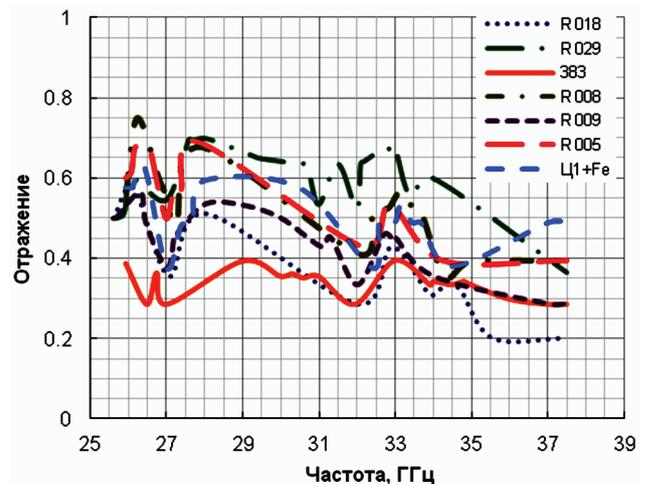


Рисунок 9 – Отражение ЭМИ разными УНМ

Наибольшие величины коэффициента отражения ЭМИ в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц имеют

образцы электроразрядных УНМ, содержащих ферромагнитные наночастицы (Ni, Fe, Cr).

Определена также частотная зависимость ослабления ЭМИ при разной толщине  $d$  образцов УНМ, синтезированных методом ЭРО циклогексана с добавлением ферроцена (рис. 10).

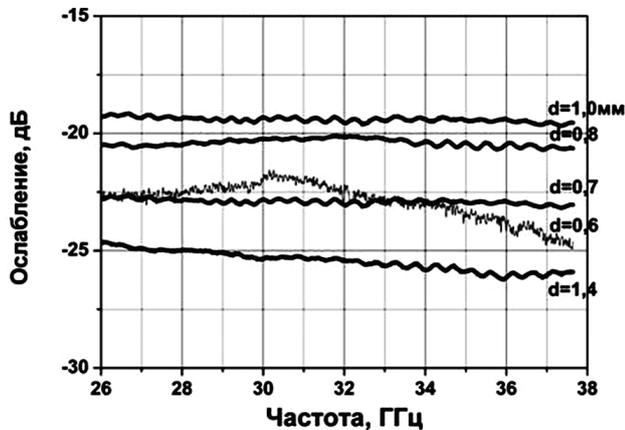


Рисунок 10 – Частотные зависимости величины ослабления ЭМИ УНМ, синтезированного ЭРО циклогексана с добавлением ферроцена, при разной толщине образцов  $d$

Линейные зависимости и величины ослабления ЭМИ углеродными нанотрубками и наноматериалами с луковичной структурой, полученными электроразрядной обработкой углеводородов и содержащими ферромагнитные наночастицы, в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц показывают, что эти материалы являются эффективными поглотителями.

**Выводы.** Результаты исследования ослабления и отражения электромагнитного излучения разными УНМ (аморфный УНМ, УНТ, ЛСУ и пленки), синтезированными методом электроразрядной обработки жидких и газообразных углеводородов с разной степенью гибридизации электронов в атомах углерода, показали перспективность электроразрядного метода для получения радиопоглощающих композитных наноматериалов.

Показано, что УНТ и наноглерод луковичной структуры, характеризующиеся большими величинами удельной электропроводности и содержащие ферромагнитные наночастицы, являются эффективными поглотителями электромагнитного излучения. Наибольшее ослабление электромагнитного излучения в частотном диапазоне от 25 до 38 ГГц достигнуто при использовании образца, материал которого состоит из углеродных нанотрубок и наночастиц ферромагнитного никеля и имеет большую величину удельной электрической проводимости – 100 См/м. Полученные экспериментальные результаты позволяют рекомендовать электроразрядные УНМ для их практического применения в качестве материалов или добавок к материалам, используемым в технологиях защиты электронных приборов от сбоев и выхода из строя.

#### Список литературы

1. *Vovchenko L.* Electromagnetic loss in carbon based materials / *L. Vovchenko, L. Matzui, I. Korotash, O. Rzheshavska* //

*Functional materials.* – 2006. – 13, № 3. – P. 484–488.

2. *Labunov V. A.* Resonance properties of magnetically functionalized multi-wall carbon nanotubes in millimeter waves / *V. A. Labunov, V. A. Karpovich, B. G. Shulickiy, I. V. Komissarov, V. N. Rodionova* // *Nanotechnology.* – 2010. – 3 (23). – P. 62–66.

3. *Kuskova N. I.* Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials / *N. I. Kuskova, K. V. Dubovenko, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, S. O. Chaban* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* – 2013. – Vol. 49, no 3. – P. 35–42.

4. *Rud A. D.* Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques / *A. D. Rud, N. I. Kuskova, L. I. Ivaschuk, L. Z. Boguslavskii, A. E. Perekos* // *Nanomaterials.* – InTech. – 2011. – P. 211–230.

5. *Kuskova N. I.* Dependence of the Yield of Carbon Nanomaterials on the Molecular Structure of Organic Liquids in the Process of Electrodischarge Treatment / *N. I. Kuskova, S. V. Petrichenko, P. L. Tsolin, and V. Yu. Baclar* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* – 2013. – Vol. 49, no. 1. – P. 14–19.

6. *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.

7. *Кускова Н. И.* Пат. 80684, Украина. Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів з органічних рідин / *Н. І. Кускова, О. І. Христо, А. Ю. Терехов, А. П. Малюшевська, О. О. Зубенко* – 2013.

8. *Yushchishina A. N.* On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with electrodischarge treatment of hydrocarbons / *A. N. Yushchishina, N. I. Kuskova, D. I. Chelpanov* // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* – 2015. – Vol. 51, iss. 3. – P. 203–207.

9. *Комаров Ф. Ф.* Ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона бумагой из углеродных нанотрубок / *Ф. Ф. Комаров, О. В. Мильчанин, В. Н. Родионова, В. Б. Карпович, Р. М. Кривошеев* // *ЖТФ.* – 2011. – Т. 81, вып. 11. – С. 140–145.

10. *Рудь А. Д.* Структура и электродинамические свойства УНМ, синтезированных методом электроразрядной обработки углеводородов / *А. Д. Рудь, Н. И. Кускова, И. М. Кирьян, В. Н. Родионова, А. Н. Кириченко* // *Углеродные наночастицы в конденсированных средах: сборник научных статей.* – Минск, 2013. – С. 183–188.

#### References (transliterated)

1. *Vovchenko L., Matzui L., Korotash I., Rzheshavska O.* Electromagnetic loss in carbon based materials. *Functional materials.* 2006, 13, vol. 3, pp. 484–488.

2. *Labunov V. A., Karpovich V. A., Shulickiy B. G., Komissarov I. V., Rodionova V. N.* Resonance properties of magnetically functionalized multi-wall carbon nanotubes in millimeter waves. *Nanotechnology.* 2010, 3(23), pp. 62–66.

3. *Kuskova N. I., Dubovenko K. V., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Chaban S. O.* Electrodischarge Technology and Equipment to Produce New Carbon Nanomaterials. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry.* 2013, vol. 49, no 3, pp. 35–42.

4. *Rud A. D., Kuskova N. I., Ivaschuk L. I., Boguslavskii L. Z., Perekos A. E.* Synthesis of Carbon Nanomaterials Using High-Voltage Electric Discharge Techniques. *Nanomaterials, InTech.* 2011, pp. 211–230.

5. *Kuskova N. I., Petrichenko S. V., Tsolin P. L., Baclar V. Yu.* Dependence of the Yield of Carbon Nanomaterials on the Molecular Structure of Organic Liquids in the Process of

Electrodischarge Treatment. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2013, vol. 49, no. 1, pp.14–19.

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

7. Kuskova N. I., Khrysto O. I., Terekhov A. Yu., Malyshevskaya A. P., Zbenko O. O. Sposib oderzhannya vuhletevykh nanomaterialiv z orhanichnykh ridyn [The way of production of carbon nanomaterials from organic liquids] Patent UA, no. 80684, 2013.

8. Yushchishina A. N., Kuskova N. I., Chelpanov D. I. On possible processes of the formation of carbon nanomaterials with

electrodischarge treatment of hydrocarbons. Surface Engineering and Applied Electrochemistry. 2015, vol. 51, iss. 3, pp. 203–207.

9. Komarov F. F., Mil'chanin O. V., Rodionova V. N., Karpovich V. B., Krivosheev R. M. Oslablenie elektromagnitnogo izlucheniya SVCh-diapazona bumagoy iz uglevodnykh nanotrubok [Reduction of SHF-range electromagnetic emission using the paper made of carbon nanotubes]. ZhTF. 2011, vol. 81, iss. 11, pp. 140–145.

10. Rud' A. D., Kuskova N. I., Kir'yan I. M., Rodionova V. N., Kirichenko A. N. Struktura i elektrodinamicheskie svoystva UNM, sintezirovannykh metodom elektrorazryadnoy obrabotki uglevodorodov [Structure and electrodynamic properties of CNM synthesized by electrical discharge treatment of hydrocarbons]. Uglevodnye nanochastitsy v kondensirovannykh sredakh: sbornik nauchnykh statey. Minsk, 2013, pp. 183–188.

Поступила (received) 27.09.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Електрофізичні властивості вуглецевих наноматеріалів / Н.І. Кускова, О.Д. Рудь, С.В. Петриченко, Д.І. Челпанов, П.Л. Цолін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Электрофизические свойства углеродных наноматериалов / Н.И. Кускова, А.Д. Рудь, С.В. Петриченко, Д.И. Челпанов, П.Л. Цолін // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Electrical and physical properties of carbon nanomaterials / N.I. Kuskova, A.D. Rud, S.V. Petrichenko, D.I. Chelpanov, P.L. Tsolin // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 52-57. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.**

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

**Кускова Наталія Іванівна** – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів та технологій НАН 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 НАН 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.

**Рудь Олександр Дмитрович** – доктор фізико-математичних наук, зав. лабораторією Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова НАН України, тел.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

**Рудь Александр Дмитриевич** – доктор физико-математических наук, зав. лабораторией Института металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины; тел.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

**Rud Aleksandr Dmitrievich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Laboratory Head of the G.V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (044) 424-23-10; e-mail: rud@imp.kiev.ua.

**Петриченко Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, заступник директора Інституту імпульсних процесів та технологій НАН України, (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

**Петриченко Сергей Викторович** – кандидат технических наук, заместитель директора Института импульсных процессов и технологий НАН Украины; тел.: (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

**Petrichenko Sergey Victorovich** – Candidate of Technical Sciences, Deputy Director of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine; tel.: (067) 887-39-30; e-mail: petrishsergey@gmail.com.

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

**Челпанов Дмитрий Ильич** – аспирант, Институт импульсных процессов и технологий НАН 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.

**Цолін Павло Леонідович** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів та технологій НАН України, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

**Цолін Павел Леонидович** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, тел.: (093) 375-05-44; email: tsolinpasha@gmail.com.

**Tsolin Pavel Leonidovich** – Research Assistant, Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, tel.: (067) 514-77-78; email: tsolinpasha@gmail.com.

УДК 621.3.015.3 : 537.528

*Д. И. ЛИСТОВСКИЙ, С. В. ПЕТРИЧЕНКО***ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГРАНУЛ В ЖИДКОСТИ ПО РАСПРЕДЕЛЕНИЮ ЭНЕРГИИ, ВЫДЕЛИВШЕЙСЯ В ЭЛЕМЕНТАХ РАЗРЯДНОЙ ЦЕПИ**

Запропоновано методику визначення початкових умов реалізації розряду в гранульованому шарі для оптимізації розподілу енергії в елементах розрядного контуру установок об'ємного електроіскрового диспергування. Проведено експериментальну перевірку розрахункових виразів для оцінки амплітуд розрядних струмів при реалізації розряду в реакторі з великою кількістю металевих гранул, показані способи визначення емпіричних коефіцієнтів і запропонований спосіб масштабування їх значень для різних геометричних характеристик реактора і гранул.

**Ключові слова:** об'ємне електроіскрове диспергування, оптимізація енергорозподілу в розрядному контурі, реактор диспергування, шар гранул, двоконтактна модель, коефіцієнти емпіричної залежності розрядного струму, міжелектродний проміжок, контакт між гранулами, іскровий розряд, електроіскрове навантаження.

Предложена методика определения начальных условий реализации разряда в гранулированном слое для оптимизации распределения энергии в элементах разрядной цепи установок объемного электроискрового диспергирования. Проведена экспериментальная проверка расчетных выражений для оценки амплитуд разрядных токов при реализации разряда в реакторе с большим количеством металлических гранул, показаны способы определения эмпирических коэффициентов и предложен способ масштабирования их значений для различных геометрических характеристик реактора и гранул.

**Ключевые слова:** объемное электроискровое диспергирование, оптимизация энергораспределения в разрядной цепи, реактор диспергирования, слой гранул, двухконтактная модель, коэффициенты эмпирической зависимости разрядного тока, межэлектродный промежуток, контакт между гранулами, искровой разряд, электроискровая нагрузка.

Problem of the energy efficiency increase of the equipment for volume electro spark dispersion of metal granules in liquid was addressed. Dynamic dependencies of discharge currents on discharge circuit's parameters were formalized. Methods of definition of initial conditions of the granulated layer discharge implementation for the optimization of energy distribution in elements of volume electro spark dispersion installations discharge circuit were offered. Calculated expressions for discharge current amplitude's estimation during discharge realization in the reactor with a large number of metal granules were experimentally approbated. Methods of definition of empirical coefficients were shown and the method of scaling of their values for different geometrical characteristics of the reactor and granules was offered.

**Keywords:** volume electro spark dispersion, optimization of energy distribution in the discharge circuit, the dispersion reactor, a layer of granules, double-contact model, coefficients of empirical dependence of a discharge current, an inter electrode gap, contact between granules, a spark discharge, electro spark loading.

**Введение.** Развитие промышленности связано с применением материалов, обладающих улучшенными характеристиками и новыми функциональными свойствами. При создании таких материалов все чаще используются порошковые системы. Например, для нанесения покрытий (повышенная износостойкость, твердость поверхности; экранирование либо поглощение электромагнитного излучения и пр.) или в качестве шихты компактов. Наноразмерные и наноструктурированные порошки используются и как конечный продукт – присадки триботехнического назначения; абсорбенты или агенты в водородной энергетике, медицине, биотехнологии; для создания изделий электроники (суперконденсаторы, полупроводниковые элементы) с улучшенными характеристиками и т.д.

Задачи производства порошков часто требуют не только обеспечения распределения продукта по дисперсности и морфологии, но и модификации фазового состава по сравнению с материалом исходного сырья (например, карбидизации) или даже получения других аллотропных форм химических элементов (например, углерода).

Качество порошка, производительность, удельные энергозатраты (энергоэффективность процесса синтеза и устройств) являются наиболее важными характеристи-

ками при производстве порошковых материалов (представлены по степени важности). Улучшение этих характеристик – актуальная научно-техническая проблема на стыке нескольких дисциплин.

Большинство из задач получения порошков решаемы с применением способа объемного электроискрового диспергирования (ОЭИД) токопроводящих гранул в жидкости. Реализация ОЭИД в устройстве с установленной мощностью в несколько кВ·А обеспечивает производительность синтеза порошков до нескольких кг/ч с удельными энергозатратами порядка нескольких кВт·ч/кг. Таким образом, ОЭИД гранул из проводящего материала в диэлектрической жидкости является производительным и энергоэффективным способом получения тонкодисперсных порошков с уникальными функциональными свойствами, морфологией и распределением по дисперсности [1-4]. В его основе лежит эффект пространственной концентрации электрической мощности при разряде конденсаторной батареи на межэлектродный промежуток, заполненный, как правило, металлическими гранулами, погруженными в воду, жидкие углеводороды и другие диэлектрические жидкости. На множестве контактов между гранулами в течение единичного импульса возникают локальные искровые разряды – зоны фазо-

вого превращения материала гранул и деструкции жидкости, с последующим образованием субмикронного или наноразмерного порошка. Сами импульсы разряда конденсаторной батареи подаются с частотой до нескольких кГц. Этот способ, доведенный до промышленной реализации, ранее по большей части применялся для решения специфических задач, таких как получение порошков из дорогостоящих материалов или небольших партий порошков для использования в электронной, химической промышленности и прочих областях. В настоящее время потребность промышленности в порошковых материалах возросла на несколько порядков, поэтому задача снижения удельных энергозатрат на их производство приобретает все более важное значение. Вопросы синтеза зарядных цепей с учетом остаточных напряжений на емкости подробно описаны в работе [5]. Поэтому, не останавливаясь на качестве получаемого порошка, производительности синтеза и энергоэффективности электроискровых процессов диспергирования – характеристиках, высокие показатели которых для способа ОЭИД доказаны, рассмотрим в данной работе задачи повышения энергоэффективности оборудования ОЭИД за счет оптимизации распределения энергии разрядного импульса в элементах разрядной цепи соответствующих устройств.

**Методика эксперимента.** В этой работе для определения коэффициентов и оценки справедливости эмпирических зависимостей использовались экспериментальные результаты, часть из которых была приведена в работах [6, 7]. Для дополнения и проверки этих результатов проведена новая серия экспериментов по общей методике, изложенной в [7]. Результаты были дополнены данными эксперимента по формированию электроискрового разряда на двухконтактной модели – модели элементарной цепочки гранул. Принцип и конструктивное исполнение модели элементарной цепочки подробно описаны в работе [8], а полученные ранее на модели данные обобщены для экспериментов с алюминиевыми гранулами. Модель одного контакта между двумя гранулами не применяется, так как для ее конструктивной реализации еще не решены вопросы точного воспроизведения (от разряда к разряду) и контроля механической плотности контакта.

Коротко суть экспериментальной методики сводится к следующему. Бумажно-плёночный конденсатор с емкостью, которую выбирают из диапазона практически применяемых в действующих установках ОЭИД (от единиц до сотен мкФ), заряжают от источника постоянного тока до определенного уровня напряжения. Этот уровень для применяемых на практике параметров и размеров гранулированного слоя составляет сотни вольт. Для моделей уровень зарядного напряжения может быть пересчитан. Существует несколько близких по сути принципов и методик пересчета, на чем мы остановимся в ходе изложения результатов. Далее заряженный конденсатор посредством тиристорного коммутатора разряжают на электроды модельной разрядной камеры, между которыми расположены металлические гранулы (гранула), по-

груженные в жидкость (рис. 1). Диаметр гранул (или скругление электродов на модели), параметры и геометрию слоя также выбирают из условий соответствия практически применяемым в действующих установках с одним дополнительным условием. Условие состоит в том, чтобы гидродинамические возмущения за время токовой стадии разряда не могли распространиться до ближайшего контактного узла, чтобы исключить дополнительный возмещающий фактор. Сигналы с датчиков (шунт и делитель напряжения) поступают на запоминающий осциллограф, который синхронизируется по моменту подачи управляющего импульса на тиристор.

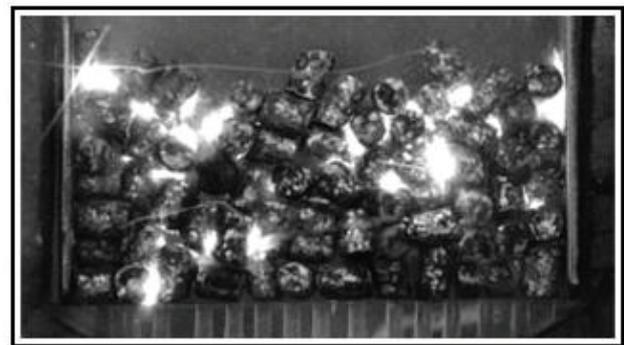
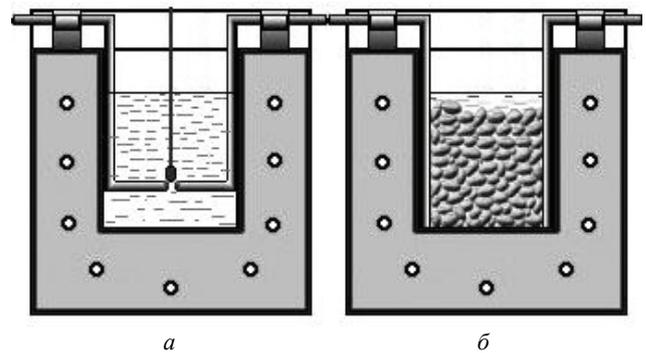


Рисунок 1 – Конструкция двухконтактной (а) и двумерной модели (б) реактора ОЭИД, фотография разрядов в прозрачной ячейке (в)

Анализируемые в этой работе экспериментальные результаты были получены при  $C = 50; 100$  мкФ и  $L = 2$  мкГн:

– для двухконтактной модели:  $d_{zp} = 6$  мм, материал – алюминий и сталь (новые экспериментальные данные);

– для двумерного слоя:  $d_{zp} = 6$  мм,  $l = 60$  мм,  $h \leq 60$  мм; материал – алюминий и сталь (экспериментальные данные были дополнены).

Зарядные напряжения – от минимальных для формирования разряда при данных условиях до 1,5 кВ. Более высокие напряжения по условиям работы полупроводниковых коммутаторов, как правило, не применяют.

**Обсуждение результатов.** Ранее была установлена эмпирическая зависимость, связывающая значения амплитуд разрядных токов с зарядным напряжением накопительного конденсатора и его емкостью, а также с индуктивностью разрядной цепи (варьируе-

мые параметры) [9]. Показана ее применимость для двумерных моделей технологического аппарата диспергирования с малым количеством сферических (алюминиевых) гранул (до 4x4 гранулы).

Для подтверждения ее применимости при диспергировании материалов, существенно отличающихся своими теплофизическими характеристиками и плотностью от алюминия, на модели элементарной цепочки и двумерного слоя с количеством гранул, соответствующим количеству гранул в плоском сечении промышленного реактора ОЭИД, была проведена серия дополнительных экспериментов. Помимо применимости зависимости важной задачей является обоснование и уточнение методики определения коэффициентов зависимости и пояснения их содержания.

Эмпирическая зависимость (1) содержит два коэффициента [9], первый из которых ( $a_1$ ) имеет величину порядка волнового сопротивления разрядной цепи, а второй ( $a_2$ ) – величину порядка зарядного напряжения, как было показано ранее. Величину  $a_2$  определяли по пересечению экстраполированных зависимостей амплитуд разрядного тока от зарядного напряжения ( $U_0$ ) с осью  $U_0$  (отсечка по оси абсцисс). Причем использовались зависимости, полученные для стабильных разрядов при реализации разрядов на элементарной цепочке гранул. Можно предположить, что коэффициенты, которые в работе [9] выбирались постоянными, для различных емкостей конденсаторной батареи, подлежат уточнению, что позволит снизить отклонение расчетных значений амплитуд разрядных токов от зарегистрированных в эксперименте.

$$I_{ma}(U_0, C, L) = \ln \left[ a_1 \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^2} \right] \cdot (U_0 - a_2). \quad (1)$$

В первую очередь рассмотрим элементарную модель – **цепочку из двух последовательных контактов между тремя гранулами** (крайние гранулы являются, собственно, электродами). Далее, по ходу изложения, индуктивность не рассматривается в качестве варьируемого параметра, так как ее значение было фиксировано по величине и соответствовало индуктивности разрядных цепей применяемых технологических устройств диспергирования.

Несложно показать, что изменение емкости приводит к изменению отношения волновых сопротивлений ( $\rho_B$ ) разрядных контуров – обратно пропорционально корню квадратному отношения емкостей. Вместе с тем, как было показано ранее, увеличение/уменьшение емкости конденсаторной батареи приводит к увеличению/уменьшению минимального напряжения формирования стабильной искры в элементарной цепочке гранул. Рассмотрим эту ситуацию, выполнив соответствующие подстановки в эмпирическую зависимость. Примем значение  $a_1 = n\rho_B$  (где для элементарной цепочки число последовательных контактов  $n = 2$ ), а  $a_2$  определим из новых экспериментальных данных (рис. 2, а, в). Для этого выполним регрессионный анализ экспериментальных точек зависимости  $I_{me}(U_0)$ , представив его результат линейными функциями (штриховая линия на рис. 2, а, в),

например

$$\text{для } C = 50 \text{ мкФ: } I_m(U_0) = 5,24 \cdot U_0 - 174;$$

$$\text{для } C = 100 \text{ мкФ: } I_m(U_0) = 5,02 \cdot U_0 - 152.$$

Экстраполировав эти функции, что графически показано на рис. 2 а, в, определим, соответственно, коэффициенты для разных емкостей (в скобках указана емкость в мкФ):  $a_2(50) = 33,0$ ;  $a_2(100) = 30,3$ . Максимальные относительные отклонения регрессионных функций  $I_m(U_0)$  от экспериментальных данных в точках, соответствующих условиям эксперимента, не превышает: для 50 мкФ – 3 %, для 100 мкФ – 9 %, что является удовлетворительным значением указанной величины. Малое отличие  $a_2$  от приведенного в работе [9], где использовались алюминиевые гранулы объясняется тем, что регрессионный анализ и экстраполяция выполнялись по осциллограммам (экспериментальным точкам) стабильных разрядов, где использовалось зарядное напряжение, заведомо превышающее минимальное напряжение формирования искры – напряжение зажигания ( $U_{заж}$ ), а также близкими значениями молярных теплоемкостей используемых материалов. Очевидно, что прямое экспериментальное определение  $a_2$  по  $U_{заж}$  в элементарной цепочке вызовет существенные отличия значений  $a_2$  для разных материалов, связанные с различной электрической прочностью оксидных пленок, различным микрорельефом поверхности и другими факторами. Величина  $U_{заж}$  имеет важное значение при анализе процессов многократного формирования и перераспределения искр в технологическом слое с большим количеством гранул в ходе единичного разряда. Однако на значения амплитуды тока в этом слое существенного влияния не оказывает вследствие самосогласованности объемных интегральных и локальных энергетических процессов в искрящем слое.

Можно допустить, что величина  $a_2$  связана с минимальным напряжением, необходимым для формирования стабильной искры в двух последовательных контактах, т.е. стабильного (повторяется форма кривых и амплитуда разрядного тока) сквозного проводящего канала. Если накопители различной емкости при этом заряжены до уровня энергии, достаточного для формирования стабильной искры, то сама величина емкости принципиального влияния ни на коэффициент  $a_2$ , ни на минимальное напряжение формирования стабильной искры не оказывает. Т.е. можно предположить, что коэффициенты  $a_2$  для различных емкостей по сути своего содержания не отличаются при выполнении обозначенного условия.

В определенных из экспериментальных данных значениях  $a_2(50)$  и  $a_2(100)$  присутствуют незначительные расхождения, которые для различных емкостей могут объясняться неустранимыми техническими трудностями воспроизведения всех прочих равных условий в экспериментах с различными емкостями, т.е. реальные конденсаторы на 50 и 100 мкФ имеют ряд дополнительных расходящихся параметров. Усредним коэффициент  $a_2$  и проверим отклонения эмпирической зависимости амплитуд (1) от экспериментальных значений в точках и в среднем по всему массиву. Как видно из табл. 1 подстановка усредненного

коэффициента  $a_2 = 31,65$  в эмпирическое выражение (рис. 1, а, в, сплошная линия) дает среднее отклонение по экспериментальным массивам данных ( $\delta_{cp}$ ) не превышающее: для 50 мкФ – 10,5 %, для 100 мкФ – 5,2 %. При этом в экспериментальных точках для обеих ем-

костей отклонение ( $\delta$ ) не превышает 12 %. Если же использовать в зависимости (1) значения  $a_2(50)$  и  $a_2(100)$  – отклонение в экспериментальных точках может достигать 14 % (табл. 1), а среднее – 12,5 % и 6 %, соответственно.

