

DOI 10.15589/jnn20160105

УДК 669.017

П50

## DETERMINATION OF SPRING ELEMENTS CHARACTERISTICS USING SHAPE MEMORY EFFECT DURING THERMOMECHANICAL IMPACT

### АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТА ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ВЕКТОРУ СТАНУ ЕЛЕКТРОРОЗРЯДНОГО СИНТЕЗУ ВУГЛЕЦЕВИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

**Leonid Z. Boguslavskyi**

dpes@iippt.com.ua

ORCID: 0000-0001-6738-1889

**Larisa Ye. Ovchinnikova**

lora947@gmail.com

ORCID: 0000-0003-0421-9731

**Serhiy S. Kozyrev**

skozyrev@gmail.com

ORCID: 0000-0003-1725-1415

**Л. З. Богуславський**зав. відділу імпульсних електротехнічних систем, канд. техн. наук, доц.<sup>1,2</sup>**Л. Є. Овчиннікова**кандидат технічних наук, доц.<sup>1,2</sup>**С. С. Козирєв**кандидат технічних наук, доц.<sup>2</sup><sup>1</sup>*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*<sup>2</sup>*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*<sup>1</sup>*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв*<sup>2</sup>*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, Миколаїв*

**Abstract.** The analysis of mathematical models of synthesis of allotropic form of nanocarbons was done. The goal of the analysis was to determine factors which influence synthesis. As a result, the coordinates of state vector were defined along with their acceptable ranges for providing a required level of synthesis productivity. The following coordinates of state vector were proposed:  $T$  — temperature,  $p$  — pressure,  $W$  — energy. The observable coordinates of electro-discharge synthesis of carbon nanomaterials are:  $U$  — voltage,  $I$  — current,  $P$  — power,  $f$  — pulse frequency. The controlling coordinate, which allows altering the electro-discharge synthesis mode, is a discharge gap length  $l$ .

**Keywords:** : mathematical model; state vector; coordinates; productive mode; carbon nanomaterials synthesis.

**Аннотация.** Проведен анализ математических моделей синтеза аллотропных форм нанок углерода с целью выявления факторов, влияющих на результат синтеза, значения которых могут быть приняты в качестве координат вектора состояния процесса электроразрядного синтеза углеродных наноматериалов как объекта управления. Определены информационные координаты и канал управляющих воздействий, что позволит построить модель управления процессом с целью обеспечения продуктивного режима синтеза углеродных наноматериалов.

**Ключевые слова:** математическая модель; вектор состояния; координаты; продуктивный режим; синтез углеродных наноматериалов; объект управления.

**Анотація.** Проведено аналіз математичних моделей синтезу алотропних форм нановуглецю з метою виявлення факторів, що впливають на результат синтезу, значення яких можуть бути прийняті в якості координат вектору стану процесу електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів як об'єкта керування. Визначено інформаційні координати та канал керуючих впливів, що дозволить побудувати модель керування процесом з метою забезпечення продуктивного режиму синтезу вуглецевих наноматеріалів.

**Ключові слова:** математична модель; вектор стану; координати; продуктивний режим; синтез вуглецевих наноматеріалів; об'єкт керування.

## REFERENCES

- [1] Boguslavskiy L. Z., Rud A. D., Kiryan I. M., Nazarova N. S., Vinnichenko D. V. *Svoystva uglerodnykh nanomaterialov, poluchennykh iz gazoobraznogo syrya s pomoshchyu vysokochastotnoy razryadno-impulsnoy obrabotki* [The properties of carbon nanomaterials produced from gaseous feed using a high-frequency pulse-dis-

