

**В. Ю. Долматов<sup>1, \*</sup>, О. Н. Озерин<sup>2</sup>, А. Vehanen<sup>3</sup>,  
V. Myllymäki<sup>3</sup>, А.О. Дорохов<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Федеральне державне унітарне підприємство  
“Спеціальне конструкторсько-технологічне бюро  
“Технолог”, м. Санкт-Петербург, Росія

<sup>2</sup>Федеральна державна бюджетна установа науки  
Інститут синтетичних полімерних матеріалів  
ім. М.С. Еніколопова, РАН, Москва, Росія

<sup>3</sup>“CarbodeonLtd. Oy”, Ваанта, Фінляндія

<sup>4</sup>АТ “Завод “Пластмас”, м. Копейськ, сел. Советов, Росія

\*diamondcentre@mail.ru

## **До питання про механізм утворення детонаційних алмазів**

*Показана можливість утворення праструктури детонаційних наноалмазів (ДНА) в плазмі зони хімічних реакцій у вигляді фрактальної вуглецевої сітки з формуванням в її вузлах тривимірного упорядкованого ядра вуглецю, щільність вузлів повинна знаходитися в межах 2,5–3,2 г/см<sup>3</sup>. При переході через площину Чепмена-Жуге плазмові утворення вуглецю кристалізувалися в ДНА або аморфізувалися. Утворення ДНА відбувалося на відстані 1/3–3/4 діаметра заряду від фронту детонаційної хвилі. В оптимальних умовах на утворення ДНА було використано ~ 20 % (за масою) загального вуглецю вибухової речовини.*

**Ключові слова:** детонаційні наноалмази, механізм утворення, зона хімічних реакцій, площина Чепмена-Жуге, конденсований вуглець, плазма, час утворення наноалмазів.

### **ВСТУП**

Як відомо, детонаційний процес має складну структуру і включає в себе ударну (детонаційну) хвилю, зону хімічних реакцій (ЗХР) постійної ширини для даного заряду і нестационарну область газоподібних продуктів детонації (ПД), що розширюються. Умовна поверхня розділяє зону реакцій і розліт ПД (площина Чепмена-Жуге (Ч-Ж)), а параметри ПД на цій площині є параметрами детонації або параметрами Ч-Ж. Речовина всередині ЗХР має швидкість, що приблизно дорівнює швидкості детонації (швидкості ударної хвилі – 6–8 км/с), а за площиною Ч-Ж масова швидкість газоподібних продуктів значно нижче і для досліджуваних індивідуальних і сумішевих вибухових речовин (ВР) складає ~ 2 км/с [1–3].

Потік речовини всередині ЗХР є плазмою ( $T = 3000\text{--}4500$  К,  $p = 20\text{--}35$  ГПа) і носить турбулентний пульсуючий характер. Продуктами детонації після охолодження є  $N_2$ ,  $H_2O$ , C, CO,  $CO_2$ , NO,  $NO_2$ ,  $CH_4$ ,  $O_2$ ,  $N_2O$ , HCN.

При детонації конденсованих потужних ВР щільність ПД в ЗХР значно перевершує щільність вихідних ВР і знаходиться в діапазоні 2,2–2,5 г/см<sup>3</sup>. Виділення енергії у процесі розпаду молекул ВР триває і за площиною Ч-Ж (~ 20 % від загальної енергії вибуху) [1].

Загальною умовою формування нанодисперсних частинок є поєднання високої швидкості утворення зародків з малою швидкістю їх росту. Зростання зародків за дифузійним механізмом визначається швидкістю дифузії атомів до зародка і вимагає переміщення атомів (або  $C_2$ ) [4] на значну відстань. Розмір зростаючої частинки пропорційний кореню квадратному від часу зростання [1].

Зростання частинок відбувається в умовах міжфазної турбулентності, виникнення якої пов'язано з неоднаковою щільністю середовищ, з градієнтом концентрацій і температур, з ефектом гальмування потоку на частинках з розвиненою поверхнею, зі зміною поверхневого натягу. Турбулентні потоки сприяють відведенню тепла кристалізації від зростаючої частинки.

Метою даної роботи є черговий етап узагальнення власних даних і відомих авторам досліджень, що стосуються синтезу ДНА, для кращого розуміння механізму цього надзвичайно складного процесу.

## РЕЗУЛЬТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

В [5] досліджено щільність рідкого графіту (термінологія авторів) як функція тиску – до 4 ГПа. Екстраполяція даних за щільністю рідкого вуглецю показала, що при тиску  $\sim 18$  ГПа (відповідає тиску в площині Ч-Ж для тротилу (2,4,6-тринітролоуолу, ТНТ)) становить  $\sim 2,7$  г/см<sup>3</sup> і  $\sim 2,9$  г/см<sup>3</sup> для тиску  $\sim 24$  ГПа (відповідає тиску в площині Ч-Ж для заряду ТГ 50/50 (сплав тротилу та гексогену)). Алмаз в рідкому стані характеризується щільністю 3,2198 г/см<sup>3</sup> [6], в той час як щільність кристалічної фази складає 3,515 г/см<sup>3</sup>.