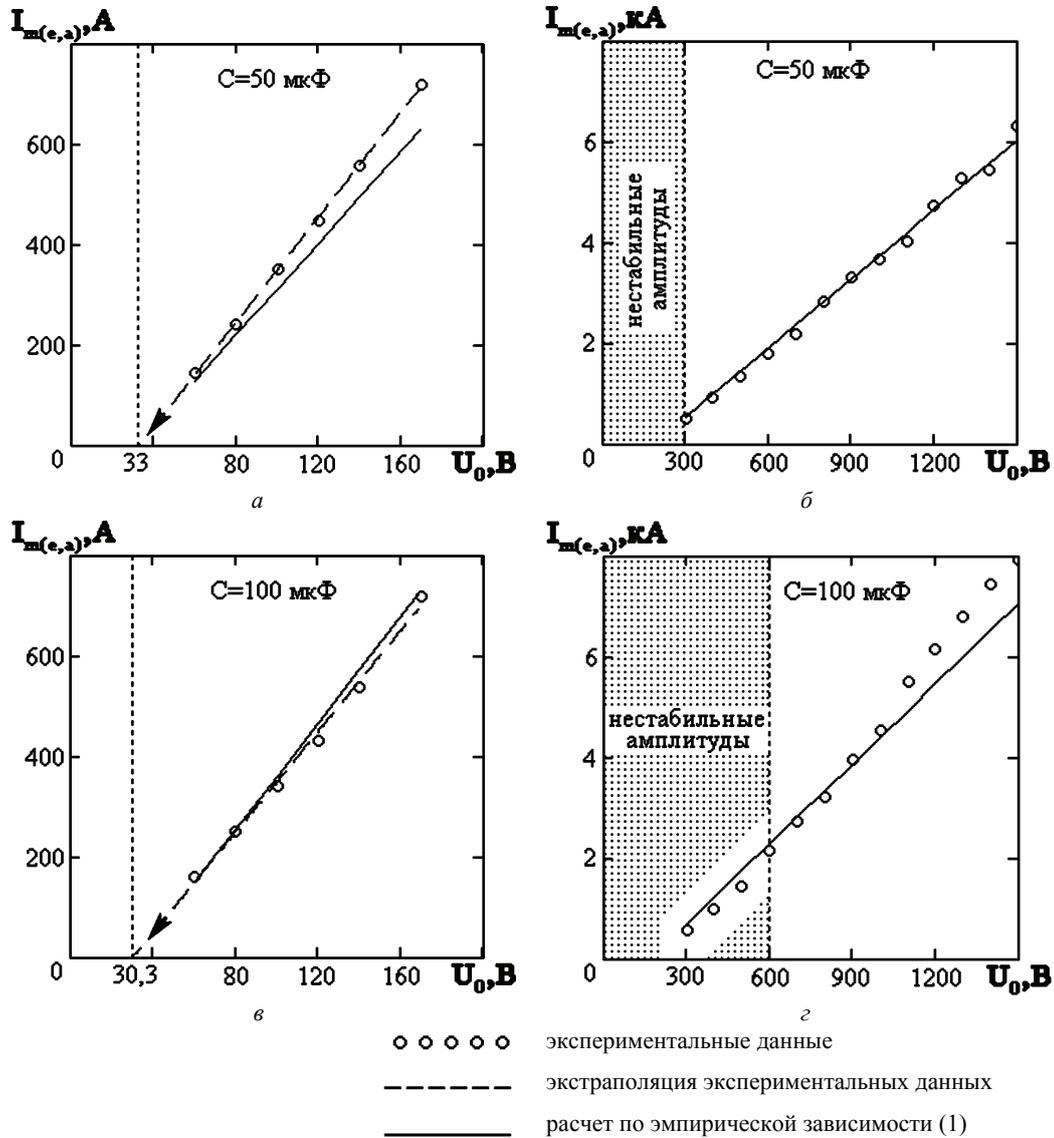


Рисунок 2 – Зависимости амплитуд разрядных токов от зарядного напряжения для двухконтактной модели (а, б) и двумерного слоя гранул (в, г)

Рассмотрим ситуацию с **прямоугольным слоем гранул**, где между электродами по одной кратчайшей линии расположены минимум 10 гранул и, соответственно, сформированы минимум 11 контактов. Не выполняя предварительного экспериментального определения коэффициентов  $a_1'$  и  $a_2'$  (коэффициенты со штрихом соответствуют слою гранул  $10 \times 10$ , без штриха – двухконтактной элементарной модели) рассмотрим гипотезу объясняющую их содержание. Так, допустим, что в прямоугольном **плоском** слое увеличение числа последовательных контактов между гранулами от электрода до электрода и соответственное увеличение значения импеданса одной замыкающей цепочки искрящих контактов компенсируется сниже-

нием общего сопротивления слоя на токовой стадии за счет формирования параллельных искрящих ветвей количеством, приблизительно равным числу последовательных искрящих контактов. Таким образом, соотношение между эквивалентным интегральным сопротивлением слоя в ходе разряда и волновым сопротивлением разрядной цепи измениться незначительно [6,7] если энергии запасенной в конденсаторной батарее достаточно для формирования необходимого количества искрений в параллельных ветвях тока. Т.е. запасенной энергии должно быть достаточно для формирования  $n \times n$  локальных искровых каналов, где  $n$  – условное число последовательных контактов между гранулами от электрода до электрода. Как правило,

это условие выполняется, т.к. увеличение числа последовательных контактов обеспечивается соответствующим увеличением зарядного напряжения конденсаторной батареи, а ее запасенная энергия пропорцио-

нальна квадрату этого напряжения ( $n \times n$ ). Поэтому можем принять значение  $a_1'$  таким же как для элементарной цепочки гранул.

Таблица 1 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений амплитуд разрядных токов (двухконтактная модель)

	$U_0, \text{В}$	$I_{me}, \text{А}$	$I_{ma}, \text{А}$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$	$I_{ma}, \text{А}$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$
			$a_2(50)=33,0$			$a_2(cp)=31,65$		
$C_1=50\text{мкФ}$	60	144	124	13,9	12,5	130	9,9	10,5
	80	243	215	11,5		221	8,9	
	100	351	307	12,6		313	10,8	
	120	450	398	11,5		404	10,1	
	140	558	490	12,2		496	11,1	
	170	720	627	12,9		633	12,0	
$C_2=100\text{мкФ}$	$a_2(100)=30,3$			2,9	6,0	$a_2(cp)=31,65$		
	60	162	157	4,5		150	7,3	5,2
	80	252	263	8,0		256	1,7	
	100	342	369	10,0		362	5,9	
	120	432	475	7,6		468	8,4	
	140	540	581	2,8		574	6,3	
	170	720	740			733	1,8	

Несколько иная ситуация с коэффициентом  $a_2'$ . Ранее показано, что он имеет величину порядка зарядного напряжения. Поскольку, как мы допустили ранее, величина  $a_2$  связана с минимальным напряжением необходимым для формирования одной сквозной стабильной цепочки искрящих контактов между двумя электродами, проверим эту гипотезу. В элементарной цепочке, по определению, таких контактов два. При загрузке гранул в нужном количестве для обеспечения параметров слоя (в нашем случае  $10 \times 10$  гранул) происходит ограниченно контролируемая их упаковка. В реальных технологических аппаратах диспергирования, где не используются идеально сферические гранулы, а перекомпоновка (перекомпактирование) слоя происходит постоянно после каждого разряда, расположение гранул носит стохастический характер, поэтому задача идеальной упаковки гранул в слой в работе не ставилась. Как видно из фотографии ячейки с искрящим слоем (рис. 1), в одной кратчайшей цепочке искрений между электродами может находиться более 10 гранул (более 11 искрящих контактов). В принципе, возможны две крайние ситуации, когда промежуток замыкают 10 гранул при наличии между ними контакта (11 контактов между электродами) и когда промежуток замыкают 19 гранул (20 контактов между электродами). Второй вариант в двумерном и трехмерном технологическом слое практически нереализуем, всегда найдется одна кратчайшая цепочка с меньшим количеством контактов. Поэтому если считать оценку минимального количества контактов между электродами, приведенную в работе [10] достоверной, для определения  $a_2'$  достаточно масштабировать значение  $a_2$ , связанное с пробоем двух контактных промежутков на ситуацию с  $n'$  контактными промежутками, где в общем случае  $n'$  определяется как

$$n' = \left( \frac{l}{d_{zp}} + 1 \right); \quad (2)$$

где  $l$  – длина промежутка между электродами;  $d_{zp}$  – характерный диаметр гранулы.

Тогда путем масштабирования, из данных полученных для элементарной цепочки,  $a_2'$  можно вычислить из выражения

$$a_2' = a_2 \cdot \frac{n'}{2}. \quad (3)$$

Вернемся к сравнению экспериментальных значений амплитуд разрядных токов в слое с расчетными значениями, полученными из выражения (1) с подстановкой  $a_2'$  по (3), а  $a_1' = a_1$ . Визуально, результаты сравнения можно оценить из рис. 2, б, з, количественно – из табл. 2.

Отклонения расчетных значений амплитуд разрядных токов, где коэффициенты определялись на основании предложенной методики, от экспериментальных не превышают в точках 15 % по обеим емкостям, в среднем по массиву данных для 50 мкФ – не более 6 %, для 100 мкФ – 8 %, что является хорошим результатом и подтверждает применимость эмпирической зависимости (1), по меньшей мере, для двумерного слоя с количеством гранул между электродами и по высоте слоя, соответствующим технологическим реакторам диспергирования.

Рассмотрим условия оптимальной энергоэффективности в разрядной цепи, критерием которой выберем экстремум (выпуклая кривая) на отношении выделившейся в межэлектродном промежутке энергии к запасенной. Ранее в работе (8) было показано, что для элементарной цепочки из алюминиевых гранул таким условием является приближенное равенство волнового сопротивления разрядной цепи и интегрального эквивалентного сопротивления межэлектродного промежутка в процессе электрического разряда. Это же условие, как следует из рис. 3, выполняется и для разряда в элементарной цепочке стальных гранул и для разряда в двумерном слое с большим ( $10 \times 10$ ) количеством гранул при разных емкостях накопителя. Но  $R_3$  – величина, рассчитанная на основе экспериментальных данных, что не позволяет прямо и предельно определить условия согласования искровой нагрузки. Вместе с тем в данной работе мы пока-

зали возможность определения амплитуд разрядных токов расчетным путем на основании эмпирической зависимости для широкого класса технологических задач (материал гранул, параметры слоя, диапазоны по  $U_0$  и  $C$  и т.д.). Известен типовой вид кривых динамических зависимостей сопротивления разрядного промежутка (от времени) [6,10], это U – образные зависимости с выраженным горизонтальным участком, причем значения  $R_3$  коррелируют с уровнем горизонтального участка на динамических зависимостях сопротивления. С другой стороны, динамические зависимости разрядного тока [7] имеют, как правило, куполообразную форму, где фронт несколько короче, чем спад импульса и имеет слабо выраженный перегиб, соответствующий замыканию межэлектродного промежутка сквозной цепочкой искрящих контактов. Тем не менее, как было показано в работе [11], временную зависимость разрядного тока с достаточной степенью точности (для решения задач не связанных с этапом формирования разряда, а связанных с активной токовой стадией разряда) можно представить синусоидальной функцией (4). Таким образом, определение условий согласования может сводиться к численному либо аналитическому решению уравнения

разрядной цепи (5) относительно сопротивления разрядного промежутка, где ток выражен указанной зависимостью с последующим интегрированием  $R(t)$  для определения  $R_3$ . Однако в этом случае неопределенными будут начальные условия.

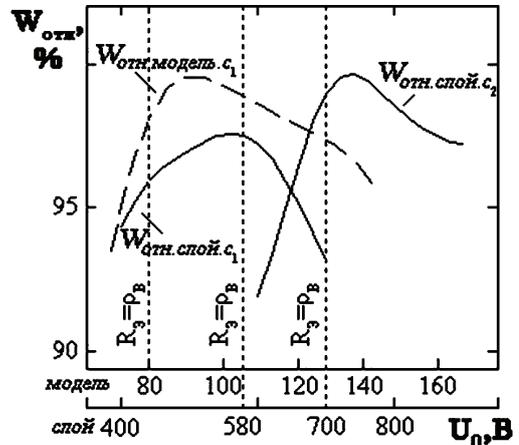


Рисунок 3 – Зависимость отношения выделившейся в межэлектродном промежутке энергии к запасенной от зарядных напряжений

Таблица 2 – Сравнение расчетных и экспериментальных значений амплитуд разрядных токов (слой)

	$U_0, B$	$I_{me}, A$	$I_{ma}, A$	$\delta, \%$	$\delta_{cp}, \%$
			$a_2(cp)=31,65$		
$C_1=50\text{мкФ}$	300	504	576	14,4	5,5
	400	936	1034	10,5	
	500	1350	1492	10,5	
	600	1800	1950	8,3	
	700	2205	2408	9,2	
	800	2835	2866	1,1	
	900	3330	3323	0,2	
	1000	3690	3781	2,5	
	1100	4048	4239	4,7	
	1200	4752	4697	1,2	
	1300	5280	5155	2,4	
	1400	5456	5613	2,9	
1500	6336	6070	4,2		
$C_2=100\text{мкФ}$	600	2160	2257	4,5	7,4
	700	2754	2786	1,2	
	800	3240	3316	2,4	
	900	3969	3846	3,1	
	1000	4536	4376	3,5	
	1100	5508	4906	10,9	
	1200	6156	5436	11,7	
	1300	6804	5965	12,3	
1400	7452	6495	12,8		
1500	7938	7025	11,5		

Для вычисления  $R_3$  на основании экспериментальных данных используем зависимость (6), в числителе которой находится выделившаяся в ходе разряда в межэлектродном промежутке энергия. Оптимизация режима обработки по распределению энергии в элементах разрядной цепи предполагает ситуацию, когда доля выделившейся в межэлектродном промежутке энергии будет максимально возможной. В идеальном случае условно можем принять это значение равным запасенной в конденсаторной батарее энергии (достижимый на практике уровень – порядка 90 %). Тогда

выполнив подстановку запасенной в конденсаторе энергии в выражение (6), а также значение разрядного тока из выражения (4) определим зависимость эквивалентного интегрального сопротивления от основных параметров разрядной цепи (7).

Выполнив подстановку пределов интегрирования в (7) и приравняв предложенную зависимость к значению волнового сопротивления разрядной цепи, получим однозначно определенную взаимосвязь  $U_0, C, L$  (8), которая и будет являться условием оптимизации по экстремуму выделившейся в искровой нагрузке энер-

гии. Его проверка приводит к совпадению для выбранных  $C$  и  $L$  расчетного значения  $U_0$  и практического (экспериментального), которые с высокой степенью точности соответствуют экстремуму  $W/W_0$ .

$$i(t) = \ln \left( a_1 \cdot \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot (U_0 - a_2) \cdot \sin(\omega \cdot t); \quad (4)$$

$$\frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt + L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R(t) \cdot i(t) = U_0; \quad (5)$$

$$R_3 = \frac{\int_0^{\tau} i(t) \cdot U(t) dt}{\int_0^{\tau} i^2(t) dt}; \quad (6)$$

$$R_3(U_0, C, L) \approx \frac{W_0}{\int_0^{\tau} i^2(t) \cdot dt} = \frac{C \cdot U_0^2}{2 \cdot I_{ma}^2} \cdot \frac{1}{\int_0^{\tau} \sin^2(\omega \cdot t) \cdot dt} =$$

$$= \frac{C \cdot U_0^2}{2 \cdot \left( \ln \left( a_1 \cdot \frac{C^{\frac{3}{2}}}{L^{\frac{1}{2}}} \right) \cdot (U_0 - a_2) \right)^2} \times$$

$$\times \frac{1}{\left( -\frac{1}{4 \cdot \omega} \cdot \sin(2 \cdot \omega \cdot t) + \frac{1}{2} \cdot t \right) \Big|_0^{\tau}}, \quad (7)$$

где примем  $\omega = \sqrt{\frac{1}{L \cdot C} - \frac{R_3^2}{4 \cdot L^2}} \approx 1/\sqrt{LC}$ ;

$\tau \approx \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ , т.к. значения угловой частоты в рассматриваемом диапазоне входящих в соответствующее выражение величин для затухающих и свободных колебаний отличается практически на порядок.

$$\frac{U_0^2}{(\ln(2 \cdot C) \cdot (U_0 - a_2))^2 \cdot \pi} = \rho_B^2 = \left( \sqrt{\frac{L}{C}} \right)^2. \quad (8)$$

Таким образом, методика оптимизации режима обработки для действующей установки сводится к следующему (вариант). Допустим, имеется реактор диспергирования с известными геометрическими параметрами и материал – металлические гранулы с известным характерным диаметром. Индуктивность, как правило, является фиксированным параметром, установленным на минимально технически реализуемом уровне (~2 мкГн). В генераторе импульсов реализована возможность варьирования зарядного напряжения и емкости конденсаторной батареи в практически применяемых пределах. Последовательность выбора оптимальных параметров для обработки:

– по (2) вычисляется  $n'$ , а по (3) –  $a_2'$ . При этом для обработки стальных и алюминиевых гранул можно воспользоваться значением  $a_2$ , приведенным в данной работе. Для металлических материалов с близкими к обозначенным молярными теплоемкостями, значение  $a_2$  не должно существенно отличаться от приведенного. Для различных металлов целесообразно про-

вести серию несложных экспериментов на модели элементарной цепочки и подготовить таблицу значений коэффициентов;

– в зависимости от характерного диаметра гранул, исходя из условия отсутствия гидродинамического взаимодействия активизированных контактов [11]

$$r_0 + 0,5\pi \cdot v_{ВОЗМ} (LC)^{1/2} / d_0 \geq 1; \quad (9)$$

где  $r_0$  – начальный радиус канала;  $v_{ВОЗМ}$  – скорость распространения гидродинамического возмущения в жидкой среде;  $d_0$  – диаметр гранул; из диапазона практически применяемых емкостей задается емкость конденсаторной батареи  $C$ .

– на основании (8) вычисляется необходимое значение зарядного напряжения и проверяется на соответствие достаточному условию по обеспечению стабильной искры на паре контактов [11] для данной емкости с использованием предложенного подхода к масштабированию.

**Выводы.** В работе предложена методика определения начальных условий реализации разряда в гранулированном слое для оптимизации распределения энергии в элементах разрядной цепи установок ОЭИД. Проведена экспериментальная проверка расчетных выражений для оценки амплитуд разрядных токов при реализации разряда в реакторе с большим количеством металлических гранул, показаны способы определения эмпирических коэффициентов и предложен способ масштабирования их значений для различных геометрических характеристик реактора и гранул.

#### Список литературы

1. Асанов У. А. Электроэрозионная технология соединений и порошков металлов / У. А. Асанов, А. Д. Цой, А. А. Щерба [и др.]. – Фрунзе: Илим, 1990. – 256 с.
2. Левченко В. Ф. Электроимпульсный метод комплексной переработки материалов / В. Ф. Левченко // Проблемы машиностроения. – 1992. – № 38. – С. 78–86.
3. Berkowitz A. E. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion / A. E. Berkowitz, M. F. Hansen, F. T. Parker [et.al] // J. Magn. Magn. Mater. – 2003. – № 1. – С. 254–255.
4. Carrey J. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters / J. Carrey, H. B. Radousky, A. E. Berkowitz // Journal of Applied Physics. – 2004. – Т. 95, № 3. – С. 823–829.
5. Щерба А. А. Закономерности изменения потерь энергии в RL-цепях, соединяющих конденсаторы, заряженные до разных напряжений / А. А. Щерба, Н. И. Супруновская // Технічна електродинаміка. – 2015. – № 6. – С. 3–6.
6. Петриченко С. В. Сравнение электрических характеристик искровых разрядов в слое металлических и графитовых гранул, погруженных в жидкость / С. В. Петриченко, Н. И. Кускова, Д. И. Листовский // Электронная обработка материалов. – 2015. – Т. 51, № 3. – С. 38–43.
7. Петриченко С. В. Стабилизация разрядных импульсов и особенности согласования искровой нагрузки при электроэрозионном диспергировании металлических и графитовых гранул в жидкости / С. В. Петриченко, Н. И. Кускова, Д. И. Листовский // Электронная обработка материалов. – 2016. – Т. 52, № 2. – С. 8–13.
8. Петриченко С. В. Регулирование эффективного объема разрядной плазмы при контактном электроискровом процессе в жидкости / С. В. Петриченко // Электронная обработка материалов. – 2008. – № 3. – С. 4–10.

9. Щерба А. А. Физическое моделирование и анализ динамики искроплазменных процессов при электроэрозионном диспергировании токопроводящих гранул в жидкости / А. А. Щерба, С. В. Петриченко // Технічна електродинаміка. – 2004. – № 3. – С. 27–32.

10. Щерба А. А. Регулирование динамических параметров технологических систем объемной электроискровой обработки гетерогенных токопроводящих сред / А. А. Щерба, А. Д. Подольцев, С. Н. Захарченко // Праці ІЕД НАНУ. Електротехніка'2001. – 2001. – С. 3–17.

11. Петриченко С. В. Підвищення продуктивності і стабілізація режимів об'ємного електроіскрового диспергування струмопровідних гранул у рідині / С. В. Петриченко // Вестник НТУ «ХПИ». Сер. Техніка і електрофізика високих напруг: сб. научн. трудов. – 2010. – № 18. – С. 139–148.

#### References (transliterated)

1. Asanov U. A., Coj A. D., Shherba A. A., Kazekin V. I. Jelektrojerozionnaja tehnologija soedinenij i poroshkov metallov [Electroerosive technology of compounds and powders of metals]. Frunze, Ilim Publ., 1990. 256 p.

2. Levchenko V. F. Jelektroimpul'snyj metod kompleksnoj pererabotki materialov [Electropulse method for complex processing of materials]. Problemy mashinostroenija [Mechanical engineering problems]. 1992, no. 38, pp. 78–86.

3. Berkowitz A. E., Hansen M. F., Parker F. T., Vecchio K. S., Spada F. E., Lavernia E. J., Rodriguez R. Amorphous soft magnetic particles produced by spark erosion. J. Magn. Mater. 2003, no. 1, pp. 254–255.

4. Carrey J., Radousky H. B., Berkowitz A. E. Spark-eroded particles: Influence of processing parameters. Journal of Applied Physics. 2004, vol. 95, no. 3, pp. 823–829.

5. Shherba A. A., Suprunovskaja N. I. Zakonomernosti izmenenija poter' jenerгии v RL-cerpjah, soedinjajushhikh kondensatory, zarjzhennye do raznyh naprjazhenij [Regularities of change of losses of energy in the RL-circuits connecting the capacitors charged up to the various voltage]. Tehnichna elektrodinamika, 2015, no. 6, pp. 3–6.

6. Petrichenko S. V., Kuskova N. I., Listovskij D. I. Sravnenie jelektricheskikh harakteristik iskrovyyh razrjadov v sloe metallicheskih i grafitovyh granul, pogruzhennyh v zhidkost'

[Comparison of the electrical characteristics of spark discharges in a layer of metal and graphite granules immersed in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2015, vol. 51, no. 3, pp. 38–43.

7. Petrichenko S. V., Listovskij D. I., Kuskova N. I. Stabilizacija razrjadnyh impul'sov i osobennosti soglasovanija iskrovoj nagruzki pri jelektrojerozionnom dispergirovanii metallicheskih i grafitovyh granul v zhidkosti [Stabilization of discharge pulses and peculiarities of spark load matching at electroerosive dispersion of metal and graphite granules in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2016, vol. 52, no. 2, pp. 8–13.

8. Petrichenko S. V. Regulirovanie jeffektivnogo ob'ema razrjadnoj plazmy pri kontaktnom jelektroiskrovom processe v zhidkosti [Regulation of the effective volume of the discharge-plasma in contact electrospark process in liquid]. Jelektronnaja obrabotka materialov. 2008, no. 3, pp. 4–10.

9. Shherba A. A., Petrichenko S. V. Fizicheskoe modelirovanie i analiz dinamiki iskroplazmennyyh processov pri jelektrojerozionnom dispergirovanii tokoprovodjashhikh granul v zhidkosti [Physical modeling and the analysis of dynamics of spark-plasma processes at the electroerosive dispersion of conducting granules in liquid]. Tehnichna elektrodinamika. 2004, no. 3, pp. 27–32.

10. Shherba A. A., Podol'cev A. D., Zaharchenko S. N. Regulirovanie dinamicheskikh parametrov tehnologicheskikh sistem ob'emnoj jelektroiskrovoj obrabotki geterogennyh tokoprovodjashhikh sred [Regulation of dynamic parameters of technological systems of volume electrospark processing of heterogeneous conducting environments]. Pratsi Instytutu Elektrodynamiky Natsional'noyi Akademiyi Nauk Ukrainy. Elektrotekhnika'2001 [Proc. of the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Electrical Engineering'2001]. pp. 3–17.

11. Petrichenko S. V. Pidvyshchennya produktyvnosti i stabilizatsiya rezhymiv ob'yemnoho elektroiskrovoho dysperhuvannya strumoprovodnykh hranul u ridyni [Increase of productivity and stabilization of regimes of volume electric dispersion of conductive granules in the liquid]. Visnyk NTU "KhPI". Ser.: Tehnika i jelektrofizika vysokikh naprjazhenij [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Technics and electrophysics of high voltage]. Kharkiv, 2010, no. 18, pp. 139–148.

Поступила (received) 09.08.2016

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

Оптимізація режимів електроіскрового диспергування металевих гранул з розподілу енергії, що виділилася в елементах розрядного контуру / Д. І. Листовський, С. В. Петриченко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Оптимизация режимов электроискрового диспергирования металлических гранул по распределению энергии выделившейся в элементах разрядной цепи / Д. И. Листовский, С. В. Петриченко // Вісник НТУ «ХПИ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2079-0740.

Electrospark dispersion of metal granules regimes' optimization on distribution of energy released in discharge circuit elements / D. I. Listovskii, S. V. Petrichenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 58-65. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2079-0740.

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

Листовський Дмитро Ігорович – аспірант Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Листовський Дмитрій Ігорович – аспірант Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Listovskii Dmitriy Igorevich – Postgraduate Student, Institute of Pulses Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (093) 713-00-88; e-mail: dmitriy629@gmail.com.

Петриченко Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, заступник директора з наукової роботи Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Николаїв; тел.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Петриченко Сергей Викторович – кандидат технических наук, заместитель директора по научной работе Института импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев; тел.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

Petrichenko Sergey Viktorovich – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Deputy Director of the Institute of Pulses Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolaiv; tel.: (0512) 58-71-10; e-mail: petrichsergey@gmail.com.

УДК 681.51 : 537.523:661.666.4

**Н. С. НАЗАРОВА, Д. В. ВІННИЧЕНКО, С. С. КОЗИРЕВ, Л. Є. ОВЧИННИКОВА, С. В. ЧУЩАК****УЗАГАЛЬНЕНА МОДЕЛЬ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМ ПРОЦЕСОМ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО СИНТЕЗУ НАНОВУГЛЕЦЮ**

Проведено аналіз технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю як об'єкта керування. Побудовано узагальнену модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу у вигляді графа, у якому технологічні підгрупи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа. Визначено координати векторів стану. Це дає змогу технологічний процес представити фрагментарно, та використовуючи метод декомпозиції, задачу керування розкласти на декілька задач різного рівня, кожна з яких відноситься до певного фрагменту технологічного процесу, незалежна, має свої критерії оптимальності та алгоритми реалізації.