- charge machining]. *Elektronnaya obrabotka materialov — Electronic processing of materials*, 2015, № 51 (2), pp. 1–7.
- [2] Krestinin A. V. *Obrazovanie sazhevykh chastits kak protsess khimicheskoy kondensatsii polinonov* [The formation of soot particles as the chemical condensation process of polyenes]. *Khimicheskaya fizika — Chemical physics*, 1998, T. 17, №. 8. pp. 41–56.
- [3] Levterov A. M., Levterova L. I. *Analiz matematicheskikh modeley mekhanizma sazheobrazovaniya pri szhigani uglevodorodnykh topliv* [Analysis of mathematical models of the mechanism of soot formation during combustion of hydrocarbon fuels], *Visnyk NTU «KhPI»* [Bulletin of National Technical University «Kharkiv Politechnic Institute»], 2013. issue 5 (979). pp. 130–141.
- [4] Surovikin V. F. *Analiticheskoe opisaniye protsessov zarodysheobrazovaniya i rosta chastits sazhi pri termicheskom razlozhenii aromaticheskikh uglevodorodov v gazovoy faze* [Analytical description of the processes of nucleation and growth of soot particles by thermal decomposition of aromatic hydrocarbons in the gas phase] *Khimiya tverdogo topliva — Solid Fuel Chemistry*, 1976, issue № 1. pp. 111–122.
- [5] Surovikin V. F., Tesner P. A. *Obrazovanie sazhi pri razlozhenii uglevodorodov v vysokotemperaturnom potoke produktov polnogo sgoraniya* [Soot formation in the decomposition of hydrocarbons in a high flow of complete combustion products]. *Gazovaya promyshlennost — Gas industry*, 1965. issue 5. pp. 44–50.
- [6] Bartelmess J., Giordani S. Carbon nano-onions (multi-layer fullerenes): chemistry and applications. *Beilstein J Nanotech*, 2014, Vol. 5, pp. 1980–1998.
- [7] Fusco A., Knox-Kelecy A., Foster D. Application of a Phenomenological Soot Model to Diesel Engine Combustion. *International Symposium Commodia*. Tokyo, 1994, pp. 571–576.
- [8] Heywood J. B. *Internal Combustion Engine Fundamental*. New York: McGraw. Hill, 1988. 930 p.
- [9] Hiroyasu H., Kadota T., Arai M. Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions (part. 1). *Bulletin of the JSME*. 1983, Vol. 26, № 214. P. 569–575.
- [10] Kuznetsov V. L., Chuvilin A. L., Butenko Y. V., Mal'kov I. Yu., Titov V. M. Onion-like carbon from ultra-disperse diamond. *Chem. Phys Lett*. 1994, Vol. 222, pp. 343–348.
- [11] Santoro R. The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames / R. Santoro, T. Yeh, J. Horvath // *Combustion Science and Technology*, 1987, Vol. 53, pp. 89–115.
- [12] Surovikin V. F., Shaitanov A. Formation and growth of dispersed carbon particles during pyrolysis of ethylene, benzene, and naphthalene in a reflected shock wave. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, Vol. 43, №4. pp. 442–448.

## ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Дослідження процесу утворення нановуглецю з вуглецевмісних газів представляє складну, але вкрай важливу задачу, так як має велике практичне значення. Вуглецеві наноматеріали досить різноманітні в залежності від своєї структури. Серед різноманітності вуглецевих наноматеріалів заслуговує на увагу аморфний вуглець з onion-like структурою, який відзначається особливими електрофізичними властивостями. Аморфний нановуглець з розмірами часток від 2 нм до 150 нм або в технологічній термінології технічний нановуглець - важлива технологічна сировина, яка широко використовується в світовому масштабі. Метод високочастотного електророзрядного синтезу аморфного нановуглецю з вуглецевмісних газів дає змогу отримувати його в промислових масштабах [1]. Для реалізації методів синтезу в умовах промислового виробництва необхідно забезпечити керованість процесу. Тому виникає потреба в дослідженні процесу синтезу як об'єкта керування на основі вивчення наукових основ, фізико-технічних принципів та аналізу моделей реалізації високочастотного методу синтезу аморфного нановуглецю з вуглецевмісних газів.

## АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Дотепер не існує загальноприйнятної теорії утворення структур вуглецевих наночасток, відповідно і моделі процесу. Видатні фахівці в галузі виробництва технічного нановуглецю Суровікін В. Ф., Теснер П. А., Крестінін А. В., Зуєв В. П., Frenklach M., Nagle J., Vockhorn H. та інші внесли значний внесок у розуміння процесу утворення нановуглецю, досягнуто певного прогресу в області розуміння механізмів утворення наночасток вуглецю. Відомо кілька гіпотез, але встановлення детального механізму утворення нановуглецю як і раніше залишається важливою фундаментальною проблемою науки, природа технічного нановуглецю залишається предметом інтенсивних досліджень.

**МЕТА СТАТТІ** дослідити складні фізико-хімічні механізми його утворення та, проаналізувавши існуючі математичні моделі, виявити фактори, що впливають на результат синтезу, значення яких можуть бути прийняті в якості координат вектору стану процесу електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів як об'єкта керування. А також визначити інформаційні координати та канал керуючих впливів,

що дозволить побудувати модель керування процесом для забезпечення продуктивного режиму синтезу вуглецевих наноматеріалів.

### ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Спираючись на теоретичні та експериментальні розробки, викладені в публікаціях [5, 2], в роботі [3] зроблено спробу побудови моделі утворення нановуглецю. Вважається, що формування наночасток починається з піролізу вуглеводневих молекул і закінчується подальшою «збіркою» конденсованих частинок, коли відбувається перехід від газової фази і частинки ідентифікуються як тверді тіла. Хімічний процес перетворення вуглеводневих газоподібних речовин в твердий нановуглець супроводжується фізичним процесом виникнення нової дисперсної фази. Сформовані частинки містять від  $10^5$  до  $10^6$  атомів вуглецю, мають розміри від 2 нм до 150 нм. Дослідження структури технічного нановуглецю показують, що вона являє собою агломерати (скупчення) невеликих часток майже сферичної форми, що містять приблизно до 4000 індивідуальних частинок [8].

В будь-якому процесі утворення технічного нановуглецю можна виділити загальні характерні стадії — розкладання вихідної вуглеводневої сировини на найпростіші вуглеводні; утворення провісників нановуглецю; утворення зародків (ядер); поверхневе зростання зародків в процесі зіткнень з реакційно-спроможними проміжними продуктами (радикалами) в газовій фазі.

При молекулярній масі провісників від 500 до 2500 атомних одиниць маси здійснюється перехід від ядра до індивідуальних часток. Процеси коагуляції і агломерації (укрупнення) при зіткненні зародків і індивідуальних частинок нановуглецю проходять під впливом сил тяжіння і в результаті хімічних реакцій. Малі частинки, об'єднуючись, збільшують свою поверхню, адсорбуючи навколишні молекули газової фази. Коагуляція та агломерація не зменшують загальну частку технічного нановуглецю в продуктах згоряння, але, скорочуючи кількість частинок, збільшують розміри «об'єднань». Поверхневе зростання відбувається досить швидко та визначає кінцевий розмір агломерату [4].

Перед формуванням часток технічного нановуглецю спостерігається домінування по концентрації в зоні утворення наночасток вуглецю вуглеводнів типу ароматичних моно- і поліциклічних (бензол, толуол, ксилол, нафталін та ін.), і поліїнових ланцюжків, молекул типу  $C_{2n}H_2$  ( $n = 2, 3, \dots$ ), зокрема ацетилену. У зв'язку з цим сформувалися дві основні гіпотези процесу утворення технічного нановуглецю — ароматична та ацетиленова, які базуються на двох різних сімействах вуглеводневих молекул — провісників (або попередників) нановуглецю. Втім, є гіпотези, що об'єднують обидва ці процеси [5].

У поліїнових моделях утворення технічного нановуглецю передбачається, що кожен радикал, здатний утворити поліїнові комплекси, стає центром полімеризації. Утворення часток технічного нановуглецю трактується як процес розгалуженої радикально-ланцюгової полімеризації. Молекули ацетилену й інших поліїнів мають високу термічну стабільність, і завдяки цьому зберігаються в газовій фазі як стабільні структури частинок вуглеводню.

У поліароматичній моделі [12] острівцями стабільності виступають інші провісники нановуглецю — поліциклічні ароматичні вуглеводні (ПАВ), що є проміжною ланкою між молекулами сировини і частинками нановуглецю. Ароматичні молекули утворюють стійкі з'єднання — димери, тримери, тетрамери та ін. Моделювання росту поліароматичних молекул проходить в основному за відомим і широко використовуваним механізмом НАСА (Hydrogen-Abstraction-Carbon-Addition).

В [11] показано, що нановуглець формується в обмежених межах температур ( $T$ ) від 1300 до 1600 К, впливають також тип і вид сировини, співвідношення повітря / сировина, тиск, збагачення суміші.

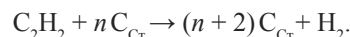
При всьому розмаїтті моделей утворення технічного нановуглецю в якості попередників найчастіше приймається ацетилен. Мономер технічного нановуглецю  $2C_{Ct}$ , що складається з двох атомів вуглецю, описується реакцією  $C_{2n}H_2 \rightarrow 2C_{Ct} + H_2$ .

Розмір наночасток залишається в межах діапазону від 1 до 10 нм. При допущенні сферичної форми ядра і загальноприйнятої питомої густини технічного нановуглецю  $\rho_c$  в межах від 1,8 до 2,0 г/см<sup>3</sup>, середній діаметр частинки можна отримати із співвідношення  $\pi d^3/6 = m_3/\rho_c$ , де  $m_3$  — маса зародку.

