

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. Boguslavskiy

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. Богуславськийзав. відділу імпульсних електротехнічних систем, канд. техн. наук, доц.^{1,2}**Л. Є. Овчиннікова**кандидат технічних наук, доц.^{1,2}**С. С. Козирєв**кандидат технічних наук, доц.²¹*Institute of Pulse Processes and Technologies of NAS of Ukraine, Mykolaiv*²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*¹*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, Миколаїв*²*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 poliinov* [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 загальноприйнятої теорії утворення структур вуглецевих наночастинок, 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., Bockhorn H. та інші внесли значний внесок у розуміння процесу утворення нановуглецю, досягнуто певного прогресу в області розуміння механізмів утворення наночастинок 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 наночастинок 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 наночастинок 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.

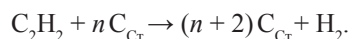
При всьому розмаїтті моделей утворення технічного нановуглецю в якості попередників найчастіше приймається ацетилен. Мономер технічного нановуглецю $2C_{Ct}$, що складається з двох атомів вуглецю, описується реакцією $C_{2n}H_2 \rightarrow 2C_{Ct} + H_2$.

Розмір наночастинок залишається в межах діапазону від 1 до 10 нм. При допущенні сферичної форми ядра і загальноприйнятої питомої густини технічного нановуглецю ρ_c в межах від 1,8 до 2,0 г/см³, середній діаметр частинки можна отримати із співвідношення $\pi d^3/6 = m_s/\rho_c$, де m_s — 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:

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

де m_f , $m_{\text{Cф}}$, $m_{\text{Cто}}$ — 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 Сурув'юкіна і Fusco [4, 7].

Загальним фундаментальним положенням моделей утворення технічного нановуглецю Сурув'юкіна і Fusco є постулат про пропорційність утворення первинних частинок (ядер) утворенню вуглеводню C_2H_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 ± 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 $dm_{\text{Cф}}/dt$ (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 високочастотного 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. Є. Овчиннікова, С. С. Козирєв
Надійшла до редколегії 28.01.2016
Статтю рекомендує до друку член редколегії ЗНП НУК
д-р техн. наук, проф. *О. М. Дубовий*