**Ключові слова:** модель керування, координати вектору стану, гілки та вершини графа, метод декомпозиції, технологічний процес, електророзрядний синтез нановуглецю.

Проведен анализ технологического процесса электроразрядного синтеза наноуглерода как объекта управления. Построена обобщенная модель управления технологическим процессом высокочастотного электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов с углеродсодержащего газа в виде графа, в котором технологические подгруппы операций отвечают веткам, а устойчивые состояния – вершинам графа. Определены координаты векторов состояния. Это позволяет технологический процесс представить фрагментарно, и, используя метод декомпозиции, задачу управления разложить на несколько задач различного уровня, каждая из которых относится к определенному фрагменту технологического процесса, независима, имеет свои критерии оптимальности и алгоритмы реализации.

**Ключевые слова:** модель управления, координаты вектора состояния, ветви и вершины графа, метод декомпозиции, технологический процесс, электроразрядный синтез наноуглерода.

The analysis of the process of an electric synthesis of nanocarbon as a control object was done. A generalized model of process control high-frequency electric-discharge synthesis of carbon nanomaterials from the carbon-containing gas in the form of a graph in which the technological operations of the subgroup responsible branches and stable states - vertices of the graph. Determine the coordinates of the state vector. This allows the process to present fragmentary, and using the decomposition method, the control problem broken down into multiple tasks of different levels, each of which relates to a specific fragment of the process is independent, has its own optimization criteria and algorithm implementation. Operator control system provides a higher level of correlation between fragments model, setting conditional transitions from one fragment to another, imposing certain restrictions on incoming and outgoing coordinates. Provides conditions under which the subsystems are functioning in the specified mode according to the base algorithm and initial conditions.

**Keywords:** control model, the coordinates of the state vector, branch and vertices of the graph, decomposition method, process technology, electric-discharge synthesis of nanocarbon.

**Вступ.** Вуглецеві наноматеріали знаходять застосування в багатьох галузях науки, промисловості, техніки та інженерії, що обумовлено великою різноманітністю їх фізико-хімічних, оптичних, механічних і електричних властивостей [1, 2]. Метод високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів (ВНМ) із вуглецевмісних газів, розроблений в ІПТ НАН України, має високі показники продуктивності та високу якість отриманих ВНМ, що задовольняє вимоги до виробництва в промислових масштабах [3, 4]. Для впровадження даного методу в промислове виробництво необхідно забезпечити керованість технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю на всіх його стадіях.

Технологічний процес електророзрядного синтезу нановуглецю відноситься до складних систем, процеси в яких суттєво різняться за швидкостями та параметрами. Координати стану та критерії оптимальності окремих технологічних циклів різні. З метою забезпечення керованості технологічного процесу синтезу, систематизації функцій і задач керування на усіх технологічних стадіях необхідно провести його аналіз як об'єкта керування та побудувати узагальнену модель керування.

**Метою роботи** є побудова узагальненої моделі керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів із вуглецевмісних газів за результатами дослідження функцій і задач керування на усіх технологічних стадіях.

**Матеріали дослідження.** Для побудови моделі керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу нановуглецю обрано теоретико-множинний підхід, коли параметри стану об'єкта керування задаються у вигляді множин або векторів, маркування яких визначає відповідні матриці операторів [5]. Такий підхід дає змогу узагальнити задачі керування різними технологічними циклами процесу синтезу.

На основі аналізу алгоритму роботи високовольтної електророзрядної установки для синтезу нановуглецю [6] виділено наступні складові частини керованого технологічного процесу: допоміжні операції з подачі сировини й збору синтезованого продукту та базові операції, що безпосередньо забезпечують процес синтезу нановуглецю в реакційному об'ємі.

Допоміжні операції забезпечують додаткові умови, необхідні для підготовки до досягнення технологі-

чного результату за допомогою керованого електро-розряду, та включають в себе подачу сировини з підтриманням необхідних параметрів та регулюванням витрат, виведення газоподібних продуктів реакції, фільтрацію твердих продуктів синтезу, збір продуктів синтезу.

На етапі виконання допоміжних технологічних операцій змінними стану об'єкта керування є положення клапанів газової системи, регуляторів керованих редукторів, рівень наповнення відстійника з фільтром та ін. Координатами цих змінних будуть стани датчиків положення, а керуючими впливами – сигнали включення виконавчих механізмів і пристроїв. Для моделі цієї стадії простір станів і простір керувань являють собою дві множини, або дві матриці (матриця стану й матриця керування), елементами яких будуть відповідно стани датчиків положення виконавчих механізмів й команди включення виконавчих механізмів. Завданням системи керування є забезпечення відповідності елементів множин, що задаються циклограмою роботи механізмів і пристроїв та діаграмою стану датчиків.

Базові технологічні операції забезпечують синтез нановуглецю з вуглецевмісного газу, що відбувається в нерівноважній плазмі електричного газового розряду, який формується в міжелектродному проміжку, розташованому в реакторі, заповненому вуглецевмісним газом, за допомогою високовольтного генератора розрядних імпульсів. До задач керування на даному технологічному етапі відноситься забезпечення необхідного режиму роботи високовольтного високочастотного генератора, який генерує розрядні імпульси з заданими параметрами, забезпечення реакційних параметрів вуглецевмісного газу в розрядному реакторі та заданого режиму розряду, забезпечення необхідної величини міжелектродного проміжку, шляхом керування рухом електродної системи.

Узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу може бути представлена у вигляді графа (рис. 1), у якому виділені групи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа.

Стійкі стани (вершини графа) описуються окремими моделями фрагментів технологічного процесу:  $Q_j$  – допоміжні операції;  $Z$  – режими роботи високовольтного високочастотного генератора імпульсів;  $R$  – режими розряду в газовому середовищі реакційного об'єму;  $D$  – траєкторії руху електродної системи.

Відповідно до теоретико-множинного підходу вони утворюють множину станів об'єкта керування, який можна позначити вектором  $M = \{Q, D, Z, R\}$ . Вихідний вектор  $Y_j$  і поточний стан об'єкта  $M_j$  залежать від набору вхідних сигналів або координат вхідного вектора  $X_j$  і попереднього стану об'єкта  $M_{j-1}$ . Перехід від одного стійкого стану до іншого визначають умовні переходи –  $X_j/Y_j$ .

Для відбиття узагальною моделлю процесів, що відбуваються в генераторі імпульсів, відображення режимів розряду в газонаповненому реакційному об'ємі та руху електродної системи до графа введені

спеціальні умовні переходи, що підключають модель керування режимом роботи генератора  $Z$ , режимом розряду  $R$  і рухом електродної системи  $D$ .

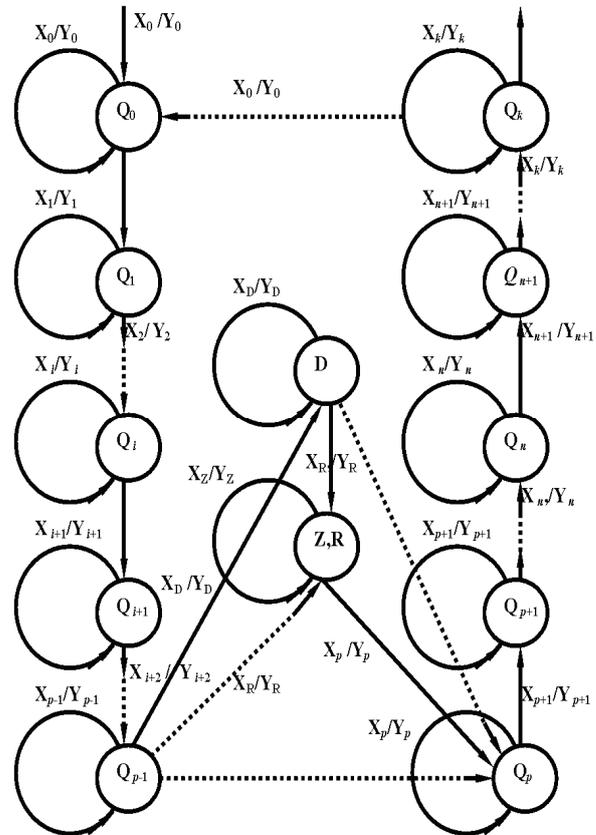


Рисунок 1 – Узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів

Зв'язок між координатами вхідного й вихідного векторів  $X, Y$  у загальному вигляді описується наступним виразом:

$$Y = A X,$$

де  $Y = \{Y_Q, Y_D, Y_Z, Y_R\}$ ;  $X = \{X_Q, X_D, X_Z, X_R\}$ ;  $Y_Q, Y_D, Y_Z, Y_R$ ;  $X_Q, X_D, X_Z, X_R$  – координати вихідного  $Y$  та вхідного  $X$  векторів;  $A$  – оператор, що реалізується системою керування вищого рівня та забезпечує взаємозв'язок між фрагментами моделі, задаючи умовні переходи від одного фрагменту до іншого, накладаючи певні обмеження на вхідні та вихідні координати. Забезпечує умови, при яких підсистеми функціонують в заданих режимах відповідно до бази алгоритмів та початкових умов.

Для ефективного розв'язання завдань керування вищого рівня необхідно синтезувати локальні алгоритми керування нижніх рівнів. Кожен етап технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю має свої критерії оптимальності, реалізується в умовах дії зовнішніх впливів та невизначеностей, має змінні параметри, тому вимагає розробки адаптивних підсистем керування.

Набір допоміжних операцій залежить від конструкції технологічного обладнання, від типу газової системи та її елементів. Саме набір допоміжних операцій та стан їх виконання зумовлює кількість стійких

станів (вершини графа  $Q_j$ ) та умовних переходів  $X_j/Y_j$  і відповідно – розмір матриць стану й керування даного фрагменту узагальненої моделі. Алгоритм підсистеми керування допоміжними операціями повинен забезпечувати відповідність елементів множини станів виконавчих механізмів, що задається циклограмою роботи, та множини станів датчиків, заданих у вигляді діаграми положення датчиків.

Підсистеми керування базовими операціями, що забезпечують процес синтезу нановуглецю в реакційному об'ємі, визначаються моделями керування режимом роботи генератора (вершина графа  $Z$ ), режимом розряду (вершина графа  $R$ ) і рухом електродної системи (вершина графа  $D$ ). Вершини графа  $Z$  і  $R$  взаємопов'язані, оскільки режим роботи генератора безпосередньо впливає на режим розряду.

В якості координат вектору стану  $Z$ , що відображає роботу генератора імпульсів, керуючись попередніми дослідженнями [7, 8], можна прийняти наступні параметри:  $U_{вих}$  – вихідна напруга;  $W$  – енергія накопичувача,  $p$  – вихідна потужність;  $L$  – індуктивність розрядного контуру,  $f$  – частота проходження імпульсів;  $u$  – поточна напруга (миттєве значення);  $k_u$  – коефіцієнт форми імпульсів напруги.

Координатами вектору стану  $R$ , що визначає режим розряду в реакційному об'ємі та забезпечує технологічний результат синтезу ВНМ, керуючись дослідженнями електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вуглеводнів [8, 9], можна вважати наступні параметри:  $U_p$  – напруга пробою;  $U_r$  – робоча напруга синтезу;  $I_{max}$  – максимальне значення струму;  $i$  – поточне значення струму;  $k_i$  – коефіцієнт форми імпульсів струму;  $T$ ,  $P$  – температура та тиск в реакційному об'ємі. Залежність коефіцієнтів форми імпульсів від довжини міжелектродного проміжку досліджено в [9]. Для отримання залежностей між технологічними параметрами процесу синтезу ВНМ і електричними характеристиками розряду можна використовувати зручні для аналізу функціонали, описані в [9], які є засобами формального опису форми вольт-амперних характеристик, що мають складну форму та залежать від співвідношення довжини каналу розряду і потужністю в ньому.

Алгоритм руху електродної системи відображає вектор стану  $D$ , за координати якого можна прийняти  $l$  – величину міжелектродного проміжку, від якої залежить режим розряду;  $i_c$  – середньоквадратичне значення розрядного струму, яке може слугувати інформаційною координатою; просторові координати руху електрода.

Побудована узагальнена модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу показала, що синтез адаптивних підсистем керування окремими фрагментами технологічного процесу, можна вести незалежно, використовуючи метод декомпозиції.

**Висновки.** Проведено аналіз технологічного процесу електророзрядного синтезу нановуглецю як об'єкта керування, за результатами якого його віднесено до складних систем, дослідження яких доцільно

проводити методом декомпозиції. Встановлено, що процеси в окремих технологічних циклах синтезу суттєво різняться за швидкостями та параметрами, мають різні координати стану та критерії оптимальності.

Побудовано узагальнену модель керування технологічним процесом високочастотного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів з вуглецевмісного газу у вигляді графа, у якому виділені технологічні підгрупи операцій відповідають гілкам, а стійкі стани – вершинам графа.

Множину станів об'єкта керування позначено вектором  $M = \{Q, D, Z, R\}$ . Визначено координати векторів стану окремих технологічних циклів:  $Q_j$  – допоміжні операції;  $Z$  – режими роботи високовольтного генератора імпульсів;  $R$  – режими розряду в газовому середовищі реакційного об'єму;  $D$  – траєкторії руху електродної системи.

Узагальнена модель керування технологічним процесом електророзрядного синтезу нановуглецю у вигляді графа дає змогу технологічний процес представити фрагментарно, та використовуючи метод декомпозиції, задачу керування розкласти на декілька задач різного рівня, кожна з яких відноситься до певного фрагменту, незалежна, має свої критерії оптимальності та алгоритми реалізації.

#### Список літератури

1. *Guang Feng Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid Onion-Like Carbon Interfaces / Guang Feng, De-en Jiang, Peter T. Cummings // J. Chem. Theory Comput.* – 2012. – 8 (3). – P. 1058–1063.
2. *Song Li Cummings Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode / Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick C. Hillesheim, Chen Liao, Sheng Dai, Peter T. // The Journal of Physical Chemistry Letters.* – 2012. – 3 (17). – P. 2465–2469.
3. Пат. 95543 Україна МПК C01B 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Спосіб одержання вуглецевих наноматеріалів (варіанти) / Л.З. Богуславський, Д.В. Вінниченко, Н.С. Назарова (Україна); заявник і патентостворитель ІППТ НАН України. – № а 2010 01186; заявл. 05.02.2010; Опубл. 10.08.2011 р., Бюл. № 15. – 9 с.
4. *Богуславський, Л. З. Физические процессы синтеза аморфного наноглерида высокочастотным электроразрядным методом из газообразных углеводородов / Л. З. Богуславський, Д. В. Винниченко, Н. С. Назарова, Л. Е. Овчинникова // Вісник НТУ «ХПІ».* – 2012. – № 52 (958). – С. 25–30.
5. Основы автоматического управления / Под ред. В. С. Пугачева. – М.: Наука, 1974. – 720 с.
6. *Богуславський Л. З. Високовольтна установка для синтезу нановуглецю з onion-like структурою з системою керування електричними характеристиками газового розряду / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова // Вісник НТУ «ХПІ».* – 2015. – № 20 (1129). – С. 11–23.
7. *Щерба А. А. Стабілізація та регулювання режимних параметрів високовольтної електророзрядної системи для електроімпульсного синтезу нановуглецю / А. А. Щерба, Д. В. Вінниченко // Вісник НТУ «ХПІ».* – 2014. – № 21 (1064). – С. 141–151.
8. *Вінниченко Д. В. Визначення оптимальних характеристик високовольтної електророзрядної системи для реалізації технології електроімпульсного синтезу нановуглецю / Д. В. Вінниченко // Технічна електродинаміка.* – 2014. – № 4. – С. 129–131.

9. Богуславський Л. З. Дослідження електрофізичних характеристик високовольтної обробки газоподібних вугледодів для отримання вуглецевих наноматеріалів / Л. З. Богуславський, Д. В. Вінниченко, Н. С. Назарова, Ю. О. Адамчук, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 14 (1186). – С. 15–20.

#### Bibliography (transliterated)

1. Guang Feng, De-en Jiang, Peter T. Cummings Curvature Effect on the Capacitance of Electric Double Layers at Ionic Liquid Onion-Like Carbon Interfaces. *J. Chem. Theory Comput.*, 2012, 8 (3), pp. 1058–1063.

2. Song Li, Guang Feng, Pasquale F. Fulvio, Patrick C. Hillesheim, Chen Liao, Sheng Dai, Peter T. Cummings Molecular Dynamics Simulation Study of the Capacitive Performance of a Binary Mixture of Ionic Liquids near an Onion-like Carbon Electrode. *The Journal of Physical Chemistry Letters*, 2012, 3 (17), pp. 2465–2469.

3. Pat. 95543 Ukrayina MPK C01V 31/02 (2006.01), H05H 1/24 (2006.01), H05H 1/32 (2006.01). Sposib odezhanannya vugletsevykh nanomaterialiv (varianti). L. Z. Boguslavskiy, D. V. Vinnichenko, N. S. Nazarova; zayavnik i patentovlasnik IPT NAN Ukraini. No a 2010 01186; zayavl. 05.02.2010; Opubl. 10.08.2011 r., Byul. No 15. 9 p.

4. Boguslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S.,

Ovchinnikova L. E. Fizicheskie protsessy sinteza amorfnoho nanougleroda vyisokochastotnym elektrorazryadnym metodom iz gazoobraznykh uglevodorodov. *Visnik NTU «HPI»*, 2012, No. 52 (958), pp. 25–30.

5. Osnovy avtomaticheskogo upravleniya. Pod red. V. S. Pugacheva. Moscow: Nauka, 1974, 720 p.

6. Bohuslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S. Vysokovoltna ustanovka dlia syntezy nanovuhletsiu z onion-like strukturoiu z systemoiu keruvannya elektrychnymy kharakterystykamy hazovoho rozriadu. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2015, No 20 (1129), pp. 11–23.

7. Shcherba A. A., Vinnichenko D. V. Stabilizatsiya ta rehulyuvannya rezhymnykh parametriv vysokovoltnoyi elektro-rozryadnoyi systemy dlia elektroimpul'snoho syntezy nanovuhletsyu. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2014, No 21 (1064), pp. 141–151.

8. Vinnichenko D. V. Vyznachennia optymalnykh kharakterystyk vysokovoltnoi elektrorozryadnoi systemy dlia realizatsii tekhnolohii elektroimpul'snoho syntezy nanovuhletsiu. *Tekhnichna elektrodynamika*, 2014, No 4, pp. 129–131.

9. Boguslavskiy L. Z., Vinnichenko D. V., Nazarova N. S., Adamchuk J. O., Chuschak S. V. Doslidzhennia elektrofizychnykh kharakterystyk vysokovoltnoi obrobky hazopodibnykh vuhlevodniv dlia otrymannia vuhletsevykh nanomaterialiv. *Visnyk NTU «KhPI»*, 2016, 14 (1186), pp. 15–20.

*Hadziuvna (received) 02.11.2016*

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

Узагальнена модель керування технологічним процесом електророзрядного синтезу нановуглецю / Н. С. Назарова, Д. В. Вінниченко, С. С. Козирев, Л. Є. Овчиннікова, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Обобщенная модель управления технологическим процессом электроразрядного синтеза наноуглерода / Н. С. Назарова, Д. В. Винниченко, С. С. Козырев, Л. Е. Овчинникова, С. В. Чушак // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Бібліогр.: 9 назв. – ISSN 2079-0740.

Generalized model of control process of an electric-discharge synthesis of nanocarbon / N. S. Nazarova, D. V. Vinnichenko, S. S. Kozirev, L. Y. Ovchinnikova, S. V. Chushchak // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 66–69. – Bibliogr.: 9. – ISSN 2079-0740.

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

**Назарова Наталя Станіславівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

**Назарова Наталя Станіславівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІІПТ) НАН України, г. Николаев.

**Nazarova Natalia Stanislavivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv.

**Вінниченко Дмитро Валерійович** – молодший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

**Вінниченко Дмитрій Валерьевич** – младший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

**Vinnichenko Dmitro Valerijovich** – Junior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv, e-mail: vdvvvs@inbox.ru.

**Козирев Сергій Сергійович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв, e-mail: skozurev@gmail.com.

**Козырев Сергей Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный университет кораблестроения, г. Николаев, e-mail: skozurev@gmail.com.

**Kozurev Serhiy Serhiyovych** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, National University of Shipbuilding, e-mail: skozurev@gmail.com.

**Овчиннікова Лариса Єфремівна** – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв, e-mail: lora947@gmail.com.

**Овчинникова Лариса Ефремовна** – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев, e-mail: lora947@gmail.com.

**Ovchinnikova larysa Yefremivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Associate Professor, Senior Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv, e-mail: lora947@gmail.com.

**Чушак Сергій Володимирович** – інженер, Інститут імпульсних процесів і технологій (ІПТ) НАН України, м. Миколаїв.

**Чушак Сергей Владимирович** – инженер, Институт импульсных процессов и технологий (ИИПТ) НАН Украины, г. Николаев.

**Chushchak Serhiy Volodymyrovych** – Engineer, Institute of Pulse Processes and Technologies (IPPT) NAS of Ukraine, Mykolayiv.

УДК 621.317.39.084.2

**В.В. РУДАКОВ, А.А. КОРОБКО****ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ И БАРОМЕТРИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЗОНАНСНОГО МЕТОДА ДИЭЛЬКОМЕТРИИ ЭМУЛЬСИИ ТИПА ВОДА – НЕПОЛЯРНЫЙ ДИЭЛЕКТРИК**

У статті розглянуті наступні фактори, які впливають на систематичну похибку вимірювання вмісту вологи емульсії діелькометричним методом в резонансному режимі: відносний температурний коефіцієнт діелектричної проникності трансформаторного масла; залежність величини об'ємного вмісту вологи від температури емульсії; зміна геометричних розмірів і, відповідно, зміна величини ємності вимірювального перетворювача від температури; вплив барометричного тиску повітря на діелектричну проникність; вплив вмісту розчиненого повітря в емульсії. Проведено аналіз та розрахунки для чисельного визначення величини істотних факторів, які суттєво впливають на систематичну похибку при вимірюванні вмісту вологи. Дано рекомендації для зменшення впливу несуттєвих факторів.

**Ключові слова:** систематична похибка, діелектрична проникність, температурний коефіцієнт, лінійний коефіцієнт температурного розширення, барометричний тиск, повітря, трансформаторне масло.

В статье рассмотрены следующие факторы, влияющие на систематическую погрешность измерения влагосодержания эмульсии диэлектрическим методом в резонансном режиме: относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости трансформаторного масла; зависимость величины объемного влагосодержания от температуры эмульсии; изменение геометрических размеров и, соответственно, изменение величины емкости измерительного преобразователя от температуры; влияние барометрического давления воздуха на диэлектрическую проницаемость; влияние содержания растворенного воздуха в эмульсии. Проведен анализ и расчеты для численного определения величины существенных факторов, оказывающих значительное влияние на систематическую погрешность при измерении влагосодержания. Даны рекомендации для уменьшения влияния несущественных факторов.

**Ключевые слова:** систематическая погрешность, диэлектрическая проницаемость, температурный коэффициент, линейный коэффициент температурного расширения, барометрическое давление, воздух, трансформаторное масло.

The article discusses the following factors affecting the systematic error moisture content measurement: the relative temperature coefficient of dielectric permittivity of transformer oil, the dependence of the volumetric water content of the emulsion temperature, changing the geometric dimensions and accordingly the change in the capacitance of the transmitter on the temperature, the effect of barometric pressure on the dielectric constant, the effect of air dissolution process in emulsion. It was determined that significant impacts on the systematic errors are: relative temperature coefficient of dielectric permittivity of transformer oil, the dependence of the volumetric water content of the emulsion temperature. The systematic errors introduced by the barometric pressure are less than the desired technical precision determination of moisture content. To reduce the influence of dissolved air an evacuation of transformer oil and emulsions is offered.

**Keywords:** bias, dielectric constant and temperature coefficient of linear thermal expansion coefficient, barometric pressure, air and transformer oil.

**Введение.** Как указано ранее [1,2], реализация резонансного метода диэлектрической емкостной элементом которого является заполненный исследуемой эмульсией измерительный преобразователь (ИП). При этом диэлектрическая проницаемость и, как следствие, влагосодержание в смеси определяется частотой генерации измерительного генератора (ИГ). Следовательно, изменение диэлектрической проницаемости эмульсии, изменение линейных размеров измерительного преобразователя и изменение объемного влагосодержания, обусловленное влиянием температуры, барометрического давления воздуха и растворенного воздуха в исследуемой жидкости, в момент измерения подлежит учету.

**Цель работы.** Численное определение и учет влияния на точность измерения влагосодержания различных как температурных факторов (температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, зависимость величины объемного влагосодержания от

температуры, линейный коэффициент температурного расширения материалов), а также нетемпературных факторов, обусловленных влиянием барометрического давления воздуха и количеством растворенного воздуха в неполярном диэлектрике на примере трансформаторного масла.

**Жидкостные температурные коэффициенты.** Теоретически относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости жидкости равный

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{d\epsilon_r}{dT}$$

можно определить, воспользовавшись уравнением Клаузиуса-Моссотти через величины относительной диэлектрической проницаемости  $\epsilon_r$  и коэффициента объемного расширения  $\beta$  в следующем виде [3,4]:

$$\alpha_{\epsilon} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \frac{d\epsilon_r}{dT} = -\beta \frac{(\epsilon_r - 1)(\epsilon_r + 2)}{3\epsilon_r}$$

Например, для трансформаторного масла ( $\epsilon_r \approx 2,3$ ,  $\beta_m = 7,0 \cdot 10^{-4}$ ) [3] теоретически рассчитанная

величина  $\alpha_\varepsilon = -3,9 \cdot 10^{-4} \frac{1}{^\circ\text{C}}$ .

Данное теоретическое значение  $\alpha_\varepsilon$  близко к величинам  $\alpha_\varepsilon$ , рассчитанным для трансформаторного масла (типичного неполярного диэлектрика), произведенного из различного исходного сырья по данным [5], которые приведены в табл. 1. Поэтому для оценочных расчетов можно использовать практически полученные характеристики трансформаторных масел.

Таблица 1 – Влияние исходного сырья на электрические характеристики трансформаторных масел

Нефть	tg $\delta$ , $10^{-2}$ при		$\varepsilon_r$ при		$\rho$ при $20^\circ\text{C}$	Отн. темп. коэф. $\varepsilon_r$ , $10^{-4}/^\circ\text{C}$
	$20^\circ\text{C}$	$70^\circ\text{C}$	$20^\circ\text{C}$	$70^\circ\text{C}$		
Сураханская отборная	0,11	1,0	2,18	2,13	0,867	4,64
Балаханская масляная	0,07	0,8	2,21	2,15	0,879	5,41
Смесь балаханской масляной и романинской	0,08	0,7	2,22	2,16	0,885	5,38
Бузовнинская	0,08	0,8	2,23	2,17	0,887	5,36
Бибиэйбатская легкая	0,09	0,85	2,25	2,18	0,893	6,32
Сиазанская	0,10	0,9	2,28	2,22	0,931	5,33

Вторым температурным фактором, который влияет на точность определения влагосодержания, является зависимость самой величины объемного влагосодержания от температуры  $W(T^\circ)$ . Эта зависимость обусловлена тем фактором, что по определению величина объемного влагосодержания равна отношению объемов эмульгированной воды к объему всей эмульсии, а вода и эмульсия имеют разные коэффициенты объемного расширения ( $\beta_v$  и  $\beta_\omega$  соответственно).