Швидкість зародження ядра  $d[Z]/dt$  знаходиться, спираючись на фундаментальне положення про її пропорційність швидкості утворення попередників технічного нановуглецю  $C_2H_2$ , з виразу [11]

$$d[Z]/dt = 1,0 \cdot 10^4 \exp(21,100/T) [C_2H_2]. \quad (1)$$

Схематична реакція адсорбції ацетилену на поверхні зародків часток нановуглецю має вигляд



Укрупнення утворень технічного вуглецю  $C_{Ct}$  (коагуляція, агломерація) символізується рівнянням  $nC_{Ct} \rightarrow C_{nCt}$ .

За типом моделі утворення технічного нановуглецю діляться на три категорії: напівемпіричні, феноменологічні, статистичні. Затребуваним представником напівемпіричних моделей є двоступінчастий механізм утворення технічного нановуглецю Hiroyasu [9], що включає два рівняння:

– швидкість формування:

$$dm_{C_{Ct}}/dt = A_f \cdot m_f p^{0.5} \exp(E_f/RT); \quad (2)$$

– швидкість окислення:

$$dm_{\text{Cто}}/dt = A_o \cdot m_{\text{Ccf}} [\text{O}_2] p^{1.8} \exp(E_o/RT), \quad (3)$$

де  $m_f$ ,  $m_{\text{Ccf}}$ ,  $m_{\text{Cто}}$  — маса сировини, маса сформованого і окисленого технічного нановуглецю, відповідно, кг;

$A_f$ ,  $A_o$  — калібрувальні константи;

$E_f$ ,  $E_o$  — енергія активації реакцій формування та окислення технічного нановуглецю, eВ;

$R$  — універсальна газова постійна, Дж/(моль·К);

$p$  — тиск, Па;

$T$  — температура, К;

$[\text{O}_2]$  — мольна концентрація кисню в продуктах згоряння.

Категорія феноменологічних моделей утворення технічного нановуглецю, які зв'язують емпіричні дослідження з основними фундаментальними теоретичними положеннями, представлена моделями Сурувкіна і Fusko [4, 7].

Загальним фундаментальним положенням моделей утворення технічного нановуглецю Сурувкіна і Fusco є постулат про пропорційність утворення первинних частинок (ядер) утворенню вуглеводню  $\text{C}_2\text{H}_2$  (ацетилену) в результаті піролізу молекул сировини при частковій недостатці кисню  $\text{C}_2\text{H}_2 \rightarrow 2\text{C}_2 + \text{H}_2$  зі швидкістю  $d[Z]/dt$ . Головною емпіричною складовою моделей при нестачі даних про допоміжні реакції стають константи швидкостей реакцій.

Аналіз показує, що всі існуючі моделі синтезу вуглецевих наноструктур сильно залежать від численних емпіричних коефіцієнтів і виразів, що описують супутні явища: швидкість тепловиділення, характеристики вихідної речовини.

Тому для перевірки детального механізму утворення технічного нановуглецю результати розрахунків залежності виходу нановуглецю від температури, швидкості зростання часток необхідно порівнювати з експериментальними результатами.

Утворення різних вуглецевих наноструктур відбувається на останній стадії зростання поверхні нановуглецю шляхом самоорганізації і залежить не тільки від зовнішніх умов, а і від внутрішньої взаємодії атомів вуглецю в різних електронно-коливальних станах. Тому необхідно застосовувати квантові методи аналізу процесів збірки вуглецевих модифікацій в самоузгодженому електромагнітному полі [10].

Спробу описати утворення onion-like структур методами квантової механіки зроблено в роботах [6, 10]. Перехід наоалмазу в onion-like структуру відбувається при нагріванні без кисню і зворотний перехід із onion-like структури в наоалмаз - при опроміненні іонами з енергіями приблизно 5 MeV і додатковому електронному опроміненні.

Утворення onion-like структури — це відшарування графенового шару від алмазного шару і з фізичної точки зору є топологічним плавленням наоалмазу.

За температурами початку і завершення переходу наоалмазу в onion-like структуру була оцінена енергія плавлення, яка становить від 95 до 245 MeV, і знаходиться в області стійкості хвиль де Бройля в наоалмазах.