В якому вигляді існує праструктура ДНА в ЗХР досі є питанням дискусійним. Як вже зазначалося в [4], енергії для руйнування всіх міжатомних зв'язків в молекулах ВР мало, причому в 4–5 разів менше, ніж необхідно. Швидше за все, досить стійким утворенням в плазмі ЗХР є множинний радикал-димер вуглецю з ковалентним зв'язком –C–C– [4].

Існує якісна несумісність сильно нерівноважних умов в ЗХР з формуванням стабільної, а в ряді випадків ідеальної кристалічної фази вуглецю. Тому, швидше за все, мова може йти не про кристалізацію нанорозмірного алмазу в ЗХР (в силу практично відсутності тепловідведення від формованого нанокристалів і малого часу існування необхідних  $p$ ,  $T$ -умов), а про процес самоорганізації вуглецю в конденсовану фазу відповідно до базових хімічних властивостей атомів вуглецю, а саме – утворення різних типів C–C-зв'язків. Отже, є ймовірність виникнення фрактальної вуглецевої сітки з одночасними флуктуаціями щільності вуглецю в ЗХР. У “вузлах” цієї сітки з найбільшою щільністю вуглецевий конденсат встигає в більшій чи меншій мірі сформувати тривимірне впорядковане ядро, а ділянки зі зниженою щільністю вуглецю багаторазово руйнуються і рекомбінуються в процесі розльоту ПД. Крім того, відомі вторинні процеси – окислення, графітизація і аморфізація щільних вуглецевих частинок (“вузлів”), призводять до зниження частки ДНА.

Таким чином, праструктурою ДНА може бути ущільнене вуглецеве ядро, яке за площиною Ч-Ж стає спочатку рідким вуглецем, або утворений енергетично вигідний вуглецевий каркас циклогексана, який за межами площини Ч-Ж, взаємодіючи один з одним з ще більшим зменшенням енергії, перебудовується в радикал-молекулу адамантану, яку атакують радикали –C–C– (дифузний механізм утворення наноалмазів). Можливо, ці два механізми утворення ДНА мають місце. Далі йде кристалізація (аморфізація) рідкого вуглецю або охолодження кристалітів ДНА, отриманих дифузійним способом з адамантанової праструктури [4].

На рис. 1 представлено дані малокутового рентгенівського розсіювання (МКРР), обробка яких дозволяє оцінити зародження і зростання кількості частинок конденсованої вуглецевої фази в ЗХР і розльоту ПД в процесі детонації досліджуваних ВР [7, 8].

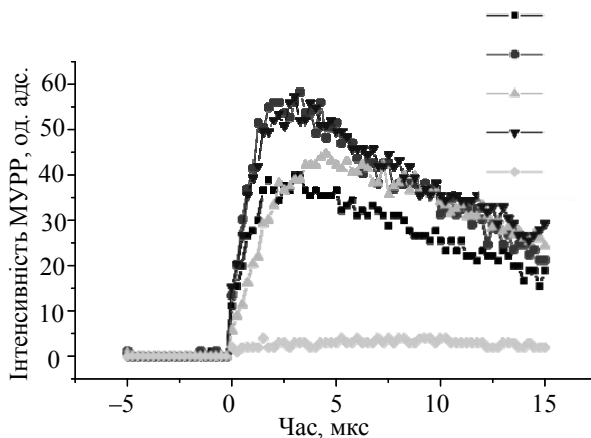


Рис. 1. МКРР, застосоване для процесу детонації конденсованих вуглецевмісних ВР: ТГ 70/30 (■), ТГ 50/50 (●), ТНТ (▲), ТГ 60/40 (▼), гексоген (◆) (дозволено використовувати Е.Р. Пруелом).

Методика МКРР, на думку авторів, дозволяє в динаміці визначати параметри частинок, що формуються: залежність зростання їхньої кількості від часу появи фронту детонації, вихід за часом на максимум і початок зменшення кількості.

Обробка серії кривих МКРР, знятих під час детонації з інтервалом 250 нс, дозволила отримати інформацію про динаміку зростання кількості наночастинок вуглецю [9].

Зв'язок даних МКРР з розміром частинок нановуглецю, незважаючи на максимальний (7–8 нм) розмір частинок [7, 8], виглядає непереконливо. Хоча розмір переважної більшості кристалітів ДНА, отриманих з різних ВР, знаходиться в діапазоні 4–8 нм, є значна кількість кристалітів ДНА, що мають розміри десятки (20–35 нм) нанометрів, у тому числі з чітко вираженими гранями. Представлені на рис. 1 дані МКРР, швидше за все, вказують не на розмір частинок, а зростання їх кількості. Дійсно, крива залежності інтенсивності розсіювання від часу при підриві заряду гексогену лежить дуже низько над віссю абсцис. За даними авторів, вихід АШ з гексогену має дуже мале значення (4,1 % (за масою)), а вміст в ній ДНА досить великий (21,5 % (за масою)). У той же час, крива тієї ж залежності для тротилу, навпаки, лежить дуже високо над віссю абсцис, так і вихід АШ аномально великий – ~ 20 % (за масою), а вміст в ній ДНА дуже малий – 4,7 % (за масою). Таким чином, інтегральне значення між отриманими кривими і віссю абсцис може характеризувати тільки кількість отриманого нановуглецю (АШ), що виділився після детонаційного синтезу, а не його розмір.