При этом объемы воды  $V_v$  и эмульсии  $V_\omega$ , в функции температуры изменяются по разному из-за различия коэффициентов объемного расширения воды  $\beta_v$  и масла  $\beta_m$ :

$$W(T^\circ) = \frac{V_v(T^\circ)}{V_\omega(T^\circ)} = \frac{V_v(T^\circ)}{V_m(T^\circ) + V_v(T^\circ)},$$

где  $V_m$  – объем чистого масла.

При  $V_v \ll V_m$

$$W(T^\circ) \approx \frac{V_v(T^\circ)}{V_m(T^\circ)} = \frac{V_v(1 + \beta_v \Delta T^\circ)}{V_m(1 + \beta_m \Delta T^\circ)}.$$

Если принять величину  $V_v/V_m$  за начальное влагосодержание эмульсии, то величина  $(1 + \beta_v \Delta T^\circ)/(1 + \beta_m \Delta T^\circ)$  определяет во сколько раз изменится влагосодержание эмульсии при изменении температуры на величину  $\Delta T^\circ$ .

Расчеты показывают, что при  $\beta_v \approx 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$  (при  $20^\circ\text{C}$ ) и при усредненной величине  $\beta_m \approx 5 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$  изменение влагосодержания  $(1 + \beta_v \Delta T^\circ)/(1 + \beta_m \Delta T^\circ)$  составляет величину 0,9996 при  $\Delta T^\circ = 1^\circ\text{C}$  и величину 0,996 при  $\Delta T^\circ = 10^\circ\text{C}$ .

То есть физическое изменение влагосодержания

эмульсии, обусловленное разными величинами коэффициентов объемного расширения воды и масла составляет величины  $4 \cdot 10^{-4}$  и  $4 \cdot 10^{-3}$  для изменений температуры на  $1^\circ\text{C}$  и  $10^\circ\text{C}$ , соответственно.

**Коэффициент линейного расширения.** Следующим температурным фактором, который определяет точность измерения влагосодержания является изменение геометрических размеров ИП и, как следствие, изменение величины емкости ИП под действием температуры.

Для ИП, исследуемых в данной работе и используемых в качестве основного материала электродов нержавеющей сталь и латунь, величины коэффициентов линейного расширения  $\alpha_l$  соответственно составляют  $17,3 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  и  $18,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$  [6].

Если предположить, что рабочая емкость ИП прямо пропорциональна  $\varepsilon_r$  и длине  $l$  ИП (которая измеряется при воздействии температуры), то суммарный температурный коэффициент изменения емкости  $\alpha_c$  будет определяться как  $\alpha_c = \alpha_\varepsilon + \alpha$ .

Зависимость относительной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r(T^\circ)$  от температуры  $T^\circ$  можно представить в следующем виде:

$$\varepsilon_r(T^\circ) = \varepsilon_r(1 + \alpha_c \cdot \Delta T^\circ).$$

Принимая во внимание, что частота генерации ИГ  $F_{ИГ}$  обратно пропорциональна  $\sqrt{\varepsilon_r}$ , частоту генерации ИГ в функции изменения температуры можно представить в следующем виде:

$$F_{ИГ}(T^\circ) = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r(1 + \alpha_c \cdot \Delta T^\circ)}};$$

где  $C$  – константа ИГ.

Так как  $\alpha_c \Delta T^\circ \ll 1$ , то  $F_{ИГ}(T^\circ)$  можно преобразовать к следующему виду:

$$F_{ИГ}(T^\circ) = F_{ИГ0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \alpha_c \Delta T^\circ}} \approx F_{ИГ0} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}},$$

где  $F_{ИГ0} = \frac{C}{\sqrt{\varepsilon_r}}$  – частота генерации ИГ при начальной

температуре;  $\frac{1}{1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}}$  – относительное измерение

частоты ИГ при изменении температуры эмульсии и ИП на величину  $\Delta T^\circ = 1^\circ\text{C}$ .

При  $\alpha_l = 18,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$ ;  $\alpha_\varepsilon = -4 \cdot 10^{-4} 1/^\circ\text{C}$  относительное изменение частоты  $\left(1 + \frac{\alpha_c \Delta T^\circ}{2}\right)^{-1}$  составляет величину 1,00019, а абсолютный уход частоты  $\Delta F_{ИГТ}$  равен  $19,0 \cdot 10^{-5} F_{ИГ0}$ .

В [1] для нулевых значений «слепой» емкости ИП и емкости ИГ было получено следующее выражение для величины влагосодержания  $W$ :

$$W = \frac{2(F_{ИГМ} - F_{ИГСМ})}{3F_{ИГСМ}},$$

где  $F_{ИГМ}$  и  $F_{ИГСМ}$  – частоты генерации ИГ при заполнении его маслом и эмульсией.

Используя данное выражение, можно определить какую погрешность определения влагосодержания  $\Delta W$  привносит изменение температуры на  $1^\circ\text{C}$ , приравняв

$$1 - \frac{1}{1 + \frac{\alpha_\epsilon \Delta T^\circ}{2}} \cong \frac{F_{ИГМ} - F_{ИГСМ}}{F_{ИГСМ}}$$

При этом  $\Delta W = \frac{2}{3} \cdot 19 \cdot 10^{-5} = 1,26 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$   
( $1,26 \cdot 10^{-2}\%$  объемного содержания воды).

**Барометрическое давление.** Барометрическое давление воздуха влияет на диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_r$  из-за эффекта сжимаемости масла и воды и определяет процесс диффузии (растворения) воздуха в исследуемой эмульсии.

Так как масло и вода являются практически несжимаемыми жидкостями (например, для воды коэффициент адиабатической сжимаемости при  $20^\circ\text{C}$  имеет величину  $4,55 \cdot 10^{-12} \text{ м}^2/\text{Н}$  [4]), то данным эффектом можно пренебречь, так как при измерении атмосферного давления на величину  $10^4 \text{ Н/м}^2$  относительное изменение объема воды и соответственно диэлектрической проницаемости составит величину около  $4,55 \cdot 10^{-8}$ . Данная систематическая погрешность существенно меньше требуемой технической точности определения влагосодержания  $\pm 5\%$ .

**Растворенный воздух.** Совершенно по иному на систематическую погрешность оказывает влияние процесс растворения воздуха в эмульсии. На рис.1 представлена зависимость объемного содержания воздуха в трансформаторном масле от атмосферного давления [7, 8].

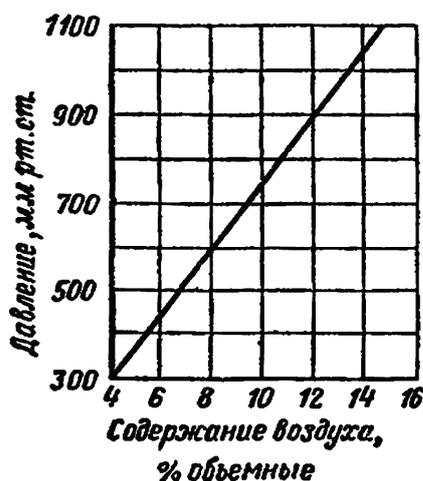


Рисунок 1 – Растворимость воздуха в трансформаторном масле при различных атмосферных давлениях.

Так  $10\%$  объемного содержания воздуха при атмосферном давлении соответствует изменению массы одного кубического метра трансформаторного масла на величину  $0,129 \text{ кг}$  [5]. Учитывая, что плотность чистого трансформаторного масла составляет около  $0,87 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ , то относительное изменение плотности трансформаторного масла, обусловленное влиянием

растворенного воздуха, может составить максимальную величину

$$1 - \frac{0,87 \cdot 10^3 - 0,129}{0,87 \cdot 10^3} = 1,48 \cdot 10^{-4}$$

Такое относительное изменение плотности вызывает соответствующее изменение  $\epsilon_r$ , соизмеримое с влиянием температуры, что требует учета фактора насыщения исследуемой эмульсии воздухом.

**Выводы.** Анализ полученных численных результатов влияния температурных (относительный температурный коэффициент диэлектрической проницаемости, зависимость величины объемного влагосодержания от температуры и изменение геометрических размеров измерительного преобразователя под действием температуры) и нетемпературных факторов (барометрическое давление воздуха и влияние растворенного воздуха) позволяет сделать следующие выводы.

1. Изменение температуры даже на  $10^\circ\text{C}$  приводит к систематической ошибке измерений влагосодержания обусловленной разными величинами коэффициентов объемного расширения воды и масла на  $0,6\%$ , что существенно меньше требуемой точности технических измерений влагосодержания.

2. Изменение температуры на  $1^\circ\text{C}$  вызывает систематическую погрешность определения влагосодержания, обусловленную остальными температурными факторами равную по величине  $1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$  ( $1,26 \cdot 10^{-2}\%$  объемного содержания воды).

3. Для обеспечения достоверности измерения влагосодержания данным методом в диапазоне до  $1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{м}^3$  ( $1 \cdot 10^{-2}\%$  объемного содержания воды) необходимо в процессе проведения измерений обеспечивать одинаковую температуру масла и эмульсии с точностью не хуже  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ . При этом величина систематической погрешности измерения влагосодержания, обусловленной влиянием температуры, не превышает величины  $\pm 5\%$ .

4. Систематическая погрешность измерения влагосодержания, обусловленная влиянием барометрического давления существенно меньше требуемой технической точности определения влагосодержания  $\pm 5\%$ .

5. Влияние растворенного воздуха вносит существенную погрешность соизмеримую с величиной систематической погрешности вносимой температурой. Для ее уменьшения целесообразно производить предварительное вакуумирование масла и исследуемой эмульсии до заливки их в ИП, а также обеспечить минимизацию времени их контакта с воздухом.

#### Список литературы

1. Рудаков В. В. Повышение чувствительности измерений содержания влаги в трансформаторном масле диэлектрическим методом в резонансном режиме / В. В. Рудаков, А.А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 50 (1092). – С. 143-149.
2. Рудаков В. В. Высокочувствительный СВЧ измеритель влагосодержания в неполярных диэлектрических жидкостях на основе ступенчатого неоднородного коаксиального резонатора / В. В. Рудаков, А.А. Коробко // Електротехніка і електромеханіка. – 2016. – № 5. – С. 51-56. – doi:20998/2-74-

272X.2016.5.08

3. Интернет: [http://studopedia.ru/6\\_124926\\_temperatur-niy-koeffitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html](http://studopedia.ru/6_124926_temperatur-niy-koeffitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html)

4. *Липштейн Р. А.* Трансформаторное масло. – 3-е изд., перераб. и доп. / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович & – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

5. Интернет: <http://forca.ru/knigi/arhiv/obrabotka-transformatornogo-masla-3/html>

6. Интернет: <http://leg.co.ua/transformatori/teoriya/otno-sitelnaya-dielektricheskaya-pronitsatmost-transformatornyh-masel.html>

7. Физическая энциклопедия / Гл. ред. А. М. Прохоров. Ред. Кол. Д. М. Алексеев, А. М. Балдин, А. М. Бонч-Бруевич, А. С. Боровик-Романов и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. – 704 с.

8. Интернет: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials>.

### References (transliterated)

1. Rudakov V. V. Korobko A.A. Increasing the sensitivity of the moisture content measurements in transformer oil dielectric method in resonant mode. *Visnyk NTU «KhPI»*. Bulletin of NTU «KhPI», 2014, no. 50 (1092), pp. 143-149. (Rus).

2. Rudakov V. V. Korobko A.A. Vvisokochuvstvitelnyiy SVCh izmeritel vlagosoderzhaniya v nepolyarnyih daelektricheskikh zhidkostyah na osnove stupenchatogo neodnorodnogo koaksialnogo rezonatora. *Elektrotehnika i elektromehnika*, 2016, no.5, pp. 51-56. (rus). doi:20998/2-74-272X.2016.5.08

3. Интернет: [http://studopedia.ru/6\\_124926\\_temperatur-niy-koeffitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html](http://studopedia.ru/6_124926_temperatur-niy-koeffitsient-dielektricheskoy-pronitsaemosti.html)

4. Lipshteyn R. A., Shahnovich M. I. Transformatornoe maslo. 3 izd., pererab. i dop. Moscow: Energoatomizdat, 1983. 296 p.

5. Интернет: <http://forca.ru/knigi/arhiv/obrabotka-transformatornogo-masla-3/html>

6. Интернет: <http://leg.co.ua/transformatori/teoriya/otno-sitelnaya-dielektricheskaya-pronitsatmost-transformatornyh-masel.html>

7. Fizicheskaya entsiklopediya / Gl. red. A. M. Prohorov. Red. Kol. D. M. Alekseev, A. M. Baldin, A. M. Bonch-Bruevich, A. S. Borovik-Romanov i dr. Moscow: Sov. Entsiklopediya, 1988, 704 p.

8. Интернет: <http://tehtab.ru/Guide/GuidePhysics/GuidePhysicsHeatAndTemperature/HeatexpansionCoefficient/linearExtensionManyMaterials>.

Поступила (received) 24.10.2016

### Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Вплив температури і барометричного тиску на метрологічні характеристики резонансного методу діелькометрії емульсії типу вода - неполярний діелектрик / В. В. Рудаков, О. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Влияние температуры и барометрического давления на метрологические характеристики резонансного метода диелькометрии эмульсионного типа вода – неполярный диелектрик/ В. В. Рудаков, А. А. Коробко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Effect of temperature and barometric pressure in the metrological characteristics of the resonance method dielkometrii water emulsion type - non-polar dielectric / V. V. Rudakov, A. A. Korobko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 70-73. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.**

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

**Рудаков Валерій Васильович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інженерної електрофізики, Національний технічний університет «ХПІ».

**Рудаков Валерий Васильевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Инженерной электрофизики Национального технического университета «ХПИ».

**Rudakov Valery Vasilievich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of Engineering Electrophysics National Technical University "KhPI".

**Коробко Олександр Анатолійович** – аспірант кафедри Інженерної електрофізики, Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

**Коробко Александр Анатольевич** – аспірант кафедри Инженерной электрофизики, Национальный технический университет «ХПИ», тел.: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com

**Korobko Aleksandr Anatolevych** – Graduate Student of the Department of Engineering Electrophysics, National Technical University "KhPI", phone: (093) 650-80-88; e-mail: andarleks@gmail.com.

УДК 004.825

**Б.Н. СУДАКОВ, М.В. ИВАНОВА, А.С. БЛАЖЕЙ****ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКСПЕРТНОЙ СИСТЕМЫ**

Наведено структуру експертної системи (ЕС), показано місце лінгвістичного забезпечення в складі системи і описано роботу всіх підсистем. Розглянуто підхід до розробки лінгвістичного забезпечення, який дозволяє здійснювати вибір необхідних мов в системі, математично точно описати мову взаємодії і адекватно відобразити формально-логічні основи моделей знань про предметну область. Запропоновано структуру знань, які використовуються в процесі комунікативної взаємодії користувачів і ЕС. Розроблено методику створення лінгвістичного забезпечення ЕС.

**Ключові слова:** експертна система, лінгвістичне забезпечення, знання про предметну область.

Приведена структура экспертной системы (ЭС), показано место лингвистического обеспечения в составе системы и описана работа всех подсистем. Рассмотрен подход к разработке лингвистического обеспечения, позволяющий осуществить выбор необходимых языков в системе, математически точно описать язык взаимодействия и адекватно отобразить формально-логические основы моделей знаний о предметной области. Предложена структура знаний, которые используются в процессе коммуникативного взаимодействия пользователей и ЭС. Разработана методика создания лингвистического обеспечения ЭС.

**Ключевые слова:** экспертная система, лингвистическое обеспечение, знания о предметной области.

The structure of the expert system (ES) is given, the place of the linguistic support in the system is shown, and the operation of all subsystems described. An approach to developing linguistic software allows to carry out the desired language in the system mathematically describe precisely the interaction of language and adequately display the formal-logical foundations of models of domain knowledge is considered. The structure of knowledge, which are used in the process of communicative interaction between users and ES is proposed. The technique of creating linguistic support is developed.

**Key words:** expert system, linguistic support, knowledge of the subject area.

**Анализ литературы и постановка проблемы.**

Експертна система – інтелектуальна система, призначена для рішення задач в певній предметній області на основі знань, наданих експертами, що містить базу знань і підтримує функцію обґрунтування, пояснення і оправдання [1]. В даний час ЕС використовуються як консультанти (консультанти) для посилення і розширення професійних можливостей користувачів в вузькій предметній області.

ЕС, являясь специфическим программным продуктом, нашли широкое применение при решении многих частных задач в различных сферах управления. Можно сделать следующие три основных вывода из накопленного к настоящему времени опыта применения ЭС.

1. Эффективность ЭС при решении задач в первую очередь определяется составом знаний, которыми она обладает, и только во вторую очередь - используемыми ею процедурами логической обработки знаний. Поэтому инструмент для создания ЭС должен предоставлять разработчикам возможность приобретать знания [2].

2. Знания, закладываемые в ЭС, отражают субъективное восприятие предметной области экспертом-человеком и являются в основном эвристическими, неполными и противоречивыми. Следовательно, ЭС должна обладать способностью эффективно использовать экспертные знания.

3. В силу специфики решаемых задач и методов их решения обеспечить доверие к полученным результатам (и, следовательно, добиться реального применения ЭС на практике) можно только путем разъяснения

пользователям в доступной форме причин, на основании которых получены данные результаты.

Говоря другими словами ЭС должна обладать способностью объяснять свои действия, отвечая на вопросы пользователя [3].

Отмеченные обстоятельства предопределяют общую архитектуру построения ЭС (рис. 1). Рассмотрим основные подсистемы ЭС.

Подсистема общения предназначена для обеспечения диалогового взаимодействия пользователей с системой на языке профессиональной лексики. Это достигается, например, средствами разработки сценариев диалога и организацией связи между сценариями и областью информационных запросов или более сложными способами [4]. В подсистеме общения производятся как трансляция предложений естественного языка (или другого проблемно-ориентированного языка не процедурного типа) на внутренний язык представления знаний (ЯПЗ) в данной ЭС, так и обратные преобразования.

Описание задачи (запроса) пользователя на выбранном ЯПЗ поступает в подсистему логического вывода (ПЛВ), которая, используя формализованные знания и данные, генерирует рекомендации по решению искомой задачи. Основу базы знаний ЭС составляют правила. В ПЛВ реализуется некоторая стратегия выбора актуальных правил, тесно связанная с методом представления знаний в ЭС и характером решаемых задач.

Подсистема объяснения обеспечивает формирование ответов на запросы пользователей о том, почему и как получен тот или иной результат решения. Все объяснения даются (подсистемой общения) на языке

профессионального общения. Поэтому основу подсистемы объяснения составляют процедуры интерпретации известных ЭС данных (фактов) и использованных

(в процессе логического вывода решения) правил на внутренний ЯПЗ.



Рисунок 1 – Структурная схема ЭС

Функция подсистемы приобретения знания состоит в программной поддержке процесса извлечения знаний о предметной области (ПО) [5-7]. Как правило, эти знания отсутствуют в специальной литературе и приобретаются экспертом в результате длительного опыта. Процесс передачи знаний от эксперта системе является наиболее узким местом при проектировании ЭС.

Подсистема управления базой знаний является основным информационно - преобразующим элементом системы, обеспечивающим доступ остальных подсистем к знаниям и данным.

Подсистема общения является составной частью пользовательского интерфейса. В свою очередь пользовательский интерфейс - это комплекс аппаратных и программных средств, обеспечивающих взаимодействие пользователей с ЭС [1]. Под аппаратными средствами мы будем понимать компьютер. Совокупность программных средств составляет лингвистическое обеспечение (ЛО) ЭС.

В статье предложена методика разработки ЛО.

Прежде чем рассмотреть методику разработки лингвистического обеспечения, опишем общую структуру знаний, которые используются в процессе коммуникативного взаимодействия пользователей и ЭС. Можно выделить пять уровней знаний:

Зн1 - знания пользователей;

Зн2 – материализованные знания (руководства, инструкции и т.д.);

Зн3 – поле знаний (полуформализованное описание Зн1 и Зн2 в виде рисунков, таблиц, схем, сетей, диаграмм, описаний на ограниченном естественном языке);

Зн4 – формализованные знания на языках представления знаний;

Зн5 – база знаний на машинных носителях информации.

Данную концепцию иллюстрирует рис. 2.

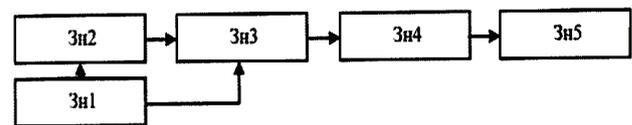


Рисунок 2 – Общая структура знаний

Совокупность Зн1 и Зн2 образуют знания о предметной области. В ЭС используется то, что удалось извлечь и формализовать из Зн1 и Зн2. Для взаимодействия пользователей с ЭС важным оказывается разработка поля знаний, когда создается полуформализованное описание решаемых задач, основных понятий предметной области и связей между ними. В дальнейшем структура знаний представляется в виде формализованного описания Зн4.

На каждом из перечисленных уровней знаний используются свои языки. На уровнях Зн1 и Зн2 используется, как правило, профессиональный естественный язык - единственный метаязык, позволяющий описать практически всю предметную область. Уровень знаний Зн4 описывается с использованием некоторого языка представления знаний. В качестве языка на уровне Зн5 выступает внутренний язык (ВЯ) компьютера.

При разработке ЭС основное внимание уделяется разработке формального языка представления знаний. После того как такой язык создан, предпринимаются попытки обеспечить взаимодействие с системой непрограммирующих пользователей [8]. Поэтому над ЯПЗ создаются различные программные оболочки, обеспечивающие взаимодействие на ограниченном естественном языке, с использованием системы меню, таблиц, анкет и т. д. Такой подход к разработке ЛО требует значительных затрат ресурсов вычислительной техники (времени обработки запросов пользователей). Основной причиной такого состояния работ по созданию средств взаимодействия является отсутствие

единого подхода к разработке ЛО ЭС. Исследования в области искусственного интеллекта затрагивают отдельные вопросы данной проблемы [9]. Вместе с тем, они не объединены в единую систему и решают частные задачи.

**Цель статьи.** Разработать подход к созданию ЛО ЭС, позволяющий осуществить выбор необходимых языков в системе, математически точно описать язык

взаимодействия и адекватно отобразить формально-логические основы моделей знаний о предметной области.

**Основная часть.** Исходя из этого, была предложена методика разработки ЛО ЭС, которая изображена на рис. 3. Основные положения этой методики сводятся к следующему.

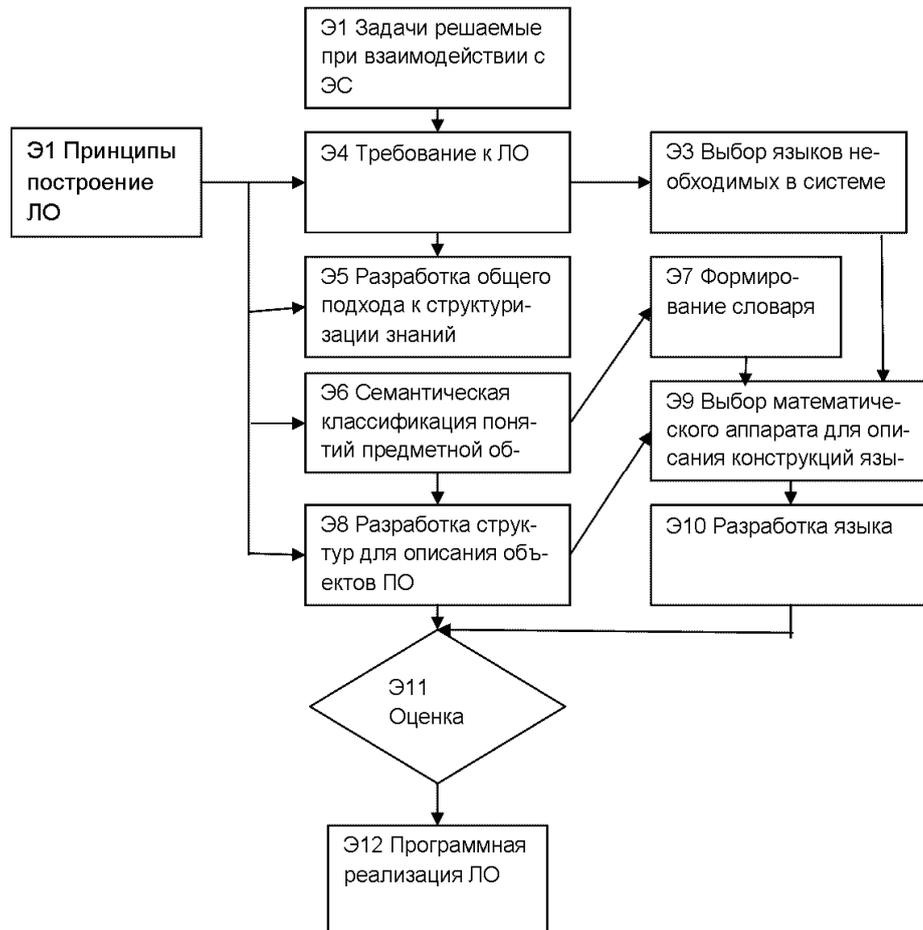


Рисунок 3 – Подход к разработке лингвистического обеспечения

На основании задач, решаемых пользователями при взаимодействии с системой, а также требований к лингвистическому обеспечению обосновывается выбор языков взаимодействия, которые необходимо иметь в системе [10]. Проведенный анализ показал, что наиболее целесообразно иметь в системе один язык взаимодействия, состоящий из двух подмножеств: подмножества ограниченного естественного языка (ОЕЯ) и подмножество ВЯ. Преобразование одного подмножества в другое осуществляет транслятор, который в дальнейшем будем именовать лингвистическим процессором (ЛП).

Исходя из требований и принципов построения ЛО, разрабатывается общий подход к структуризации знаний о предметной области (Э5) и производится семантическая классификация понятий ПО (Э6), на базе которых формируется словарь (Э7).

Используя выбранный подход к представлению знаний, синтезируются языковые структуры (Э8), по-

зволяющие адекватно описывать ПО.

Для формального описания конкретных языковых выражений выбирается математический аппарат (формальные грамматики и их модификации, деревья синтаксического подчинения и др.), позволяющий построить модель языка (Э9).

После разработки модели языка (Э10) с использованием выбранного аппарата оценивается качество лингвистического обеспечения (Э11), сложность алгоритмов, а также соответствие ЛО предъявленным требованиям. Если оценка качества не удовлетворяет предъявленным требованиям, то уточняется математический аппарат для описания языка либо изменяются требования к ЛО, что позволит создать систему взаимодействия для ЭС.

Завершающим этапом разработки ЛО является программная реализация предложенного языка взаимодействия (Э12).

**Вывод.** Предложенная методика разработки лингвистического обеспечения, позволяет осуществить выбор необходимых языков в системе, математически точно описать язык взаимодействия и адекватно отразить формально логические основы моделей знаний о предметной области.