Енергія активації в колективному («concert») механізмі становить  $(1,96 \pm 0,17)$  eВ [10], що відповідає утворенню приблизно від 8 до 10 сфер графену в onion-like структурі після повної «графітизації» наоалмазу. Тобто сферичний шар товщиною в одну постійну решітки кубічного алмазу переходить в один графітовий шар, який є відщепленим, тобто він не пов'язаний ковалентними зв'язками з алмазною сферою, що залишилась всередині.

Вплив сировини на процес утворення нановуглецю досліджувався у [1]. Проведений комплекс рентгеноструктурних досліджень вуглеводневих наноматеріалів, синтезованих методом високочастотної електророзрядної обробки вуглеводневих газів (суміш пропан-бутану, ацетилену), показав, що в результаті отримано аморфний нановуглець, який характеризується графітоподібним типом ближнього порядку. Мікроскопія високої розподільної здатності показала, що при використанні в якості сировини суміші пропан-бутану з  $sp^3$ -гібридизацією валентних електронів в атомах вуглецю синтезуються вуглецеві наноматеріали з onion-like структурою (луковична). Вуглецеві наноматеріали, синтезовані з ацетилену ( $sp$ -гібридизація валентних електронів), характеризуються глобулярною морфологією окремих частинок з турбостратною структурою.

Проведений аналіз існуючих моделей синтезу нановуглецю показав, що при заданій сировині вихід нановуглецю залежить від швидкості формування ядер  $d[Z]/dt$  (1) та швидкості зростання часток  $dm_{\text{Ccf}}/dt$  (2), які в свою чергу залежать від температури  $T$  та тиску  $p$ . Встановлено, що нановуглець формується в певних межах температур від 1300 до 1600 К.

Утворення різних вуглецевих наноструктур відбувається на останній стадії зростання поверхні нановуглецю шляхом самоорганізації і залежить від енергії додаткового опромінення. Енергію опромінення, необхідну для утворення onion-like структури, оцінено від 95 до 245 MeV [6].

На основі проведеного аналізу моделей в якості координат вектору стану синтезу нановуглецю, значення яких дають змогу впливати на технологічний результат синтезу (вихід нановуглецю), можна прийняти наступні фактори:  $T$  — температура,  $p$  — тиск;  $W$  — енергія.

Технологія високочастотного електророзрядного синтезу нановуглецю onion-like структури з газоподібних вуглеводнів для забезпечення необхідних значень координат вектору стану продуктивного процесу синтезу нановуглецю  $[T, p, W]$  потребує

встановлення відповідного режиму розряду, що визначається параметрами розрядного контуру. Тому інформаційними спостережними, тобто апаратно визначеними, координатами електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів можна вважати  $U$  — напругу,  $I$  — струм,  $P$  — потужність,  $f$  — частоту проходження імпульсів.

Для отримання залежностей між технологічними координатами вектору стану продуктивного синтезу вуглецевих наноматеріалів  $[T, p, W]$  і електричними характеристиками розрядного процесу  $[U, I, P, f]$ , які є інформаційними спостережними координатами вектору стану електророзрядного синтезу, необхідно проведення додаткових експериментальних досліджень з застосуванням теорії планування експерименту та врахуванням стохастичності процесу розряду.

Дослідження характеристик електричного розряду в суміші газоподібних вуглеводнів в режимі синтезу нановуглецю показало, що значення середньоквадратичних значень розрядного струму  $I$ , напруги  $U$  та потужності  $P$  залежить від довжини міжелектродного проміжку  $l$ . Тому в якості керуючої координати електророзрядного синтезу нановуглецю можна прийняти довжину розрядного проміжку  $l$ , забезпечивши технічну можливість її регулювання. Таким чином з метою забезпечення керованості процесу електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів необхідно побудувати модель керування, використовуючи в якості керуючого впливу довжину розрядного проміжку  $l$ , а в якості інформаційних координат середньоквадратичні значення розрядного струму  $I$ , напруги  $U$  та потужності  $P$ . Так як фізичні процеси, що відбуваються в каналі розряду нео-

днозначні, недостатньо вивчені, погано піддаються формалізації, тому необхідно для побудови моделі керування електророзрядним синтезом вуглецевих наноматеріалів застосувати сучасні методи fuzzy-апроксимації на основі теорії нечітких множин, використовуючи бази експериментальних даних.

**ВИСНОВКИ.** 1. В результаті аналізу існуючих моделей синтезу нановуглецю встановлено, що при заданій сировині вихід нановуглецю залежить від швидкості формування ядер та швидкості зростання часток, які в свою чергу залежать від температури, тиску та енергії. Тому в якості координат вектору стану синтезу нановуглецю, які дають змогу впливати на технологічний результат синтезу (вихід нановуглецю) прийнято:  $T$  — температура,  $p$  — тиск;  $W$  — енергія.

2. Технологія височастотного електророзрядного синтезу нановуглецю onion-like структури з газоподібних вуглеводнів для забезпечення необхідних значень координат вектору стану продуктивного процесу синтезу  $[T, p, W]$  потребує встановлення відповідного режиму розряду, що визначається параметрами електричного розряду в газонаповненій розрядній камері. Тому в якості інформаційних спостережних координатами електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів прийнято  $U$  — напругу,  $I$  — струм,  $P$  — потужність,  $f$  — частоту проходження імпульсів.

3. В якості керуючої координати електророзрядного синтезу нановуглецю прийнято довжину розрядного проміжку  $l$ , регулювання якої забезпечує необхідні режими продуктивного електророзрядного синтезу вуглецевих наноматеріалів заданої структури.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] **Богуславський, Л.З.** Свойства углеродных наноматериалов, полученных из газообразного сырья с помощью высокочастотной разрядно-импульсной обработки [Текст] / Л.З. Богуславський, А.Д. Рудь, И.М. Кирьян, Н.С. Назарова, Д.В. Винниченко // Электронная обработка материалов. — 2015. — № 51 (2). — С. 1–7.
- [2] **Крестинин, А.В.** Образование сажевых частиц как процесс химической конденсации полиинов [Текст] / А.В. Крестинин // Химическая физика. — 1998. — Т. 17, № 8. — С. 41–56.
- [3] **Левтеров, А.М.** Анализ математических моделей механизма сажеобразования при сжигании углеводородных топлив [Текст] / А.М. Левтеров, Л.И. Левтерова // Вісник НТУ «ХП». — 2013. — № 5 (979). — С. 130–141.
- [4] **Суровикин, В.Ф.** Аналитическое описание процессов зародышеобразования и роста частиц сажи при термическом разложении ароматических углеводородов в газовой фазе [Текст] / В.Ф. Суровикин // Химия твердого топлива. — 1976. — № 1. — С. 111–122.
- [5] **Суровикин, В.Ф.** Образование сажи при разложении углеводородов в высокотемпературном потоке продуктов полного сгорания [Текст] / В.Ф. Суровикин, П.А. Теснер // Газовая промышленность. — 1965. — № 5. — С. 44–50.
- [6] **Bartelmess, J.** Carbon nano-onions (multi-layer fullerenes): chemistry and applications / J. Bartelmess, S. Giordani // Beilstein J Nanotech. — 2014. — Vol. 5. — P. 1980–1998.
- [7] **Fusco, A.** Application of a Phenomenological Soot Model to Diesel Engine Combustion / A. Fusco, A. Knox-Kelecyc, D. Foster // International Symposium Commodity, Tokyo. — Tokyo, 1994. — P. 571–576.
- [8] **Heywood, J. B.** Internal Combustion Engine Fundamental / J. B. Heywood. — New York: McGraw-Hill, 1988. — 930 p.
- [9] **Hiroyasu, H.** Development and Use of a Spray Combustion Modeling to Predict Diesel Engine Efficiency and Pollutant Emissions (part. 1) / H. Hiroyasu, T. Kadota, M. Arai // Bulletin of the JSME. — 1983. — Vol. 26. — № 214. — P. 569–575.

- [10] **Kuznetsov, V. L.** Onion-like carbon from ultra-disperse diamond / V.L. Kuznetsov, A.L. Chuvilin, Y.V. Butenko, I. Yu Mal'kov, V.M. Titov // *Chem. Phys Lett.* — 1994. — Vol. 222. — P. 343–348.
- [11] **Santoro, R.** The transport and growth of soot particles in laminar diffusion flames / R. Santoro, T. Yeh, J. Horvath // *Combustion Science and Technology.* — 1987. — Vol. 53. — P. 89–115.
- [12] **Surovikin, V. F.** Formation and growth of dispersed carbon particles during pyrolysis of ethylene, benzene, and naphthalene in a reflected shock wave / V. F. Surovikin, A. Shaitanov // *Combustion, Explosion, and Shock Waves.* — 2007. — Vol. 43, №4. — P. 442–448.

---

© Л. З. Богуславський, Л. С. Овчиннікова, С. С. Козирев  
Надійшла до редколегії 28.01.2016  
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК  
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*