#### Список литературы

1. ДСТУ 2481-94. Системи оброблення інформації. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення. – К.: Держстандарт України, 1994. – 30 с.
2. Башмаков А.И. Интеллектуальные информационные технологии: Учеб. пособие / А.И. Башмаков, И.А. Башмаков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 398 с.
3. Гуцин А.Н. Экспертные системы: учебное пособие. Бадт. гос. техн. ун-т / А.Н. Гуцин, И.А. Радченко. – СПб: 2007. – 154 с.
4. Джарратано Д. Экспертные системы: принципы разработки и программирование : Пер. с англ. / Д. Джарратано, Г. Райли. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1152 с.
5. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект / А.А. Жданов. – М.: Бином, 2009. – 154 с.
6. Люгер Дж. Искусственный интеллект: стратегии и методы решения сложных проблем: пер. с англ. / Дж. Люгер. – М.: Вильямс, 2003. – 864 с.
7. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход (AIMA), 2-е издание.: Пер. с англ. / С. Рассел, П. Норвиг. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1424 с.
8. Субботин С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник / С. О. Субботин. – Запоріжжя: ЗИТУ, 2008. – 341 с.
9. Шамис А.Л. Поведение, восприятие, мышление: проблемы создания искусственного интеллекта / А.Л. Ша-

мис. – М.: Едиториал УРСС, 2005. – 132 с.

10. Freeman J. Argument Structure / J. Freeman. – Lawrence Erlbaum Associates. 2005. – 215 с.

#### References (transliterated)

1. GOST 2481-94. Information processing systems. Intelligent technical information technology. Terms and definitions. Kyiv: State Standard of Ukraine, 1994, 30 p.
2. Bashmakov A.I., Bashmakov I.A. Intelligent Information Technology: Textbook. Moscow: Izd-vo Bauman them. BC Bauman, 2005, 398 p.
3. Gushchin A.N., Radchenko I.A. Expert system: uchebnoe posobyе. Badt. state. Sc. Univ. Sankt Petersburg: 2007, 154 p.
4. Dzharratano J., Riley G. Expert systems: development and programming principles: Per. with English. Moscow: Publishing Home "Williams", 2006. 1152 p.
5. Zhdanov A.A. Autonomous Artificial Intelligence. Moscow: Binom, 2009. 154 p.
6. Lyuher J. Artificial Intelligence: Methods and strategy solutions slozhnyh problems: Per. with English. Moscow: Williams, 2003. 864 p.
7. Russell S., Norvyh P. Artificial Intelligence: Modern approach (AIMA), 2nd edition.: Per. with English. Moscow: Publishing Home "Williams", 2006. 1424 p.
8. Subbotin S.A. Presentation and knowledge processing systems and artificial intelligentand decision suport: Tutorial. Zaporozhye: ZYTU, 2008. 341 p.
9. Shamys A.L. Behavior, Perception, thinking: the problem of creation artificial intelligence. Moscow: Edytoryal URSS, 2005, 132 p.
10. Freeman J. Argument Structure. Lawrence Erlbaum Associates, 2005, 215 p.

Поступила (received) 29.09.2016

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

**Підхід до розробки лінгвістичного забезпечення експертної системи / Б.М. Судаков, М.В. Іванова, А.С. Блажей // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 74-77. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Подход к разработке лингвистического обеспечения экспертной системы / Б.Н. Судаков, М.В. Иванова, А.С. Блажей // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 74-77. – Бібліогр.: 10 назв. – ISSN 2079-0740.**

**The approach to lingware development of expert system / B.M. Sudakov, M.V. Ivanova, A.S. Blazhej // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 74-77. – Bibliogr.: 10. – ISSN 2079-0740.**

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

**Судаков Борис Миколайович** – кандидат технічних наук, професор, Національний технічний університет «ХПІ»

**Судаков Борис Николаевич** – кандидат технических наук, профессор, Национальный технический университет «ХПИ»

**Sudakov Boris Nikolaevich** – Ph.D., Professor, National Technical University "KhPI"

**Іванова М.В.** – магістр, Національний технічний університет «ХПІ»

**Ivanova M.V.** – магистр, Национальный технический университет «ХПИ»

**Ivanova M.V.** – Master, National Technical University "KhPI"

**Блажей А.С.** – магістр, Національний технічний університет «ХПІ», e-mail: andrey.blazhey@gmail.com

**Блажей А.С.** – магистр, Национальный технический университет «ХПИ», e-mail: andrey.blazhey@gmail.com

**Blazhej A.S.** – Master, National Technical University "KhPI", e-mail: andrey.blazhey@gmail.com

УДК 536.242 : 621.314

**О. В. ХВОЩАН****ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ ЗАРЯДНОГО БЛОКА ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫХ ПОГРУЖНЫХ УСТРОЙСТВ**

З використанням програмних продуктів MathCAD та Femlab проведено теоретичний розрахунок температурного поля зарядного блоку високовольтних електророзрядних заглибних пристроїв з вихідною потужністю 1 кВА та проміжним перетворенням енергії на частоті 15 кГц. Визначено критичні до перегріву елементи конструкції зарядного блоку, що включає інвертор напруги, високовольтний трансформатор і високовольтний випрямляч. Проведено порівняння результатів теоретичних розрахунків з експериментальними даними. Запропоновано варіанти рішень для зниження температур перегріву елементів.

**Ключові слова:** електророзрядний заглибний пристрій, зарядний блок, температура перегріву, теплопровідність, діелектрик.

С использованием программных продуктов MathCAD и Femlab проведен теоретический расчет температурного поля зарядного блока высоковольтных электроразрядных погружных устройств с выходной мощностью 1 кВА и промежуточным преобразованием энергии на частоте 15 кГц. Определены критические к перегреву элементы конструкции зарядного блока, включающего инвертор напряжения, высоковольтный трансформатор и высоковольтный выпрямитель. Проведено сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными. Предложены варианты решений для снижения температур перегрева элементов.

**Ключевые слова:** электроразрядное погружное устройство, зарядный блок, температура перегрева, теплопроводность, диелектрик.

The article deals with improving the functioning of electrohydropulse devices for the treatment of oil, water intake (artesian), injection wells, which are widely used at the present time in Europe (Ukraine, Russia, France, Slovenia), Asia (China, Kazakhstan, Uzbekistan), North America (USA, Canada). Using software products MathCAD and Femlab a theoretical calculation of the temperature field of the charging unit of electrodischarge submersible devices with useful capacity of 1 kW and the intermediate energy conversion at a frequency of 15 kHz is carried out. The critical-overheating elements of the charging unit structure comprising a voltage inverter, a high voltage transformer and high voltage rectifier are identified. A comparison of the results of theoretical calculation with experimental data received in the laboratories of the Department of Pulse Treatment of Disperse Systems of the Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine is carried out. The variants of solutions to reduce the temperature of overheating components are offered.

**Keywords:** electrodischarge submersible device, charging unit, overheating temperature, thermal conductivity, dielectric.

**Введение.** Электрогидроимпульсные технологии достаточно широко используются в различных отраслях промышленности как Украины, так и других стран ближнего и дальнего зарубежья благодаря гибкости регулирования энергосиловых характеристик, концентрированному мощному воздействию на объект обработки, экологичности и достаточно высокой эффективности [1, 2]. Одним из направлений, интенсивно развивающихся в последние десятилетия вследствие острого дефицита энергоресурсов, является применение электрогидравлического эффекта для интенсификации притока полезных ископаемых в скважины [3, 4]. Особенностью разработанных и действующих в настоящее время электроразрядных установок, базирующихся на использовании этого эффекта, является необходимость применения многоступенчатого преобразования энергии, что обусловлено, с одной стороны, удаленным расположением объекта обработки (призабойной зоны пласта (ПЗП)) от источника питания, с другой стороны – крайне ограниченным рабочим пространством скважины. В преобладающем большинстве такие установки представляют собой электротехнический комплекс, состоящий из наземной части (источника питания), погружной части, располагающейся в зоне обработки при проведении ремонтных работ, и соединяющего их кабеля [5-9].

**Постановка задачи.** Особенностью зарядной цепи погружных скважинных устройств является наличие в ее составе каротажного геофизического кабеля, соединяющего наземную и погружную части устройства. Наивысших значений КПД зарядной цепи и передаваемой в накопитель мощности можно достичь, передавая в кабель постоянное напряжение, однако низкое рабочее напряжение кабеля (до 1000 В) ведет к необходимости использовать многоступенчатую схему преобразования энергии в зарядной цепи [10]. Структурная схема погружного скважинного комплекса приведена на рис. 1.

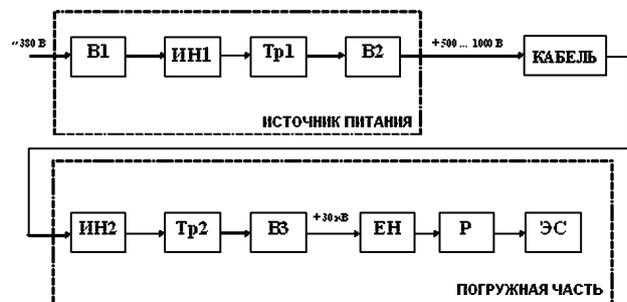


Рисунок 1 – Структурная схема погружного электроразрядного комплекса

В наземной части устройства (источнике пита-

ния) промышленное напряжение 380 В, 50 Гц выпрямляется трехфазным выпрямителем В1 и преобразуется в переменное напряжение повышенной частоты транзисторным инвертором напряжения ИН1. Регулирование напряжения осуществляется трансформатором Тр1. Далее напряжение выпрямляется выпрямителем В2 и передается по кабелю в погружную часть комплекса.

Погружная часть комплекса имеет блочную структуру. Каждый блок представляет собой цилиндр с внешним диаметром корпуса 102 мм и толщиной стенки 7 мм. В погружной части (зарядном блоке) постоянное напряжение преобразуется в переменное инвертором напряжения ИН2 и повышается высоковольтным трансформатором Тр2, при этом промежуточная частота преобразования напряжения выбирается исходя из необходимости обеспечить малые габариты Тр2 при его допустимом перегреве. Далее напряжение выпрямляется выпрямителем В3 и осуществляется зарядка блока емкостного накопителя ЕН до 30 кВ. При достижении требуемого значения напряжения срабатывает разрядник Р, после чего накопленная энергия выделяется в межэлектродном промежутке электродной системы ЭС.

Учитывая возможность работы погружной части комплекса в условиях внешней температуры до 100 °С и выше при значительной глубине залегания продуктивных нефтяных пластов, важной задачей является определение температурного режима работы комплекса в целом и элементов зарядного блока в частности.

**Целью** данной работы является теоретическое исследование температурного режима зарядного блока с промежуточным преобразованием энергии на частоте 15 кГц и выходной мощностью 1 кВА для определения его наиболее критических к нагреву элементов и разработки рекомендаций по повышению надежности блока.

**Условия, принятые при моделировании.** Высоковольтный трансформатор (Тр2 на рис. 1) является основным тепловыделяющим и массивным элементом зарядного блока, поэтому одной из задач являлось определение оптимального комплекса массогабаритных, тепловых и температурных показателей работы данного элемента.

Предварительно был выбран материал магнитопровода трансформатора – нанокристаллическое железо фирмы МЕЛТА (г. Киев, [11]) – и его конструктивное исполнение. В связи с расположением оборудования в цилиндрическом корпусе крайне ограниченных габаритов (внешний диаметр – 102 мм, внутренний – 88 мм), определяемых допустимым диаметром обсадной трубы скважины и высоким (до 50 МПа) гидростатическим давлением, наилучшим вариантом по заполнению рабочего пространства корпуса было определено использование стержневого трансформатора с магнитопроводом квадратного сечения стороной 15 мм и шириной окна 20 мм (рис. 2), что позволяет, соблюдая необходимые изоляционные промежутки, приблизить часть поверхности обмотки и маг-

нитопровода к стенке корпуса для улучшения теплоотвода.

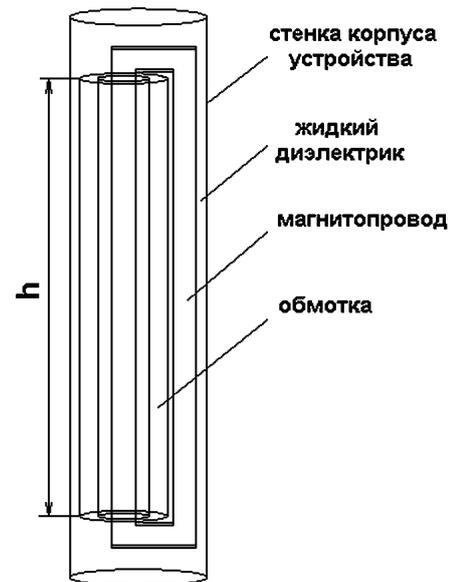


Рисунок 2 – Высоковольтный трансформатор

Теоретический анализ тепловых режимов работы отдельных частей зарядного блока проводился с помощью программы для расчета различного рода физических полей *Femlab 3.1*, позволяющей, в частности, моделировать переходные характеристики и стационарную тепловую картину одно-, дву- и трехмерных конфигураций методом конечных элементов с достаточно высокой точностью. При анализе модели высоковольтного трансформатора, обеспечивающего передачу в накопительную емкость энергии с мощностью 1 кВА, принимались следующие допущения:

- первичная и вторичная обмотки, каркасы, изоляционные слои были объединены в один цилиндр, теплофизические характеристики которого соответствовали меди; теплофизические характеристики материала, из которого выполнен магнитопровод (сердечник из нанокристаллического железа), соответствовали стали;

- наличие стальной стенки трубы не учитывалось; граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;

- цилиндрическая область заполнена жидким диэлектриком (полиметилсилоксановой жидкостью (ПМСЖ) ПМС-20 ГОСТ 13032-77) и не ограничена в осевой плоскости.

Данные, использованные при составлении модели высоковольтного трансформатора, приведены в табл. 1.

Математическая модель, определяющая взаимосвязь между габаритами трансформатора, его электрическими характеристиками и потерями, приведена в [12]. Предварительный расчет потерь в согласующем высоковольтном трансформаторе комплекса с полезной мощностью 1 кВт, выполненный по первой гармонике (15 кГц), дал следующие результаты:

- потери в обмотках, Вт – 2,66;
- потери в магнитопроводе, Вт – 2,61;
- удельные потери в обмотках, Вт/м<sup>3</sup> – 1,75·10<sup>4</sup>;
- удельные потери в магнитопроводе, Вт/м<sup>3</sup> – 2,35·10<sup>4</sup>.

Таблица 1 – Параметры элементов трансформатора

Элемент	Магнито-провод	Об-мотка	Жидкий диэлектрик
Материал	сталь	медь	ПМСЖ
Удельная мощность $q$ , Вт/м <sup>3</sup>	10820	12200	-
Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7870	8700	910
Удельная теплоемкость $C_m$ , Дж/(кг·К)	440	385	1666
Коэффициент теплопроводности $\lambda$ , Вт/(м·К)	76,2	400	0,167

Анализ современного состояния технической базы позволил использовать следующие материалы и комплектующие при проектировании инвертора и выпрямителя (ИН2 и В3 на рис. 1 соответственно):

- транзисторы IRG4PH50UD;
- диоды ВУХ104G/A52AS;
- резисторы СЗ-6, PVR10;
- обмоточный провод ПЭВ-2 ГОСТ 7262-78, ПЭТВ ТУ 16-705.110-79, ПЭТ-155 ТУ 16.К71-160-92;
- нанокристаллическое железо фирмы «МЕЛТА» или феррит в качестве магнитопровода высоковольтного трансформатора;
- изоляционные материалы класса нагревостойкости В и выше (например, фторопласт-4 ГОСТ 10007-80 в качестве твердого диэлектрика, ПМС-20 ГОСТ 13032-77 – в качестве жидкого).

Согласно техническим данным по транзисторам IRG4PH50UD фирмы International Rectifier [13], потери на переключение одного транзистора при частоте 15 кГц и полезной мощности комплекса 1 кВт составляют 4,4 Вт, потери в транзисторе в открытом состоянии – 2,6 Вт, общие потери – 7 Вт. С учетом габаритных размеров транзистора, удельные потери в нем составляют 4,38·10<sup>6</sup> Вт/м<sup>3</sup>. Рассеиваемая мощность на одном диоде ВУХ104G/A52AS фирмы Philips Semiconductors в номинальном режиме работы 2,9 Вт, при этом удельная мощность 2,64·10<sup>6</sup> Вт/м<sup>3</sup> [14].

При анализе моделей инвертора напряжения (ИН2 на рис. 1) и выпрямителя (В3 на рис. 1) были приняты следующие допущения:

- модели транзисторного инвертора и диодного выпрямителя рассматривались отдельно, без учета переноса тепла от соседних блоков, расположенных соосно;
- рассматривалась трехмерная модель переноса тепла теплопроводностью от нагретых при номинальной работе транзисторов (диодов) к корпусу погружной части комплекса, процессы излучения с поверхности транзисторов (диодов) и конвекции в объеме жидкого диэлектрика не учитывались;
- каждый транзистор расположен на отдельном алюминиевом пластинчатом радиаторе с площадью поверхности 1,2·10<sup>-2</sup> м<sup>2</sup> на расстоянии 5 мм от стенки

корпуса;

- наличие стальной стенки трубы не учитывалось; граничное условие для образующей поверхности цилиндрической области, заключающей модель – условие постоянной температуры, поддерживаемой внешней средой;

– цилиндрическая область заполнена жидким диэлектриком (полиметилсилоксановой жидкостью (ПМСЖ) ПМС-20 ГОСТ 13032-77 [15]) и не ограничена в осевой плоскости.

**Анализ результатов теоретических исследований.** Температурное поле транзисторов, закрепленных на пластинчатых алюминиевых радиаторах в погружной части разрабатываемого комплекса, представлено на рис. 3.

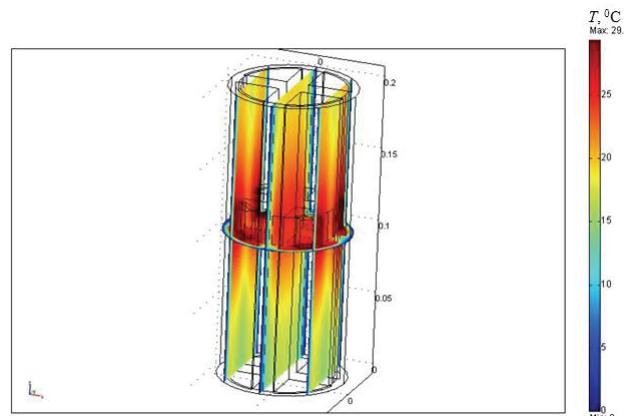


Рисунок 3 – Температурное поле транзисторов

Как видно из рис. 3, ожидаемая температура перегрева транзисторов относительно корпуса погружной части комплекса, работающего с полезной мощностью 1 кВт, – 29 °С.

Результаты расчета температурного поля трансформатора приведены на рис. 4.

Распределение температур в объеме блока высоковольтного трансформатора изображено на рис. 4, а, распределение температур в средней части модели в радиальном направлении – на рис. 4, б. Ожидаемая температура перегрева магнитопровода трансформатора относительно корпуса погружной части комплекса, работающего с полезной мощностью 1 кВт, – 17 °С.

Перегрев диода, расположенного на оси модели, изображен на рис. 5. Данное расположение является наиболее неблагоприятным для передачи тепла от работающего диода к корпусу погружной части устройства, поскольку расстояние между ними является максимальным.

Необходимо отметить, что погрешность при расчете температурного режима работы диодов могут вызвать следующие неучтенные факторы:

- сопоставимость величины поверхности соединительных медных проводников и диода, который имеет малые габариты;
- преобладающее влияние конвекционных процессов в объеме жидкого диэлектрика на теплоперенос от поверхности работающего диода по срав-

нению с переносом тепла за счет теплопроводности диэлектрика.

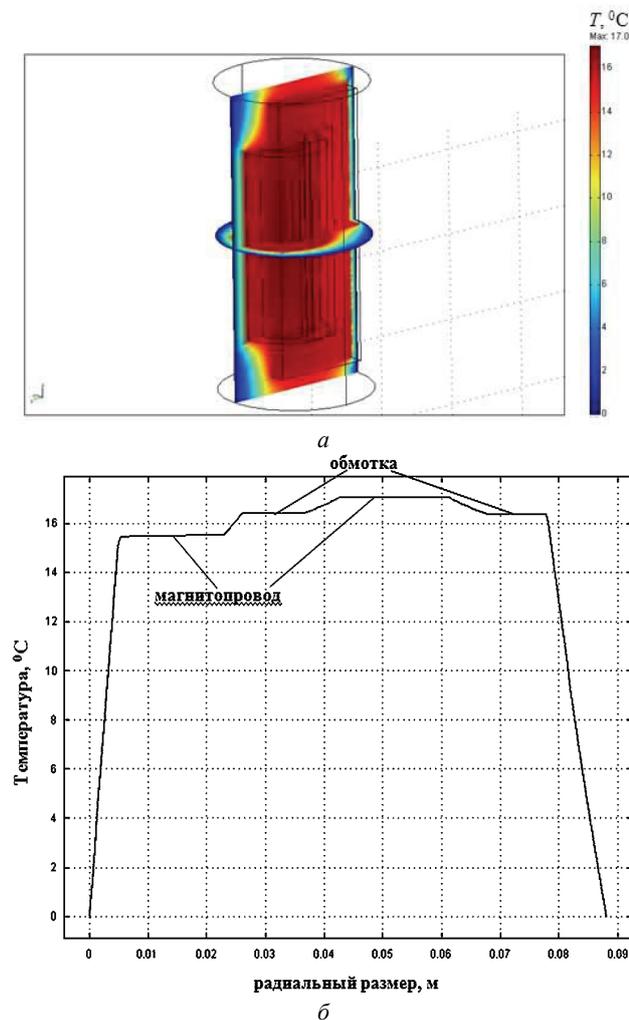


Рисунок 4 – Температурное поле высоковольтного трансформатора

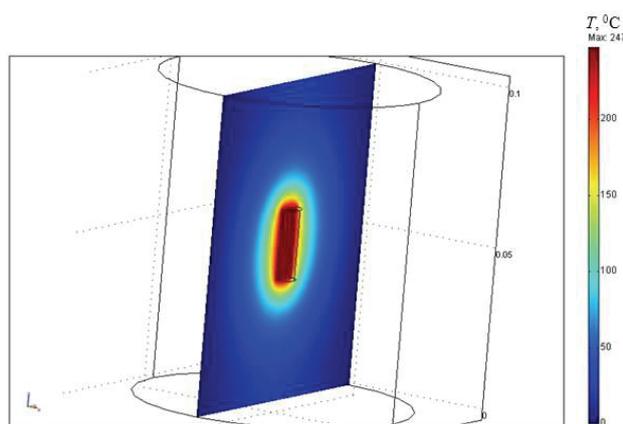


Рисунок 5 – Температура перегрева диода

Достичь уменьшения погрешности позволяет расчет относительного перегрева диода (в качестве базового принят максимальный перегрев элемента). Это даст возможность прогнозировать величину температуры элемента при его расположении в любой точке внутри корпуса устройства на основании ре-

зультата натурального эксперимента.

На рис. 6 изображена зависимость перегрева диода от его положения в корпусе (расстояния от оси цилиндрического корпуса).

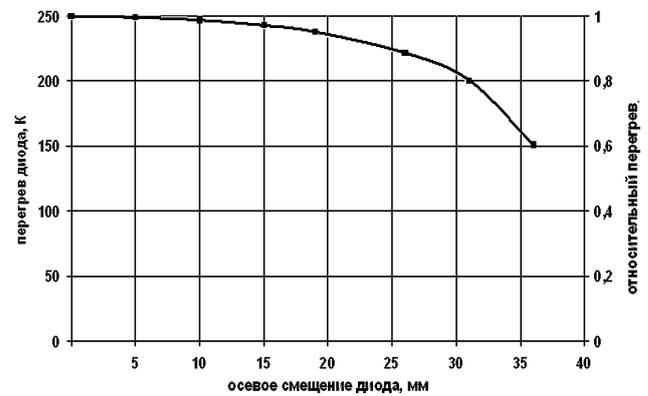


Рисунок 6 – Зависимость температуры перегрева от осевого смещения диода

Как видно из рис. 6, вплоть до максимального приближения к корпусу наблюдается незначительное уменьшение перегрева диода, что связано с хорошими теплоизолирующими свойствами жидкого диэлектрика. Величина приближения зависит от разности потенциалов между диодом и корпусом, которая может достигать 30 кВ.

Вариантом уменьшения перегрева элементов может стать использование современных заливочных компаундов с высокой теплопроводностью и электрической прочностью. Одним из таких веществ может быть компаунд ЗТ-15,0 ТУ РБ 100009933.004-2001 [16] компании НОМАКОН с характеристиками:

- электрическая прочность – 10 кВ/мм;
- теплопроводность – 1,2 Вт/(м·К);
- плотность – 1900 кг/м<sup>3</sup>.

Зависимость перегрева диода от толщины заливочного компаунда приведена на рис. 7. Как видно из рис. 7, использование компаунда с теплопроводностью, на порядок превышающей соответствующее значение жидкого диэлектрика, ведет к резкому уменьшению температур перегрева диода. Так, уже при толщине компаунда 5 мм достигается уменьшение температуры перегрева в два раза, а при полной замене жидкого диэлектрика компаундом перегрев снижается на порядок.

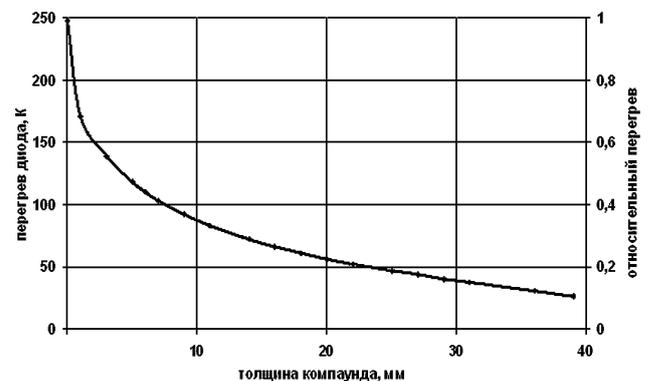


Рисунок 7 – Зависимость перегрева диода от толщины компаунда



Рисунок 8 – Макет зарядного блока

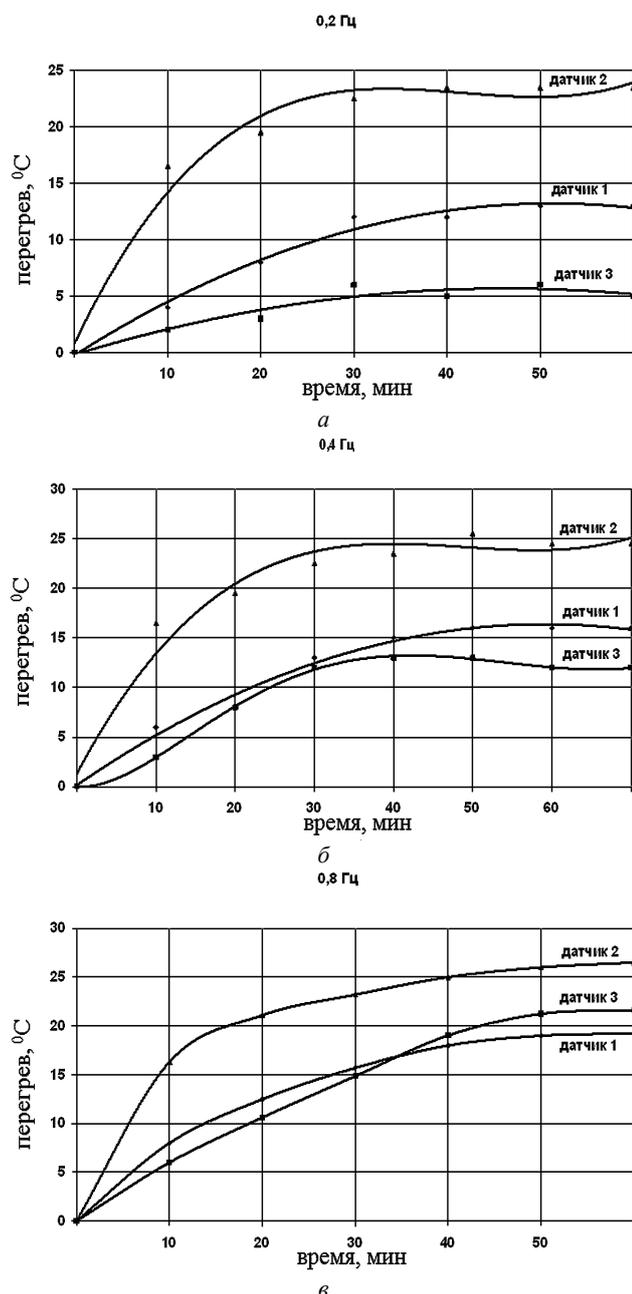


Рисунок 9 – Динамика перегрева элементов зарядного блока при частоте разрядных импульсов: а – 0,2 Гц; б – 0,4 Гц; в – 0,8 Гц

Негативными последствиями использования заливочных компаундов могут стать уменьшение ремонтпригодности выпрямительного блока и снижение влияния конвективного теплообмена на вынос тепла к корпусу устройства, поэтому данный вопрос

требует тщательной теоретической и конструкторской проработки.

**Сравнение результатов теоретических расчетов с экспериментальными данными.** Экспериментальное измерение температур нагрева элементов проводилось на макете зарядного блока (рис. 8). Макет помещался в стальную трубу диаметром 102 мм, в качестве жидкого изолятора использовался ПМС-20 ГОСТ 13032-77. Температуры нагрева измерялись цифровыми термометрами DS18B20 фирмы Dallas Semiconductor [17].

Датчики крепились следующим образом:

- датчик 1 на радиаторе возле транзистора;
- датчик 2 на магнитопроводе трансформатора в непосредственной близости к катушке с низковольтной обмоткой;
- датчик 3 на расстоянии 1 см от диода, имеющего электрический контакт с корпусом зарядного блока.

Учитывая, что макет зарядного блока опускался в бак с водой, также измерялась температура нагрева цилиндрического корпуса в районе расположения высоковольтного выпрямителя (нижняя точка) и районе размещения преобразователя частоты (верхняя точка).

Результаты измерений приведены на рис. 9. На рис. 9 изображены кривые перегрева элементов зарядного блока относительно корпуса макета при различной частоте циклов заряд-разряд конденсаторов. Батарея конденсаторов емкостью 2,7 мкФ заряжалась до 28 кВ, после чего воздушный разрядник коммутировал разрядный контур с частотой 0,2; 0,4 и 0,8 Гц.

Следует отметить, что при проведении эксперимента со временем наблюдалось уменьшение напряжения срабатывания разрядника [18] в пределах от 10 до 12 %, что ведет к снижению уровня накопленной в конденсаторе энергии на величину до 20 %.

**Выводы.** Сравнение результатов теоретических исследований и эксперимента показало, что измеренная температура перегрева транзистора на 34 % меньше теоретической. Частично несоответствие можно объяснить изменением запасаемой конденсатором энергией, связанным с уменьшением напряжения срабатывания разрядника при длительной работе комплекса.

Измеренная температура перегрева магнитопровода трансформатора на 40 % превышает расчетное значение из-за пренебрежения в расчете рядом важных факторов (наличием высших гармоник в составе напряжений и токов трансформатора, более точным учетом его геометрических параметров и др.).

Измеренная температура перегрева диодов на порядок меньше расчетного значения, однако расположение датчика на расстоянии 1 см от диода ведет к уменьшению температуры относительно поверхности элемента в три раза, а невозможность учета присоединенной поверхности проводов и точного расположения диодов в корпусе также увеличивают погрешность расчетов.

Учитывая работу погружной части комплекса в условиях внешней температуры до 100 °С, следует

отметить необходимость принятия конструктивных решений для охлаждения магнитопровода трансформатора, рассмотреть возможность использования компаунда для уменьшения перегрева высоковольтных диодов. В дальнейших исследованиях температурного поля элементов, находящихся в значительном объеме жидкого диэлектрика, следует учитывать механизм конвективного теплопереноса.

Автор выражает благодарность научным сотрудникам ИИПТ НАН Украины В. В. Литвинову и Ю. И. Мельхеру за помощь в проведении экспериментальных исследований.

#### Список литературы

1. Гулый Г. А. Основы разрядноимпульсных технологий / Г. А. Гулый. – К.: Наукова думка, 1990. – 208 с.

2. Вовченко А. И. 50-летний путь развития: теория и практика электроразрядных процессов / А. И. Вовченко // Материалы XVI Международной научной конференции «Физика импульсных разрядов в конденсированных средах» (19-22 августа 2013). – Николаев: КП «Миколаївська обласна друкарня», 2013. – С. 3-6.

3. Жекул В. Г. Электроразрядная обработка скважин на нефтедобывающих месторождениях Украины / В. Г. Жекул, В. А. Кучернюк, Ю. И. Мельхер и др. // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2012. – Вып. 21. – С. 72-77.

4. Швець І. С. Електророзрядний спосіб відновлення продуктивності артезіанських свердловин / І. С. Швець, В. Г. Жекул, С. Г. Поклонов та ін. // Вісник аграрної науки Причорномор'я. – 2013. – Вип. 3. – С. 200-205.

5. Wesley R. H. Patent 4345650 USA, E 21 B 43/25. Process and apparatus for electrohydraulic recovery of crude oil / Richard H. Wesley (USA). – № 139438; fil. 04.11.80; publ. 08.24.82.

6. Riggs E. D. Patent 4343356 USA, E 21 B 36/04. Method and apparatus for treating subsurface boreholes / Emmet D. Riggs, Eugene R. Brownscombe, James R. Bilhartz (USA). – № 888352; fil. 03.20.78; publ. 08.10.82.

7. Khvoschan O. V. On the Problem of the Diminution of the Mass and Dimension Parameters of Submersible Ionic Complexes / O. V. Khvoschan, Yu. I. Kurashko, V. V. Litvinov // Surface Engineering and Applied Electrochemistry. – 2009. – Vol. 45, № 4. – P. 329-333.

8. Shwets I. S. Elektrohydroimpulse equipment for Increase of Oil and Intake Wells / I. S. Shwets, Y. I. Kurashko, N. N. Klimanskiy and others // 13th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings. – Tomsk: Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. – P. 409-411.

9. Курашко Ю. И. Генератор импульсных токов для погружных установок, обеспечивающих повышение производительности водозаборных скважин / Ю. И. Курашко, Н. Н. Климанский, А. Ф. Лазун и др. // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск «Електроенергетика і перетворююча техніка». – 2003. – Т. 1, № 1. – С. 147-153.

10. Хвоцан О. В. Повышение эффективности зарядных процессов электроразрядных погружных комплексов увеличенной мощности / О. В. Хвоцан, Ю. И. Курашко, В. В. Литвинов // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2006. – № 37. – С. 86-92.

11. Компания МЕЛТА. Виробництво якісних аморфних та нанокристалічних матеріалів. Електронний ресурс: <http://melta.com.ua>.

12. Хвоцан О. В. Оптимизация габаритных размеров высоковольтного трансформатора погружных электрораз-

рядных устройств повышенной мощности / О. В. Хвоцан, Ю. И. Курашко, В. В. Литвинов // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2007. – № 34. – С. 112-118.

13. IRG4PH50UD. Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode. Product specification. Електронний ресурс: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph50ud.pdf>.

14. High-voltage soft-recovery controlled avalanche rectifiers BYX101G; BYX102G; BYX103G; BYX104G. Product specification. Електронний ресурс: [http://www.terraelectronica.ru/show\\_pdf.php?pdf=%2Fds%2Fpdf%2Fb%2Fbyx101g\\_.pdf](http://www.terraelectronica.ru/show_pdf.php?pdf=%2Fds%2Fpdf%2Fb%2Fbyx101g_.pdf).

15. ГОСТ 13032-77. Жидкости полиметилсилоксановые. Технические условия. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – 17 с.

16. Теплопроводящие диэлектрические эластичные материалы. Електронний ресурс: <http://nomacon.by/kpdt/kpdt-2.php>.

17. DS18B20. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Електронний ресурс: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.

18. Жекул В. Г. Исследование напряжения срабатывания высоковольтных газонаполненных неуправляемых разрядников электроразрядных погружных установок / В. Г. Жекул, Ю. И. Мельхер, С. Г. Поклонов и др. // Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ». Збірник наукових праць. Тем. випуск «Техніка та електрофізика високих напруг». – 2016. – № 14. – С. 30-33.

#### References (transliterated)

1. Gulyj G. A. Osnovy razrjadnoimpul'snyh tehnologij [Fundamentals of discharge-pulse technologies]. Kiev, Naukova dumka, 1990, 208 p.

2. Vovchenko A. I. 50-letnij put' razvitija: teorija i praktika jelektrozrjadnyh processov [The 50-year-old way of development: theory and practice of electrodischarge processes]. "Fizika impul'snyh razrjadov v kondensirovannyh sredah": materialy XVI Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (19-22 avgusta 2013) ["Physics of Pulse Discharges in Condensed Media": The materials XVI-th International Scientific Conference (August, 19-22, 2013)]. Nikolaev, Mikolaivs'ka oblasna drukarnja, 2013, pp. 3-6.

3. Zhekul V. H., Kuchernjuk V. A., Mel'kher Ju. I., Poklonov S. H., Smirnov O. P., Shvets' I. S. Jelektrozrjadnaja obrabotka skvazhin na nefte dobyvajushih mestorozhdenijah Ukrainy [Electrodischarge treatment of wells at oil fields of Ukraine]. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychnyj vypusk: Tehnika ta elektrofizyka vysokyx napruh. 2012, no. 21, pp. 72-77.

4. Shvets' I. S., Zhekul V. H., Poklonov S. H., Smirnov O. P., Mel'kher Yu. I., Lytvynov V. V., Konotop S. V., Khvoschan O. V., Zaloha Ye. I. Elektorozrjadnyy sposib vidnovlennya produktyvnosti artezians'kykh sverdlovyh [Electrodischarge way to restore the productivity of artesian wells]. Visnyk ahraryoi nauky Prychornomor'ya. 2013, no. 3, pp. 200-205.

5. Wesley R. H. Patent 4345650 USA, E 21 B 43/25. Process and apparatus for electrohydraulic recovery of crude oil. No 139438. 1982.

6. Riggs E. D., Brownscombe E. R., Bilhartz J. R. Patent 4343356 USA, E 21 B 36/04. Method and apparatus for treating subsurface boreholes. No 888352. 1982.

7. Khvoschan O. V., Kurashko Yu. I., Litvinov V. V. On the Problem of the Diminution of the Mass and Dimension Parameters of Submersible Ionic Complexes. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2009, vol. 45, No 4, pp. 329-333.

8. Shwets I. S., Kurashko Y. I., Klimanskiy N. N., Khvoschan O. V., Onishenko L. I. Elektrohydroimpulse equipment for

Increase of Oil and Intake Wells. 13th International Symposium on High Current Electronics: Proceedings. Tomsk, Publishing house of the IAO SBRAS, 2004. pp. 409-411.

9. Kurashko Y. I., Klimanskiy N. N., Lazun A. F. Generator impul'snyh tokov dlja pogruzhnyh ustanovok, obespechivajushchih povyshenie proizvoditel'nosti vodozabornyh skvazhin [Generator of pulse currents for submersible units that enhance the performance of water wells]. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychniy vypusk: Elektroenerhetyka i peretvoryuyucha tekhnika. 2003, vol. 1, no. 1, pp. 147-153.

10. Khvoschan O. V., Kurashko Yu. I., Litvinov V. V. Povyshenie effektivnosti zarjadnyh processov jelektrozarjadnyh pogruzhnyh kompleksov uvelichennoj moshhnosti [The improving of the efficiency of charging process of electric submersible complexes with increased power]. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychniy vypusk: Tehnika ta elektrofizyka vysokoykh napruh. 2006, no. 37, pp. 86-92.

11. Kompaniya MELTA. Vyrobnystvo yakisnykh amorfnykh ta nanokrystalichnykh materialiv. Available at: <http://melta.com.ua>. (accessed 18.07.2016).

12. Khvoschan O. V., Kurashko Yu. I., Litvinov V. V. Optimizacija gabaritnyh razmerov vysokovol'nogo transformatora pogruzhnyh elektorazrjadnyh ustrojstv povyshennoj moshhnosti [Optimization of the dimensions of the high-voltage transformer of high-power submersible electrodischarge devices]. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Tematychniy vypusk: Tehnika ta elektrofizyka

vysokoykh napruh. 2007, no. 34, pp. 112-118.

13. IRG4PH50UD. Insulated gate bipolar transistor with ultrafast soft recovery diode. Product specification. Available at: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/irg4ph50ud.pdf>. (accessed 18.07.2016).

14. High-voltage soft-recovery controlled avalanche rectifiers BYX101G; BYX102G; BYX103G; BYX104G. Product specification. Available at: [http://www.terraelectronica.ru/show\\_pdf.php?pdf=%2Fds%2Fpdf%2Fb%2Fbyx101g\\_.pdf](http://www.terraelectronica.ru/show_pdf.php?pdf=%2Fds%2Fpdf%2Fb%2Fbyx101g_.pdf). (accessed 18.07.2016).

15. GOST 13032-77. Zhidkosti polimetilsiloksanovyje. Tehniceskie uslovija. Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov. 1997. 17 p

16. Teploprovodjashhie dijelektricheskie j elasticheskie materialy. Available at: <http://nomacon.by/kpdt/kpdt-2.php>. (accessed 18.07.2016).

17. DS18B20. Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Available at: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>. (accessed 18.07.2016).

18. Zhekul V. G., Mel'her Ju. I., Poklonov S. G., Smirnov A. P., Shvec I. S. Issledovanie naprjazhenija srabatyvanija vysokovol'tnyh gazonapolnennyh neupravljajemyh razrjadnikov elektorazrjadnyh pogruzhnyh ustanovok [Study of voltage operation of the high-voltage gas-filled noncontrollable dischargers of the electrodischarge immersion installation]. Visnyk Nacional'nogo tehničnogo universytetu «HPI». Zbirnyk naukovykh prats'. Serija: Tehnika ta elektrofizyka vysokoykh napruh. 2016, no. 14, pp. 30-33.

Поступила (received) 15.09.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження температурного режиму роботи зарядного блоку електророзрядних заглиблених пристроїв / О. В. Хвоцян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 78-84. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Исследование температурного режима работы зарядного блока электроразрядных погружных устройств / О. В. Хвоцян // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 78-84. – Бібліогр.: 18 назв. – ISSN 2079-0740.**

**The research of the temperature mode of the charging unit of electric submersible devices / O. V. Khvoschan // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 78-84. – Bibliogr.: 18. – ISSN 2079-0740.**

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

**Хвоцян Олег Вільямович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (067) 260–81–48; e-mail: olexvo@mail.ru

**Хвоцян Олег Вільямович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (067) 260–81–48; e-mail: olexvo@mail.ru

**Khvoschan Oleg Vil'jamovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Researcher, Institute of Pulse Processes and Technologies under the National Academy of Science of Ukraine (IPT, NASU), Mykolayiv, tel.: (067) 260–81–48; e-mail: olexvo@mail.ru

УДК 537.52:542.9:661.66

**А. Ю. ТЕРЕХОВ, Н. И. КУСКОВА****ПАРАМЕТРЫ ПРОЦЕССА САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩЕГОСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СИНТЕЗА НАНОДИСПЕРСНОГО ПОРОШКА КАРБИДА ТИТАНА**

Проведено експериментальні дослідження умов формування СВС в системах порошків: «титан + графіт», «титан + УНМ». Використання в порошкових сумішах екзотермічної добавки – політетрафторетилену призводить до збільшення швидкості СВС процесів. Експериментально визначені основні параметри процесу СВС порошкової системи «титан + УПМ»: температура запалювання; лінійна швидкість горіння; ширина зони прогріву; довжина хвилі і швидкість нагрівання речовини в хвилі.

**Ключові слова:** самопоширюваний високотемпературний синтез, електророзрядна обробка, титан, політетрафторетилен, вуглецеві наноматеріали.

Для реализации самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) нанопорошков карбида титана использованы углеродные наноматериалы (УНМ), синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов. Использование в порошковых смесях экзотермической добавки – политetraфторэтилена приводит к увеличению скорости СВС-процессов. Экспериментально определены основные параметры процесса СВС карбида титана – температура зажигания; линейная скорость горения; ширина зоны прогрева; длина волны и скорость нагревания вещества в волне. Результаты рентгенофазового анализа показали, что большая часть исходных порошков вступила в СВС-реакцию с образованием нанопорошков карбида титана.

**Ключевые слова:** самораспространяющийся высокотемпературный синтез, волна горения, разрядноимпульсное иницирование, карбид титана, термограмма горения.

Experimental investigations of formation conditions in SHS powders systems: "titanium + graphite", "titanium + CNM" were conducted. The use in powder mixtures of exothermic additive – polytetrafluoroethylene lead to speed increase of SHS processes. The main parameters of SHS in the powder system "titanium + CNM": ignition temperature; linear burn rate; the width of the heating zone; wave's length and rate of material's heating in the wave were experimentally determined.

**Keywords:** self-propagating high-temperature synthesis, electric discharge treatment, titanium, polytetrafluoroethylene, carbon nanomaterials.

**Введение.** Широкое применение для получения ценных в практическом отношении композитов и карбидов металлов [1,2] нашел самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). СВС-метод основан на химических реакциях, протекающих внутри узкой высокотемпературной зоны (от 1000 до 4000 К), которая распространяется в исходной системе порошков, состоящей из мелкодисперсной фракции окислителя и восстановителя [3]. Изучение закономерностей СВС и разработка методов управления синтезом продукта являются основными задачами исследования.

Технологические достоинства СВС заложены в самом принципе – использование быстро выделяющегося тепла химических реакций вместо нагрева вещества от внешнего источника, поэтому многие СВС-процессы даже в простейшем варианте успешно конкурируют с традиционными энергоемкими технологиями. Однако по мере развития метода и технологий СВС к ним предъявляются все более сложные требования с целью получения максимального эффекта.

Малые времена синтеза (0,05 - 1 сек) и высокие скорости нагревания вещества в волне (до миллиона градусов в секунду) говорят о том, что СВС следует отнести к категории экстремальных химических процессов. Такие темпы нагревания конденсированного вещества в миллиметровых слоях с помощью внешних источников энергии осуществить трудно. Экспериментально установлено, что СВС относится к трудно иницируемым процессам горения. Температура и энергия зажигания этих систем превосходят таковые

для известных конденсированных взрывчатых веществ и порохов [4-6].

Основные физико-химические процессы СВС протекают на фронте и в протяженной пространственной зоне за фронтом волны горения. Измерение температуры позволяет исследовать тепловую структуру волны и направлено на физико-химическую классификацию процесса СВС. Визуализация (фотографирование) процесса горения и последующая обработка информации поставляет данные о стадийности и механизме распространения волны.

**Анализ предварительных исследований и литературы.** Известно, что метод СВС является энергосберегающим и высокопроизводительным способом получения качественного порошка карбида титана. При использовании в твердых сплавах порошка карбида титана с ультрадисперсной и нанокристаллической структурой существенно увеличиваются твердость, прочность и вязкость сплава [7].

Традиционная технология СВС карбида титана основана на нефильтрационном сжигании шихты - исходной смеси порошков титана и сажи - в насыпном виде или в виде прессованных брикетов (таблеток) в замкнутом реакторе, в результате чего происходит значительный рост давления в реакторе и получается сильно спеченная прочная масса карбида титана. Такой спек продукта горения трудно поддается дроблению и размолу в порошок, особенно в порошок высокой дисперсности.

Размер частиц в продуктах СВС составляет обычно от 1 до 5 мкм, поэтому предполагалось, что получить этим методом вещества в нанокристаллическом состоянии нельзя. В 2002 г. было предложено осуществлять синтез нанопорошков карбида титана в результате использования инертного разбавителя, предотвращающего рост образующихся частиц карбида вследствие образования тонкого слоя расплава соли. Синтезированный с использованием в качестве разбавителя NaCl (при оптимальном содержании массовой доли ~ 30 %) порошок карбида имеет средний размер частиц ~ 100 нм. Недостатком метода является необходимость отмывания NaCl [4,5].

Для получения высокодисперсного порошка карбида титана применяют способ получения тугоплавких соединений на основе процесса СВС с фильтрацией газов и использованием гранулированной шихты [8]. Это позволяет значительно снизить давление в реакторе, сделать процесс СВС более безопасным и получить высокопористый слабоспеченный продукт, который легко размалывается в микropорошок. Кроме того, для увеличения дисперсности синтезируемого порошка карбида титана до наноразмерного используют различные специальные добавки в шихту, которые бы предотвращали рост синтезируемых карбидных частиц [9].

В настоящее время в области СВС ведутся перспективные работы по синтезу нанопорошков и наноматериалов. Целенаправленный поиск новых СВС-систем, изучение механизма и закономерностей их горения и условий синтеза металлоуглеродных наноматериалов составляют перспективу развития метода СВС и разработки новых эффективных технологических процессов [10].

**Целью работы** является получение параметров, характеризующих процесс СВС нанопорошка карбида титана в системе «титан + углеродный наноматериал».

**Методика проведения эксперимента.** Образцы для экспериментов готовили из смеси порошков с мольным отношением реагентов, соответствующим стехиометрическому уравнению химической реакции



Порошок углеродного наноматериала (УНМ) был получен методом высоковольтной электроразрядной обработки углеводородных жидкостей (в данном случае керосина ТС-1) [11,12].

Проводили предсинтезную обработку порошковых реагентов экзотермической смеси – измельчение компонентов и просеивание мелкой фракции, что позволяет получать систему с частицами необходимого размера. Капсулу, заполненную смесью порошков, располагали в технологическом узле, после чего к торцу образца подвели иницирующую проволоку, предварительно закрепленную в токоведущих электродах. Для нагрева экзотермической смеси была выбрана вольфрамовая проволока радиусом 0,3 мм.

Иницирование волны горения (локальный нагрев экзотермической смеси кратковременным импульсом тока, текущего по проволоке) реализовано разрядным импульсом тока. Для разрядноимпульсно-

го иницирования СВС был разработан соответствующий электроразрядный контур (рис. 1).

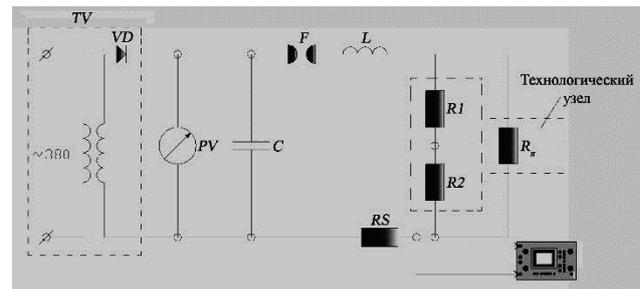


Рисунок 1 – Электроразрядный контур для иницирования СВС: *TV* – высоковольтный трансформатор с выпрямителем *VD*; *PV* – киловольтметр; *C* – батарея конденсаторов; *F* – управляемый воздушный разрядник; *L* – катушка индуктивности; *RS* – измерительный шунт; *R1, R2* – делитель напряжения; *R<sub>n</sub>* – иницирующая проволока

Установка включает технологический узел в виде прямоугольной камеры, выполненной из оргстекла, позволяющий упростить процесс видеорегистрации процесса СВС и обеспечить измерение скорости волны и профилей температуры в результате использования двух термопар, а также электроразрядный контур в металлическом корпусе, в котором для коммутации разрядных импульсов тока использован тиристор.

Для измерения температуры на фронте волны горения использованы термопары вольфрам-рениевые (ТВР) А1 диаметром 450 мкм, для установки которых в камере и капсуле с образцом просверливали отверстия глубиной ~2 мм и диаметром 1 мм. Следует отметить, что погрешность высокотемпературных измерений с помощью термопар ТВР А1 в волне СВС составляет от 10 до 50 К [13].

Для исследования температуры и скорости распространения фронта горения, а также динамики волны СВС использовали лабораторную установку, представленную на рис. 2.



Рисунок 2 – Технологический узел и электроразрядный контур в металлическом корпусе установки СВС

В связи с тем, что термопары ТВР А1 имеют малую величину термоэлектрической движущей силы (т.э.д.с.), сравнимую с уровнем помех на самом осциллографе, было решено усиливать сигналы перед непосредственной подачей на вход осциллографа. Для усиления сигналов применяли аналоговый прецизионный усилитель AD627.

Для калибровки датчика температуры использовали табличные данные для термопар ТВР А1 по

ДСТУ 2837-94 (ГОСТ 3044-94).

Камеру с образцом герметично закрывали и заполняли дистиллированной водой через подводящую трубку.

При помощи электроразрядного импульса иницирующая проволока нагревалась и поджигала экзотермическую смесь. В момент подачи разрядного импульса включали видеозапись процесса СВС на цифровой фотоаппарат Sony Cyber-shot DSC-H7 и осуществляли регистрацию усиленных сигналов с датчиков температуры (термопар) с помощью осциллографа Wittig Technologies W2012.

После окончания СВС- процесса камеру открывали, капсулу извлекали из ячейки, жидкость с содержащимися в ней СВС-продуктами сливали и фильтровали на вакуум-фильтровальной установке, а для продолжения эксперимента устанавливали следующий образец. Полезный продукт в виде порошка собирали с фильтра и просушивали.

Результаты измерения линейной скорости волны горения и температуры на фронте волны горения позволяют рассчитать следующие основные параметры, характеризующие процесс СВС – ширину зоны прогрева  $x_m$ , время реакции в волне  $t_p$ , время нагревания вещества в волне  $t_m$  и скорость нагревания вещества в волне  $W$ , используя расчетные формулы, указанные в [14],

$$x_m = \frac{\alpha}{u}, \quad (2)$$

$$t_m = \frac{x_m}{u}, \quad (3)$$

$$t_p = \frac{(L_e - x_m)}{u}, \quad (4)$$

$$W = \frac{(T_e - T_0)}{t_m}, \quad (5)$$

где  $\alpha$  – коэффициент температуропроводности образца,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $u$  – линейная скорость волны горения,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $L_e$  – длина волны горения,  $\text{м}$ ;  $T_0$  – начальная температура шихты,  $\text{К}$ ;  $T_e$  – максимальная температура горения на температурном профиле,  $\text{К}$ .

**Результаты и обсуждение.** Различают верхний и нижний концентрационный предел распространения волны горения. Нижний предел определяется минимальной концентрацией реагента, ниже которой количество теплоты, выделившееся в месте локального нагрева, недостаточно для протекания реакции во всем объеме. Верхний предел характеризуется максимальной концентрацией реагента, выше которой горение невозможно из-за его недостатка.

Для исследования пределов распространения волны горения использовали две порошковые системы «титан + графит» и «титан + УНМ». УНМ получали методом разрядноимпульсной обработки керосина ТС-1 [11, 12].

Для реализации процесса СВС карбида титана порошки с размером частиц менее 50  $\mu\text{м}$  были смешаны до однородного состояния. Эксперименты проводили при различном содержании углерода в исходной смеси (с избытком или недостатком).

При использовании введенной в иницирующей проводник мощности  $0,1 \text{ МДж}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  волна горения образуется только в системе «титан + УНМ». Зажигание СВС в системе «титан + графит» реализовали при использовании экзотермической добавки – политетрафторэтилена  $(-\text{C}_2\text{F}_4)_n$  15 масс%.

На рис. 3 представлены зависимости средних скоростей горения указанных порошковых систем от молярного содержания углерода. Максимальные значения скорости горения достигаются при горении стехиометрических составов. Отклонение от стехиометрии в сторону уменьшения или увеличения содержания углерода в исходной смеси приводит к уменьшению скорости горения. При этом первый и второй пределы горения достигаются при одинаковой молярной концентрации углерода в исходных смесях.

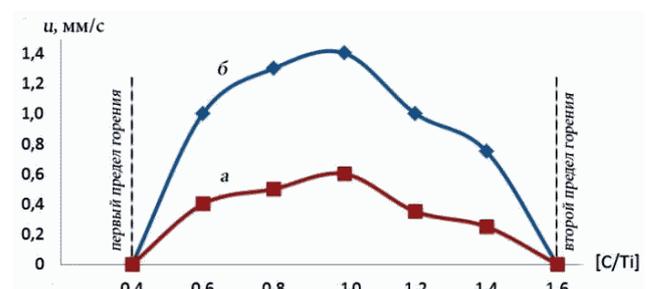


Рисунок 3 – Зависимость средней скорости волны горения от молярного отношения  $[\text{C}]/[\text{Ti}]$  для смесей: а – графит+титан+ $(-\text{C}_2\text{F}_4)_n$ , 15 масс %; б – УНМ+титан

Максимальная скорость волны горения смеси порошков титана, графита и политетрафторэтилена составляет  $0,5 \text{ мм}/\text{с}$ , а смеси титана с УНМ –  $1,4 \text{ мм}/\text{с}$ . При этом критические пределы горения практически совпадают.

Различие средних скоростей волны горения, очевидно, обусловлено более высокой реакционной способностью УНМ по сравнению с графитом.

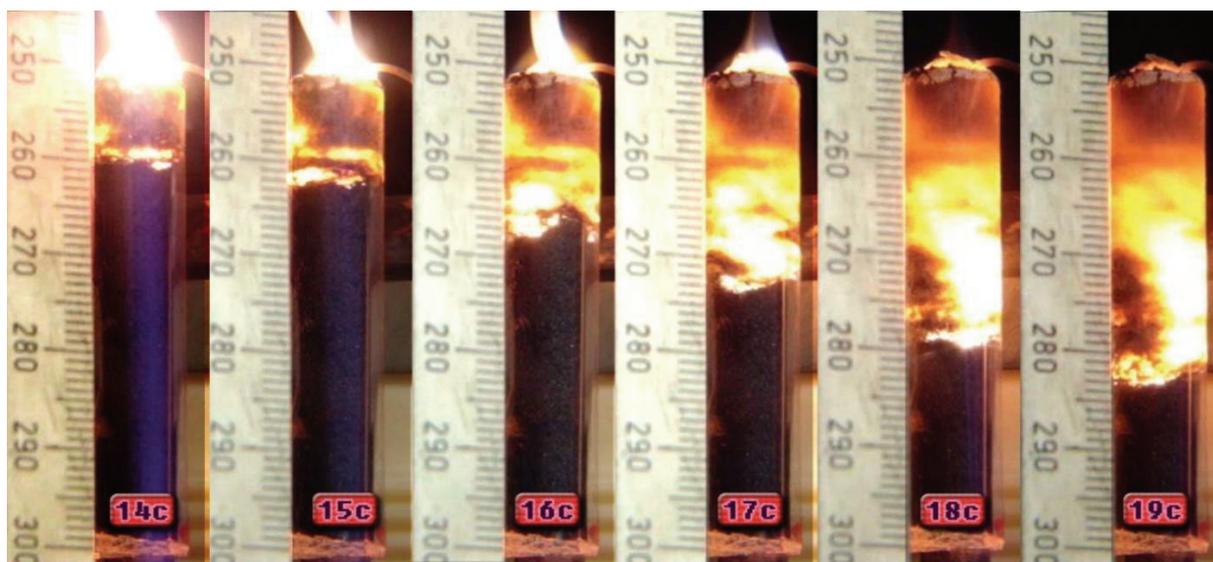
Таким образом, для увеличения скорости волны горения в качестве экзотермической добавки может быть использован политетрафторэтилен.

Для исследования параметров синтеза карбида титана были выбраны две системы: «титан + УНМ» и «титан + УНМ+ $(-\text{C}_2\text{F}_4)_n$  15 масс%».

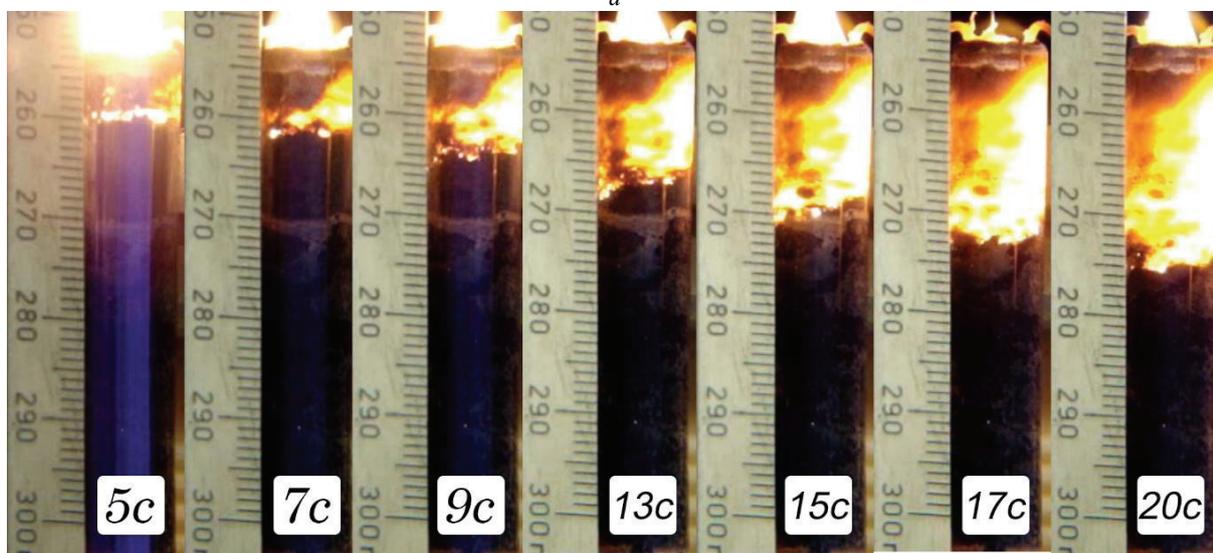
На рис. 4 показаны результаты кадровой иницированных СВС-процессов в указанных смесях порошков, помещенных в кварцевые капсулы с внутренним диаметром 3 мм и длиной 70 мм.

Полученные термограммы горения для указанных систем аналогичны. На рис. 5 представлена термограмма для системы «титан + УНМ». Температурный профиль волн горения в обеих системах имеет резкий подъем от начальной температуры  $T_0$  до конечной  $T_f \approx 3400 \text{ К}$ .

На основании результатов визуализации волн горения и измерения температур в системах «титан + УНМ» и «титан + УНМ+ $(-\text{C}_2\text{F}_4)_n$  15 масс%» были рассчитаны основные параметры, характеризующие процессы СВС карбида титана. Результаты обработки полученных экспериментальных данных и результаты расчетов по формулам (2) – (5) приведены в табл. 1.



а



б

Рисунок 4 – Фотографии процесса СВС в разные моменты времени в системах:  
а – «титан + УНМ», б – «титан + УНМ+(-C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>)<sub>n</sub>15масс%»

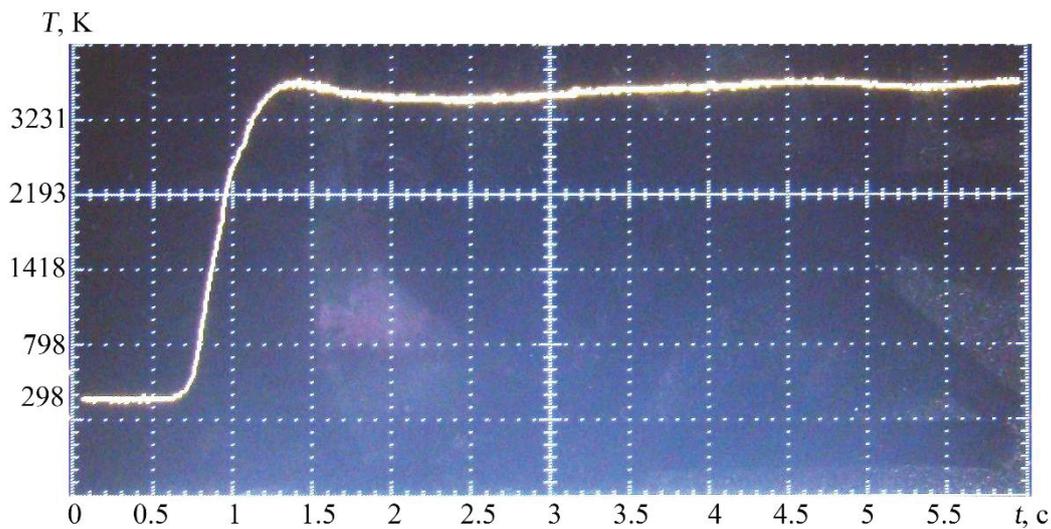


Рисунок 5 – Термограмма горения смеси «титан + УНМ»

Таблица 1 – Параметры процесса СВС

Система	Ti+УНМ	Ti+УНМ + (-C <sub>2</sub> F <sub>4</sub> ) <sub>n</sub> 15масс%
Материал спирали	вольфрам	вольфрам
Диаметр образца $d_{обр}$ , мм	6	6
Длина образца $l_{обр}$ , мм	40	40
Температура зажигания $T_3$ , К	1400	1400
Температура горения $T_r$ , К	3400	3400
Длительность процесса $t_{пр}$ , с	26,7	6,7
Линейная скорость горения $u$ , мм/с	1,5	6,0
Ширина зоны прогрева $x_{пр}$ , мм	1,01	0,23
Общая длина волны $L_w$ , мм	1,3	4,2
Время реакции в волне $t_D$ , с	0,19	0,67
Время нагревания вещества в волне $t_m$ , с	0,67	0,038
Скорость нагревания вещества в волне $W$ , К/с	$4 \cdot 10^3$	$7,2 \cdot 10^4$

Линейная скорость горения системы «титан+УНМ» составляет 1,5 мм/с, ширина зоны прогрева – 1 мм.

Температуры зажигания и горения обеих смесей одинаковые – 1400 и 3400 К, соответственно. Адиабатическая температура горения приблизительно равна температуре плавления продукта (температура плавления карбида титана 3413 К) и превышает температуру плавления титана. Таким образом, в волне горения процесс реагирования идет через растворение углерода в расплаве металла с кристаллизацией фазы карбида из расплава.

В СВС-системе, содержащей экзотермическую добавку – политетрафторэтилен, ширина зоны прогрева уменьшается, а скорость фронта горения увеличивается в 4 раза вследствие значительного роста скорости нагревания вещества в волне.

Результаты рентгенофазового анализа показали, что исходные порошки вступили в СВС-реакции с образованием нанопорошка карбида титана. Таким образом, для получения наноразмерных карбидов целесообразно использовать порошки УНМ, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

**Выводы.** Проведены экспериментальные исследования условий формирования СВС в системах порошков: «титан + графит», «титан + УНМ». Использование в порошковых смесях экзотермической добавки – политетрафторэтилена 15масс% приводит к увеличению скорости СВС- процессов.

Экспериментально определены основные параметры процесса СВС порошковой системы «титан+УНМ» – температура зажигания; линейная скорость горения; ширина зоны прогрева; длина волны и скорость нагревания вещества в волне.

Для получения наноразмерных карбидов целесообразно использовать порошки УНМ, синтезированные методом электроразрядной обработки углеводородов.

#### Список литературы

1. Garret W. Die castable aluminum metal matrix compos-

ites by self-propagating high-temperature synthesis / W. Garret, J. Nuechterlein, I. Jo, A. Munitz, M. J. Kaufman, J. J. Moore // Society of Die Casting Engineers. – 2012. – Vol. 55. – P. 71-78.

2. Garret W. Control of self-propagating high-temperature synthesis derived aluminum-titanium carbide metal matrix composites: PhD thesis / W. Garret // Colorado School of Mines Researches. – Golden: Colorado School of Mines, 2012. – P. 160-170.

3. Bystrzejewski M. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors / M. Bystrzejewski, M. Szala, W. Kicinski, W. Kaszuwara, M.H. Rummeli, T. Gemming, A. Huczko // New Carbon Materials. – 2010. – Vol. 25, № 2. – P. 81-88.

4. Мержанов А.Г. Процессы горения и взрыва в физикохимии и технологии неорганических материалов / А.Г. Мержанов // Успехи химии. – 2003. – Т. 72, № 4. – С. 323-412.

5. Ремпель А.А. Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов / А.А. Ремпель // Успехи химии. – 2007. – Т. 76, № 5. – С. 474-499.

6. Wang T. Activation energy of self-heating process studied by DSC / T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu, J. S. Zhang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2002. – Vol. 70. – P. 507-519.

7. Nuechterlein J. Production of ceramic nanoparticles through self-propagating high-temperature synthesis (SHS) and their introduction into a metallic matrix to form metal matrix composites (MMC) / J. Nuechterlein // Colorado School of Mines Researches. – Golden: Colorado School of Mines, 2013. – P. 76.

8. Самборук А.А. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез микро- и нанопорошков карбида титана из гранулированной шихты: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук: спец. 01.04.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» / А.А. Самборук. – Самара, 2012. – 19 с.

9. Баринов В.Ю. Горение СВС-составов в условиях квазистатического сжатия: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.-мат. наук: спец. 01.04.17 «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» / В.Ю. Баринов. – Черноголовка, 2013. – 17 с.

10. Амосов А. П. Порошковая технология самораспространяющегося высокотемпературного синтеза материалов: Учеб. пособие / А. П. Амосов, И. П. Боровинская, А. Г. Мержанов; под научной редакцией В. Н. Анциферова. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 471 с.

11. Кускова Н.И. Получение углеродных наноматериалов в процессе обработки органических жидкостей / Н.И.Кускова, А.Н.Ющишина, А.П.Малюшевская, П.Л.Цолин, Л.А.Петриченко, А.А.Смалько // Электронная обработка материалов. – 2010. – № 2. – С. 72-76.

12. Патент на винахід № 100467 Україна, МПК (2012.01) C01B 31/06. Спосіб переробки органічних розчинників або їх відходів / О.І.Вовченко, Н.І. Кускова, С.В. Петриченко, Л.З.Богуславський; заявник і патентовласник Ін-т імпульсних процесів і технологій НАН України. – № а 2011 08413; заявл. 04.07.11; опубл. 25.12.12, Бюл. № 24. – 4 с.: ил.

13. Рогачев А. С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетическую / А. С. Рогачев, А. С. Мукасьян. – М.: Физматлит, 2012. – 400 с.

14. Wang T. Activation energy of self-heating process studied by DSC / T. Wang, R. Y. Liu, M. L. Zhu, J. S. Zhang // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2002. – Vol. 70. – P. 507-519.

#### References (transliterated)

1. Garret W., Nuechterlein J., Munitz I. Jo, A., Kaufman

M. J., Moore J. J. Die castable aluminum metal matrix composites by self-propagating high-temperature synthesis. Society of Die Casting Engineers, 2012, vol. 55, pp. 71-78.

2. Garret W. Control of self-propagating high-temperature synthesis derived aluminum-titanium carbide metal matrix composites: PhD thesis. Colorado School of Mines Researches, Golden: Colorado School of Mines, 2012, pp. 160-170.

3. Bystrzejewski M., Szala M., Kicinski W., Kaszuwara W., Rummeli M.H., Gemming T., Huczko A. Self-sustaining high-temperature synthesis of carbon-encapsulated magnetic nanoparticles from organic and inorganic metal precursors. New Carbon Materials, 2010, vol. 25, No 2, pp. 81-88.

4. Merzhanov A.G. Processy gorenija i vzryva v fiziko-himii i tehnologii neorganicheskikh materialov. Uspehi himii, 2003, vol. 72, No 4, pp. 323-412.

5. Rempel' A.A. Nanotehnologii, svojstva i primenenie nanostrukturirovannykh materialov. Uspehi himii, 2007, vol. 76, No 5, pp. 474-499.

6. Wang T., Liu R. Y., Zhu M. L., Zhang J. S. Activation energy of self-heating process studied by DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2002, vol. 70, pp. 507-519.

7. Nuechterlein J. Production of ceramic nanoparticles through self-propagating high-temperature synthesis (SHS) and their introduction into a metallic matrix to form metal matrix composites (MMC). Colorado School of Mines Researches, Golden: Colorado School of Mines, 2013, p. 76.

8. Samboruk A.A. Samorasprostranyayuschijysya vysokotemperaturnyj sintez mikro- i nanoporoshkov karbida titana iz granulirovannoj shihty: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. tehn. nauk: spec. 01.04.17 "Himicheskaya fizika, gorenje i vzryv, fizika ekstremal'nyh sostojanij veschestva". Samara,

2012, 19 p.

9. Barinov V.Yu. Gorenje SVS-sostavov v usloviyah kvazistaticheskogo szhatiya: avtoref. dis. na soisk. uchen. step. kand. fiz.-mat. nauk: spec. 01.04.17 "Himicheskaya fizika, gorenje i vzryv, fizika ekstremal'nyh sostojanij veschestva". Chernogolovka, 2013, 17 p.

10. Amosov A. P., Borovinskaya I. P., Merzhanov A. G. Poroshkovaya tehnologiya samorasprostranyayuschegosya vysokotemperaturnogo sinteza materialov: Ucheb. posobie. Pod nauchnoj redakciej V. N. Anciferova. Moscow: Mashinostroenie-1, 2007, 471 p.

11. Kuskova N.I., Yuschishina A.N., Malyushevskaya A.P., Colin P.L., Petrichenko L.A., Smal'ko A.A. Poluchenie uglerodnyh nanomaterialov v processe obrabotki organicheskikh zhidkostej. Elektronnaya obrabotka materialov, 2010, No 2, pp. 72-76.

12. Patent na vynakhid No 100467 Ukrayina, MPK (2012.01) S01V 31/06. Sposib pererobky orhanichnykh rozchynnykiv abo yikh vidkhodiv. O.I.Vovchenko, N.I. Kuskova, S.V. Petrychenko, L.Z.Bohuslavs'kyj; zayavnyk i patentovlasnyk In-t impul'snykh procesiv i tekhnolohij NAN Ukrayiny. – No a 2011 08413; zayavl. 04.07.11; opubl. 25.12.12, Byul. No 24. 4 p.

13. Rogachev A. S., Mukas'yan A. S. Gorenje dlya sinteza materialov: vvedenie v strukturnuyu makrokinetiku. Moscow: Fizmatlit, 2012, 400 p.

14. Wang T., Liu R. Y., Zhu M. L., Zhang J. S. Activation energy of self-heating process studied by DSC. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2002, vol. 70, pp. 507-519.

Поступила (received) 19.04.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Параметри процесу самопоширюваного високотемпературного синтезу нанодисперсного порошку карбиду титана / А. Ю. Терехов, Н. И. Кускова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 85-90. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нанодисперсного порошка карбида титана / А. Ю. Терехов, Н. И. Кускова // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 85-90. – Бібліогр.: 14 назв. – ISSN 2079-0740.**

**Pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis processes in some powder systems / A. J. Terehov, N. I. Kuskova // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 85-90. – Bibliogr.: 14. – ISSN 2079-0740.**

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

**Терехов Анатолій Юрійович**, – аспірант; Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (093) 764-76-06; email: iiptnan@gmail.com.

**Терехов Анатолій Юрьевич**, – аспірант; Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України (ИИПТ НАНУ), Николаев, тел.: (093) 764-76-06; email: iiptnan@gmail.com.

**Terehov Anatoliy Jurievich** – Postgraduate Student; Institute of Pulse Processes and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Mykolayiv, tel.: (093) 764-76-06; email: iiptnan@gmail.com..

**Кускова Наталія Іванівна** – доктор технічних наук, професор, зав. відділом електрофізичних досліджень Інституту імпульсних процесів і технологій НАН України (ІПТ НАНУ), Миколаїв, тел.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

**Кускова Наталья Ивановна** – доктор технических наук, профессор, зав. отделом электрофизических исследований Института импульсных процессов и технологий НАН Украины (ИИПТ НАНУ), Николаев, тел.: (050) 737-94-52; email: 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, Mykolayiv, tel.: (050) 737-94-52; email: nataljakuskova@mail.ru.

УДК 519.2

**С. П. ШАЛАМОВ****ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ СТЕРЖНЕВОГО И ДИСКОВОГО ШУНТА**

Проведено аналіз конструкцій струмових резистивних перетворювачів, які забезпечують вимір змінних струмів в широкому динамічному (до кількох сотень кілоампер) і частотному діапазонах. Показано підхід до дослідження факторів, що впливають на динамічні характеристики стрижневого і дискового шунтів. Проведено аналіз розподілу температурного поля стрижневого і дискового шунта в програмному пакеті COMSOL Multiphysics. Показано, що температурні поля стрижневого і дискового шунтів має нерівномірний характер через теплоємності матеріалів і вільної конвекції.

**Ключові слова:** електрична модель шунта, стрижневий шунт, дисковий шунт, розподіл температурного поля, розподіл щільності струму, метод кінцевих елементів.

Проведен анализ конструкций токовых резистивных преобразователей, обеспечивающих измерение переменных токов в широком динамическом (до нескольких сот килоампер) и частотном диапазонах. Показан подход к исследованию факторов, влияющих на динамические характеристики стержневого и дискового шунтов. Проведен анализ распределения температурного поля стержневого и дискового шунта в программном пакете Comsol Multiphysics. Показано, что температурные поля стержневого и дискового шунтов имеет неравномерный характер из-за теплоемкости материалов и свободной конвекции.

**Ключевые слова:** электрическая модель шунта, стержневой шунт, дисковый шунт, распределение температурного поля, распределение плотности тока, метод конечных элементов.

This article is dedicated to current sensor using current shunt. Electric current is an important physical quantity and its measurement is required in many applications, be it in industrial, automotive or household fields. Different technical solutions to measure currents are known and are found on the market. This application note is trying to give an overview of measurement device and show their respective advantages and disadvantages. It turns out that due to galvanic isolation between the sensed circuit and the measuring circuitry, current sensor using Hall effect is a good choice for many applications. But current sensor using Hall effect is not a good choice for high current. Rogowsky coil based on the principle of electromagnetic induction has several advantages, such as simplicity of construction, reliability, low cost, no need in a power source and relatively high sensitivity. Rogowsky coil is a good choice when it is impossible to carry out the installation of the shunt. But it has several disadvantages such as a limit of frequency. The next section looks into some aspects for current sensor designs with current shunt sensors, including choices of body types, designs and materials. A current shunt sensor example is presented. This article analyzes a current shunt sensor designed to conduct a pulse current to an electrical device. The current conducted in the current shunt produces heat due to the resistive losses, a phenomenon referred to as Joule heating. The Joule heating effect is described by conservation laws for electric current and energy. Once solved for, the two conservation laws give the temperature and electric field, respectively.

**Keywords:** the electric model of shunt, the core shunt, the shunt disk, the distribution of temperature field, the current density distribution, the finite element method.

**Введение.** При испытаниях различного электроэнергетического оборудования, такого как мощные трансформаторы, силовые размыкатели, коммутаторы, защитные устройства применяют резистивные преобразователи тока. В качестве измерительных преобразователей тока произвольной формы традиционно используются широкополосные импульсные трансформаторы тока, датчики на эффекте Холла, пояс Роговского и резистивные шунты. С помощью трансформаторов тока можно измерять большие токи в широком частотном диапазоне, однако они подвержены влиянию внешних магнитных полей, могут входить в насыщение из-за токов короткого замыкания и имеют сравнительно высокую стоимость. Пояс Роговского требует применения интегрирующего устройства для определения параметров выходного сигнала и имеет узкую полосу передаваемых частот. Перспективными для измерений импульсных и переменных токов остаются датчики Холла, но для них требуются внешние источники питания, и их свойства сильно зависят от температуры.

Наиболее подходящими для измерений больших токов сложной формы являются малоиндуктивные шунты благодаря малой стоимости, высоким метро-

логическим характеристикам и сравнительной простоте изготовления. Шунты обычно имеют сопротивление в диапазоне от 0,1 до 100 мОм, в зависимости от величины тока и значения импеданса цепи, в которую они включаются.

Динамические свойства шунтов зависят от собственной паразитной индуктивности. Такие нежелательные явления как поверхностный эффект и эффект близости также ухудшают характеристики шунта. Применение коаксиальной конструкции резистивного элемента шунта позволяет устранить проявление эффекта близости, повысить помехоустойчивость, уменьшить собственную индуктивность. Поэтому коаксиальные шунты могут обеспечить потенциально более высокие динамические характеристики по сравнению с другими видами шунтов. Помимо этого, для измерения импульсных токов большой амплитуды необходимо учитывать выделение тепла в резистивном элементе. Например, дисковые, кольцевые и трубчатые шунты не могут обеспечить возможность естественного охлаждения в отличие от стержневого шунта [1].

**Цель статьи.** Целью данной статьи является исследование температурного поля стержневого и дис-

кового шунтов с помощью разработки модели в программном пакете Comsol.

**1. Электрическая модель шунта переменного тока.** При расчете шунтов важно определить оптимальные размеры и рационально выбрать материал резистивного элемента, поскольку от этого будет зависеть метрологические характеристики шунта. Геометрические параметры резистивного элемента определяются исходя из максимального тока и, следовательно, мощность рассеиваемого им тепла.

Шунт переменного тока описывается стандартной электрической моделью, состоящей из активного сопротивления  $R_{ш}$ , индуктивности  $L$  и емкости  $C$  (див. рис. 1).

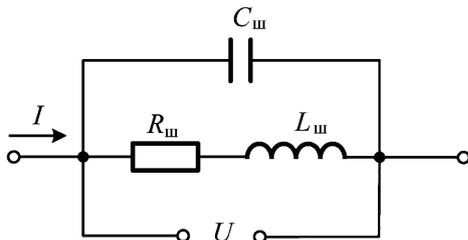


Рисунок 1 – Электрическая модель шунта переменного тока

Комплексный коэффициент преобразования  $Z$  шунта определяется выражением [2]:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = R_{ш} + j\omega L = ze^{j\varphi}, \quad (1)$$

где  $\omega L$  – реактивная составляющая, вызванная влиянием остаточного магнитного поля;  $z$  – модуль коэффициента преобразования шунта;  $\varphi$  – угол фазового сдвига между векторами тока  $I$  и напряжения  $U$ .

Отношение комплексного коэффициента преобразования  $Z$  к активному сопротивлению  $R_{ш}$  (на постоянном токе) можно представить в виде [2]:

$$\frac{\dot{Z}}{R_{ш}} = 1 + \frac{R_{ш}}{\Delta R} + j\Psi, \quad (2)$$

где  $R_{ш}/\Delta R$  – относительная активная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта  $Z$ , вызванная влиянием паразитных эффектов;  $\Delta R$  – приращение активного сопротивления за счет проявления паразитных эффектов (поверхностного эффекта и эффекта близости);  $\Psi$  – реактивная составляющая погрешности, учитывающая изменение комплексного коэффициента преобразования шунта  $Z$ , вызванная влиянием паразитного магнитного поля.

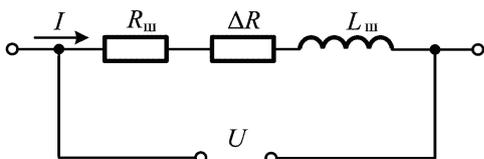


Рисунок 2 – Электрическая модель шунта

В соответствии с выражением (2) общая модель принимает вид, представленный на рис. 2. Соответст-

вующая ей векторная диаграмма шунта показана на рис. 3 [2].

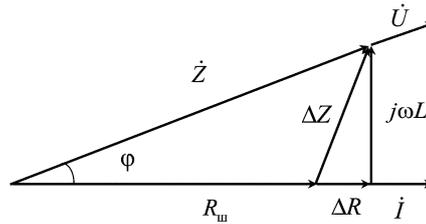


Рисунок 3 – Векторная диаграмма шунта

Эквивалентная схема шунта с учетом измерительного кабеля и входных параметров электронного осциллографа приведена на рис. 4, где  $Z_0$  – волновое сопротивление измерительного кабеля,  $R_{ш}$  – сопротивление шунта,  $L_{ш}$  – индуктивность шунта,  $C_r$  – входная емкость осциллографа,  $R_r$  – входное сопротивление осциллографа. Поскольку  $R_r = 1$  Мом, его можно не учитывать при расчетах.

Дифференциальное уравнение для выходного напряжения шунта имеет вид [1]:

$$\frac{d^2 U_C(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \frac{d U_C(t)}{dt} + \omega^2 \cdot U_C(t) = \frac{R}{L \cdot C} \cdot J(t) + \frac{1}{C} \frac{d J(t)}{dt}; \quad (3)$$

$$\delta = \frac{R + Z_0}{2L}, \quad (4)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}, \quad (5)$$

где  $U_C(t)$  – напряжение на емкости;  $J(t)$  – измеряемый ток.

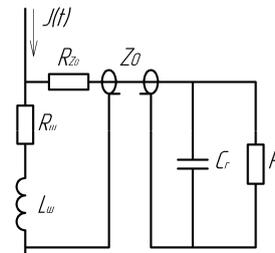


Рисунок 4 – Эквивалентная схема измерений

Решение дифференциального уравнения при нулевых начальных условиях имеет вид [1]:

$$U_C(t) = \frac{R - Z_0}{\omega^2 \sqrt{\delta^2 - \omega^2}} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta \cdot (t-z)} \cdot \sinh(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)) \cdot dz + \frac{1}{C} \int_0^t J(z) \cdot e^{-\delta \cdot (t-z)} \cdot \cosh(\sqrt{\delta^2 - \omega^2} \cdot (t-z)) \cdot dz. \quad (6)$$

Исследование передаточных свойств шунта методом переходной характеристики затруднено. Если предположить, что измеряемый ток имеет вид единичного скачка, за счет индуктивного падения напряжения получим напряжение с огромным выбросом.

Для анализа передаточных свойств шунта прямоугольный импульс тока заменяется импульсом с конечной длительностью фронта [3]. Аналитическое выражение для такого импульса имеет вид:

$$J(t) = A \cdot e^{-\alpha t} - B \cdot e^{-\beta t}. \quad (7)$$

Для импульса с  $A = 1$ ,  $B = 1$ ,  $\beta = 0,8 \cdot 10^7$ , график которого приведен на рис. 5 (кривая 1), время нарастания импульса составляет  $T_{\Phi(0,1+0,9)} = 275$  нс.

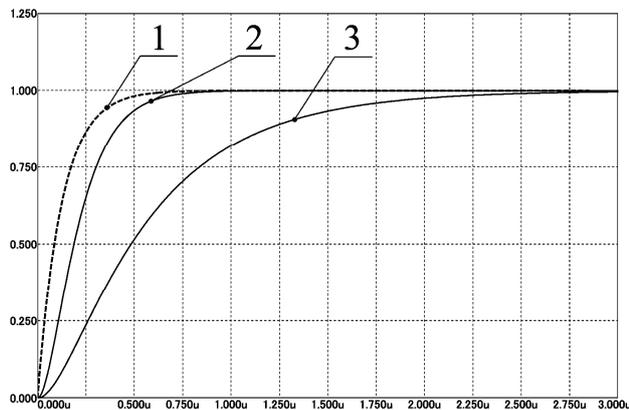


Рисунок 5 – Рассчитанная характеристика шунта: 1 – импульс тока; 2 – реакция шунта,  $L_{ш} = 10$  нГ; 3 – реакция шунта,  $L_{ш} = 50$  нГ; масштаб по вертикали – относительные единицы; масштаб по горизонтали – 200 нс/клетка

Время нарастания напряжения на экране осциллографа составляет: 1) для  $L_{ш} = 10$  нГ  $T_{(0,1+0,9)} = 380$  нс; 2) для  $L_{ш} = 50$  нГ  $T_{(0,1+0,9)} = 1,16$  мкс.

**2. Область применения.** Шунт предназначен для измерения с погрешностью до 10 % апериодических грозовых импульсов тока. Согласно [4-8] временная форма таких испытательных импульсов тока должна соответствовать  $\tau_f/\tau_p = 10 \text{ мкс}/350 \text{ мкс}$ , где  $\tau_f$ ,  $\tau_p$  – соответственно длительность фронта (с допуском  $\pm 20$  %) и длительность импульса (с допуском  $\pm 10$  %) тока с амплитудой  $I_m = \pm(100-200)$  кА (с допуском  $\pm 10$  %). Существуют [1-5] четыре степени жесткости испытаний технических объектов на молниестойкость. Для каждого уровня жесткости указаны амплитудно-временные параметры испытательного импульса тока [1-5]: I уровень –  $I_m = \pm 200$  кА (с допуском  $\pm 10$  %); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 10 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35$  %); протекший заряд  $q = \pm 100$  Кл (с допуском  $\pm 20$  %); II уровень –  $I_m = \pm 150$  кА (с допуском  $\pm 10$  %); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 5,6 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35$  %); протекший заряд  $q = \pm 75$  Кл (с допуском  $\pm 20$  %); III-IV уровни –  $I_m = \pm 100$  кА (с допуском  $\pm 10$  %); удельная энергия (интеграл действия тока молнии)  $J = 2,5 \cdot 10^6$  А<sup>2</sup>·с (с допуском  $\pm 35$  %); протекший заряд  $q = \pm 50$  Кл (с допуском  $\pm 20$  %).

**3. Результаты численного моделирования.** Температурное поле коаксиального шунта описывается сложными дифференциальными уравнениями, получение аналитического решения которых вызывает затруднения, особенно при рассмотрении трехмерного случая. В настоящее время существуют программные

продукты, позволяющие провести расчеты распределения температурного поля резистивных шунтов. Была выбрана программа Comsol Multiphysics, которая реализует метод конечных элементов, позволяющая рассчитать тепловое поле шунта, имеющего сложную геометрию. Основными этапами расчета в программном комплексе Comsol Multiphysics являются: 1) построение геометрии исследуемого объекта; 2) ввод свойств материалов; 3) формирование граничных условий; 4) генерация сетки конечных элементов; 5) проведение расчета; 6) визуализация и анализ результатов.

В программном комплексе Comsol Multiphysics определение джоулева тепла проводится посредством модуля расчета электрических параметров Джоулев нагрев с использованием модуля *Time Dependent*. Явление Джоулева нагрева описывается законами сохранения электрического заряда и энергии. После решения уравнений по этим двум законам будут получены параметры температуры. Построение геометрии конструкции коаксиального шунта возможно с помощью встроенного модуля. Также возможен импорт готовой геометрии. Граничными условиями являются значение постоянного тока, приложенного к токовому выводу, и нулевое значение потенциала на выводе заземления. Вторым граничным условием при расчете температурного поля является часть поверхности шунта, подверженная естественному охлаждению, которое осуществляется за счет свободного перемещения воздуха в окружающей среде. Таким образом, в качестве второго граничного условия выбрана вся внешняя поверхность моделируемого шунта. При разбиении расчетной области на конечные элементы в процессе исследования температурного поля коаксиального шунта использовалась стандартная сетка, для которой был задан размер конечных элементов 0,01. При этом число расчетных узлов (Nodes) составило 111751, число элементов (Elements) – 19653, что позволило достичь приемлемого качества решения. Конструкция исследуемого стержневого шунта представлена на рис. 6.

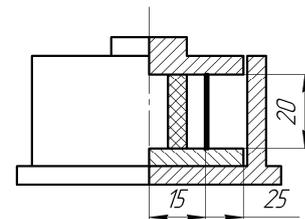


Рисунок 6 – Конструкция исследуемого стержневого шунта

При моделировании были добавлены свойства материалов – нихрома и меди. Сгенерированная сетка конечных элементов модели шунта представлена на рис. 7.

Определение джоулева тепла и распределения температурного поля осуществлялось для всей поверхности шунта. Визуализация результата расчета джоулева тепла для конструкции шунта представлена на рис. 8 (показан разрез шунта без внешнего корпуса). Темная область имеет максимальную температуру.

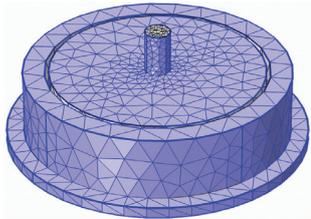


Рисунок 7 – Сгенерированная сетка стержневого шунта

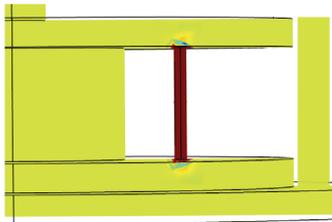


Рисунок 8 – Распределение температурного поля шунта

Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 100 кА и сопротивлении резистивного элемента  $R_{ш} = 280$  мкОм в зависимости от времени представлено на рис. 9. Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 150 кА представлено на рис. 10.

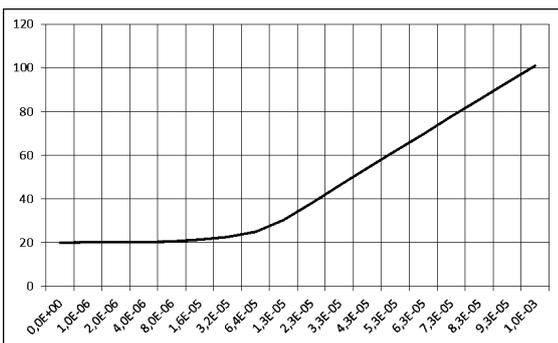


Рисунок 9 – Распределение температурного поля шунта при токе 100 кА

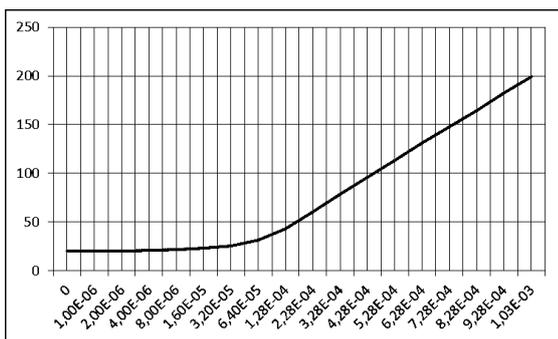


Рисунок 10 – Распределение температурного поля шунта при токе 150 кА

Температура имеет максимальное значение в центре резистивной проволоки. Распределение плотности тока приведено на рис. 11. Светлая область имеет максимальную плотность тока.

Конструкция стержневого шунта типа «белочье колесо» приведен на рис. 12. Шунт состоит из трех пластин круглой формы, между которыми установлены резисторы по схеме параллельного включения.

Такая конструкция шунта позволяет минимизировать паразитные индуктивности и емкости; взаимную индуктивность между цепями тока и напряжения; токи утечки и другие. Основное достоинство шунтов конструкции «белочье колесо» в том, что они способны рассеивать большие мощности и используются для измерений переменных токов до десятков и сотен килоампер. Недостатками такой конструкции при измерении больших токов являются большие габаритные размеры и проявление поверхностного эффекта даже при промышленных частотах.

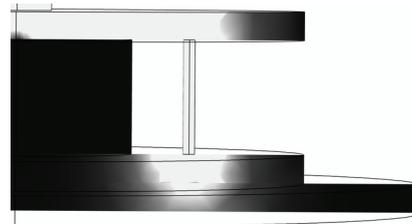


Рисунок 11 – Распределение температурного поля стержневого шунта

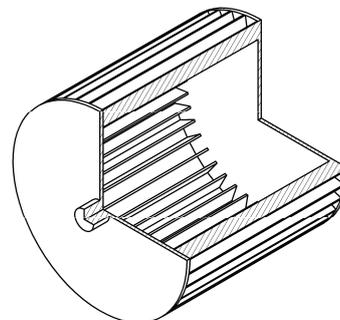


Рисунок 12 – Конструкция исследуемого дискового шунта

Распределение температурного поля стержневого шунта приведено на рис. 13 (Максимальная температура в светлой области).

Расчет максимальной температуры конструкции шунта при токе 200 кА и сопротивлении резистивного элемента  $R_{ш} = 280$  мкОм в зависимости от времени представлено на рис. 14.



Рисунок 13 – Распределение температурного поля шунта

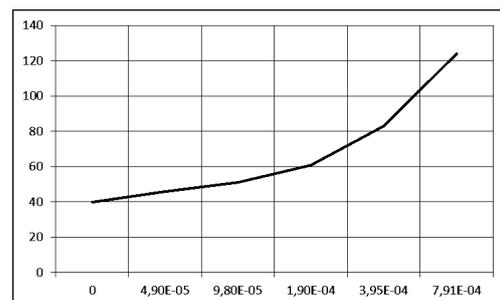


Рисунок 14 – Распределение температурного поля шунта при токе 100 кА

Конструкция исследуемого дискового шунта представлена на рис. 15.

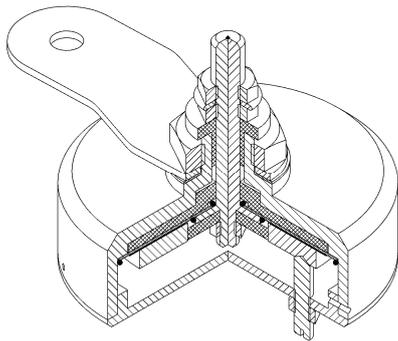


Рисунок 15 – Конструкция исследуемого дискового шунта

Визуализация результата расчета джоулева тепла (сечение резистивной пластины, 1/4 диска) представлена на рис. 16. Светлая область имеет максимальную температуру.



Рисунок 16 – Распределение температурного поля дискового шунта на резистивной пластине

Расчеты были проведены при воздействии постоянного тока. В итоге получена зависимость изменения температуры от времени. Если ток через шунт является периодическим импульсным, благоприятный режим для шунта, с точки зрения охлаждения, обеспечивается при периоде следования импульсов, равном времени охлаждения шунта до его первоначальной температуры. Если же шунт не успевает охладиться до первоначальной температуры, то для каждого следующего импульса начальной температурой является температура, до которой шунт охладится после окончания действия предыдущего импульса. Такой кумулятивный процесс происходит до тех пор, пока не наступит квазистационарное состояние температуры, когда повышение температуры за время действия импульса становится равным температуре, полученной за период следования. При периодическом импульсном сигнале с указанными выше параметрами квазистационарное состояние температуры не было получено из-за ограниченных возможностей используемого персонального компьютера.

**Выводы.** При протекании электрического тока равномерное теплоты в резистивном элементе шунта приводит к его неравномерному нагреву. Максимальная температура нагрева для стержневого шунта имеет место в центре резистивного элемента и уменьшается к краям. Это обусловлено наличием естественной

конвекции и теплоемкости используемых материалов. Максимальная температура нагрева для дискового шунта имеет место в области ввода тока в резистивный элемент. Неравномерный нагрев резистивного элемента шунта нежелателен, поскольку неравномерность температурного поля вызывает внутренние механические напряжения в резистивном элементе при изменении значения тока в шунте, приводя к нелинейному характеру зависимости комплексного коэффициента преобразования шунта от температуры.

Результаты моделирования показывают, что стержневые шунты с резистивным элементом в виде проволоки применимы для измерения токов амплитудой до 100 кА, несмотря на то, что они имеют возможность естественного охлаждения. Резистивный элемент дискового шунта не имеют возможности охлаждаться естественным путем, поэтому для обеспечения теплоотвода, при измерении импульсов большой амплитуды, необходимо принимать дополнительные меры.

#### Список литературы

1. Донец С.Е. Стержневой шунт для измерения сильных токов микросекундной длительности / С.Е. Донец, В.В. Леденев, В.В. Литвиненко // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 44. – С. 39–44.
2. Бедарева Е.В. Исследование распределения температурного поля коаксиального шунта методом конечных элементов / Е.В. Бедарева, Е.В. Костин // Известия Томского политехнического университета. – 2013. – Т. 322. – № 4. – С. 159-164
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / А.Шваб. - М.: Энергоатомиздат, 1983. – 264 с.
4. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".
5. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".
6. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3: Physical damage to structures and life hazard".
7. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".
8. Национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ Р МЭК 62305-1-2010. "Менеджмент риска. Защита от молнии. Часть 1: Общие принципы". – М.: Стандартинформ, 2011. – 46 с.

#### References (transliterated)

1. Donec S.E. V.V. Ledenev, V.V. Litvinenko Sterzhnevoj shunt dlja izmerenija sil'nyh tokov mikrosekundnoj dlitel'nosti [Shunt for measuring low currents of microsecond duration]. Visnyk NTU "KhPI" [Bulletin of the National Technical University "KhPI"]. Available at: <http://vestnik.kpi.kharkov.ua>.
2. Bedareva E.V., Kostin E.V. Issledovanie raspredelenija temperaturynogo polja koaksial'nogo shunta metodom konechnyh jelementov [The study of the temperature field distribution of the coaxial shunt finite element method] Visnyk of Tomsk polytechnic university [Bulletin of the Tomsk polytechnic university]. Available at: <http://tpu.ru>. (Rus).
3. Shvab A. Izmerenija na vysokom naprjazhenii [High voltage measuring]. Moscow, Jenergoatomizdat Publ., 1983, 264 p.
4. IEC 62305-1: 2010 "Protection against lightning. Part 1: General principles".
5. IEC 62305-2: 2010 "Protection against lightning. Part 2: Risk management".
6. IEC 62305-3: 2010 "Protection against lightning. Part 3:

Physical damage to structures and life hazard".

7. IEC 62305-4: 2010 "Protection against lightning. Part 4: Electrical and electronic systems within structures".

8. Nacional'nyj standart Rossijskoj Federacii GOST R MEK 62305-1-2010. "Menedzhment riska. Zashhita ot molnii.

Chast' 1: Obshhie principy" [National Standard of the Russian Federation GOST R IEC 62305-1-2010. Risk management. Protection from lightning. Part 1: General principles]. Moscow, Standartinform Publ., 2011, 46 p. (Rus).

Поступила (received) 07.11.2016

*Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions*

**Дослідження температурного поля стрижневого і дискового шунта / С. П. Шаламов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

**Исследование температурного поля стержневого и дискового шунта / С. П. Шаламов** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

**A study of the temperature field of the rod shunt and disk shunt / S. P. Shalamov** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016. – № 36 (1208). – С. 91-96. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

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

**Шаламов Станіслав Павлович** – аспірант, молодший науковий співробітник, Національний технічний університет «ХПІ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

**Шаламов Станіслав Павлович** – аспірант, младший научный сотрудник, Национальный технический университет «ХПИ»; тел.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

**Shalamov Stas Pavlovich** – Postgraduate Student, Research Assistant, National Technical University "KhPI"; tel.: 066-62-60-187; e-mail: shalamov.stas@mail.ru.

## ЗМІСТ

<b>Бакларь В. Ю., Кускова Н. И., Челпанов Д. И.</b> Фазовые траектории углерода в процессе высокоэнергетических режимов электровзрыва графитового проводника . . . . .	5
<b>Баранов М.И.</b> Новый принцип согласования длинной линии передачи импульсов электрического напряжения и тока с нагрузкой . . . . .	9
<b>Вінниченко Д. В.</b> Визначення параметрів елементів захисту високовольтного випрямляча зарядного пристрою в генераторах імпульсних струмів . . . . .	15
<b>Денисюк Т. Д., Рачков А. Н.</b> Электроразрядная технология – перспективный путь получения гуминовых веществ . . . . .	19
<b>Журахівський А.В., Ліщак І.В., Бінкевич Т.В.</b> Дослідження впливу миттєвого значення робочої напруги на оцінку надійності грозозахисту повітряних ліній . . . . .	23
<b>Князєв В.В.</b> Оновлення національних стандартів в сфері електромагнітної сумісності . . . . .	28
<b>Коваленко А. А., Сизоненко О. Н.</b> Метод уменьшения всплеска напряжения на выходных диодах Шоттки устройства искроплазменного спекания дисперсных композиций . . . . .	31
<b>Колушико Г. М., Пличко А. В., Понуждаева Е. Г.</b> Создание установки для испытания масла УИМ – 90, этапы ее модернизации . . . . .	37
<b>Коробко А.И., Коробко З.И.</b> Определение коэффициента отражения от открытой апертуры биконической антенны и регулярного ТЕМ рупора симметричного типа в частотном и временном представлении методом имитационного моделирования . . . . .	42
<b>Кускова Н. И., Петриченко С. В., Цолин П. Л., Бакларь В. Ю.</b> Влияние режимов ввода электрической энергии на выход углеродных нанопорошков из органических соединений в процессе их электроразрядной обработки . . . . .	46
<b>Кускова Н. И., Рудь А. Д., Петриченко С. В., Челпанов Д. И., Цолин П. Л.</b> Электрофизические свойства углеродных наноматериалов . . . . .	52
<b>Листовский Д. И., Петриченко С. В.</b> Оптимизация режимов электроискрового диспергирования металлических гранул в жидкости по распределению энергии, выделившейся в элементах разрядной цепи . . . . .	58
<b>Назарова Н. С., Вінниченко Д. В., Козирєв С. С., Овчиннікова Л. Є., Чущак С. В.</b> Узагальнена модель керування технологічним процесом електророзрядного синтезу нановуглецю . . . . .	66
<b>Рудаков В.В., Коробко А. А.</b> Влияние температуры и барометрического давления на метрологические характеристики резонансного метода диэлькометрии эмульсии типа вода – неполярный диэлектрик . . . . .	70
<b>Судаков Б. Н., Иванова М. В., Блажей А. С.</b> Подход к разработке лингвистического обеспечения экспертной системы . . . . .	74
<b>Хвоцан О. В.</b> Исследование температурного режима работы зарядного блока электроразрядных погружных устройств . . . . .	78
<b>Терехов А. Ю., Кускова Н. И.</b> Параметры процесса самораспространяющегося высокотемпературного синтеза нанодисперсного порошка карбида титана . . . . .	85
<b>Шаламов С. П.</b> Исследование температурного поля стержневого и дискового шунта . . . . .	91

## CONTENTS

<b>Baklar V.Yu., Kuskova N.I., Chelpanov D.I.</b> Phase trajectories of carbon in the process of high-energy modes electroexplosion graphite conductor . . . . .	5
<b>Baranov M.I.</b> New principle of concordance of long tl impulses of electric voltage and current with loading . . . . .	9
<b>Vinnichenko D.V.</b> Determining the parameters protection elements of high voltage rectifier in charger devices pulse current generators . . . . .	15
<b>Denisyuk T. D., Rashkov A. N.</b> Electric cooking technology is a perspective method of humic substances making . . . . .	19
<b>Zhurahovskiy A.V., Lishchak I.V., Binkevych T.V.</b> Research of influence of the instantaneous value of the operating voltage to the evaluation of there liability of lightning protection of overhead lines . . . . .	23
<b>Kniaziev V.V.</b> Updating national standards in the field of electromagnetic compatibility . . . . .	28
<b>Kovalenko O.O., Syzonenko O.M.</b> Method of reducing surge voltage applied to the output Schottky diodes of devices for spark plasma sintering of dispersed compositions . . . . .	31
<b>Koliushko G.M., Plichko A.V., Ponuzhdayeva H.G.</b> Oil testing machine OTM – 90 development, it's upgrading stages . . . . .	37
<b>Korobko A. I., Korobko Z. I.</b> Determination of the coefficient of reflection from the open aperture biconical antenna and regular TEM horn symmetrical type in the frequency and time representation by simulation method . . . . .	42
<b>Kuskova N.I., Petrichenko S.V., Tsolin P.L., Baklar V.Yu.</b> Influence of electric energy input modes on the yield of carbon nanopowders from organic compounds in the process of electrical discharge treatment . . . . .	46
<b>Kuskova N.I., Rud A.D., Petrichenko S.V., Chelpanov D.I., Tsolin P.L.</b> Electrical and physical properties of carbon nanomaterials . . . . .	52
<b>Listovskii D.I., Petrichenko S.V.</b> Electrospark dispersion of metal granules regimes' optimization on distribution of energy released in discharge circuit elements . . . . .	58
<b>Nazarova N.S., Vinnichenko D.V., Kozyrev S.S., Ovchinnikova L.Y., Chushchak S.V.</b> Generalized model of control process of an electric-discharge synthesis of nanocarbon . . . . .	66
<b>Rudakov V.V., Korobko A.A.</b> Effect of temperature and barometric pressure in the metrological characteristics of the resonance method dielkometrii water emulsion type - non-polar dielectric . . . . .	70
<b>Sudakov B.M., Ivanova M.V., Blazhej A.S.</b> The approach to lingware development of expert system . . . . .	74
<b>Khvoshchan O.V.</b> The research of the temperature mode of the charging unit of electric submersible devices . . . . .	78
<b>Terehov A.J., Kuskova N.I.</b> Pulse discharge initiation of self-propagating high-temperature synthesis processes in some powder systems . . . . .	85
<b>Shalamov S.P.</b> A study of the temperature field of the rod shunt and disk shunt . . . . .	91

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Збірник наукових праць

Серія:

Техніка та електрофізика високих напруг

№ 36 (1208) 2016

Науковий редактор: д-р техн. наук, проф. В. І. Кравченко  
Технічний редактор: канд. фіз.-мат наук, ст. наук. співр. Л. В. Ваврів  
Відповідальний за випуск: канд. техн. наук Г. Б. Обухова

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21.  
НТУ «ХПІ». НДПКІ «Молнія».  
Тел. (057) 707-63-09. E-mail: vavriv@rambler.ru

Обл.-вид № 27-16.

Підп. до друку 11.11.2016 р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.  
Друк офсетний. Гарнітура Таймс. Умов. друк. арк. 9,75. Облік.-вид. арк. 10.  
Тираж 300 пр. 1-й завод 1-100. Зам. № 23. Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію суб'єкта видавничої  
справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.  
61002, Харків, віл Фрунзе, 21

---

Друкарня ВАТ «Цифра Прінт».

Свідоцтво про Державну реєстрацію А01 № 432705 від 03.08.2009 р.  
Адреса: 61166, м. Харків, вул. Данилевського, 30

---