Щільність, що фіксується МКРР, конденсованого вуглецю повинна бути вище  $2,5 \text{ г/см}^3$ , тобто більша за густину плазми ЗХР.

Сигнал МКРР фіксує конденсований вуглець (не роблячи відмінностей між алмазною і неалмазною фазами) вже в зоні хімічних реакцій (ЗХР) для тротилу і тротил-гексогенових сумішей (70/30, 50/50, 60/40). У табл. 1 представлено параметри детонації ВР, в тому числі й використаних в [7, 8], час

реакції наведених ВР знаходиться в діапазоні 0,1–0,3 мкс, ширини ЗХР – від 0,4 до 1,4 мм.

Результати [7, 8] показують (див. рис. 1), що конденсована фаза вуглецю, що має підвищену щільність, з'являється відразу за фронтом детонаційної хвилі для тротилу і тротил-гексогенових зарядів. Причому швидке наростання сигналу МКРР триває до  $\sim 1,8$  мкс. Далі (до 4,4 мкс) йде своєрідне плато, а потім повільний спад до 15 мкс і далі.

Процес утворення праструктури ДНА починається в ЗХР, проте тісно зв'язана алмаз-неалмазна вуглецева структура (алмазна шихта (АШ)) з'являється далеко за межами ЗХР. Так, в [7, 8] використовували заряди діаметром 10 мм (ТГ, лиття) і 12,5 мм (ТГ, пресування). Після проведення найпростіших розрахунків, з врахуванням швидкості детонації ТНТ –  $\sim 7000$  м/с, ТГ –  $\sim 7500$  м/с (для ТГ 70/30; 50/50; 60/40) і  $\sim 8500$  м/с для гексогену (табл. 1), знаючи ширину ЗХР і час реакцій в ній, а також масову швидкість розльоту ПД –  $\sim 2000$  м/с, отримали, що за 1,8 мкс пройдено відстань  $\sim 4,4$  мм, що становить  $\sim 35$  % від діаметра заряду, а за 4,4 мкс –  $\sim 9,5$  мм (77 % від діаметра заряду). По суті, це і є зона утворення ДНА в уже відомому авторам вигляді, тобто процес завершення утворення кристалітів ДНА протікає в діапазоні 1/3–3/4 діаметра заряду від фронту детонаційної хвилі.

Далі йде різкий спад тиску і температури з їхнім сильним впливом на утворений нановуглець, в тому числі кристаліти ДНА агресивних газів ( $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ), що сприяє не тільки зменшенню розмірів частинок АШ, а й графітізації кристалітів ДНА.

Як відомо, стан речовини в плазмі ЗХР не можна описати як твердий, рідкий або газоподібний, тому якою є праструктура ДНА в даний момент визначити неможливо. Якщо звернути увагу на класичну діаграму  $p$ ,  $T$ -вуглецю (рис. 2) [10], то вільний вуглець від ТНТ ( $p \approx 18$  ГПа,  $T \approx 3600$  К, вихід ДНА – 0,9 % (за масою)) не знаходиться в стані рідкого вуглецю, а вільний вуглець від БТФ (бензотрифуроксан) ( $p \approx 36$  ГПа,  $T \approx 4300$  К, вихід ДНА – 1 % (за масою)) [9, 11] потрапляє в рідкий стан вуглецю.

Таким чином, відразу за фронтом детонаційної хвилі утворюються первинні вуглецеві плазмоїди за  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  с, що фіксуються методом МКРР. У ЗХР в зоні високих  $p$ ,  $T$ -умов йдуть більш повільні [4] процеси утворення праструктури наноалмазів: з  $\text{C}_2^x \rightarrow$  циклогексан $^y \rightarrow$  адамантан $^z \rightarrow$  дифузійні процеси атаки  $\text{C}_2^x$  по поверхні радикала адамантана $^z$  з утворення кристалітів ДНА або процеси коалесценції щільних вуглецевих плазмоїдів в праструктуру кристалітів ДНА. За площиною Ч-Ж автори спостерігали зростання щільних вуглецевих частинок або за дифузійним механізмом атакою  $\text{C}_2^x$  твердих вже вуглецевих кластерів з праструктурою у вигляді радикал-адамантана $^z$ , або коалесценція рідких вуглецевих нанокрапель в більшій нанокраплі. При виході на плато, тобто на відстані 1/3–3/4 діаметра заряду відбувається остаточне формування складної структури АШ – всередині кристаліт ДНА, а зовні – аморфні вуглецеві утворення. Атака частинок, що утворилися за будь-яким механізмом агресивними газами ( $\text{CO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ ), призводить до зменшення розміру твердих частинок нановуглецю.

Для отримання ДНА досліджено безліч індивідуальних і сумішевих ВР з відомими характеристиками – швидкістю детонації, температурою вибуху, шириною ЗХР і часом реакції ВР, які визначають в значній мірі можливість отримання ДНА (табл. 1).

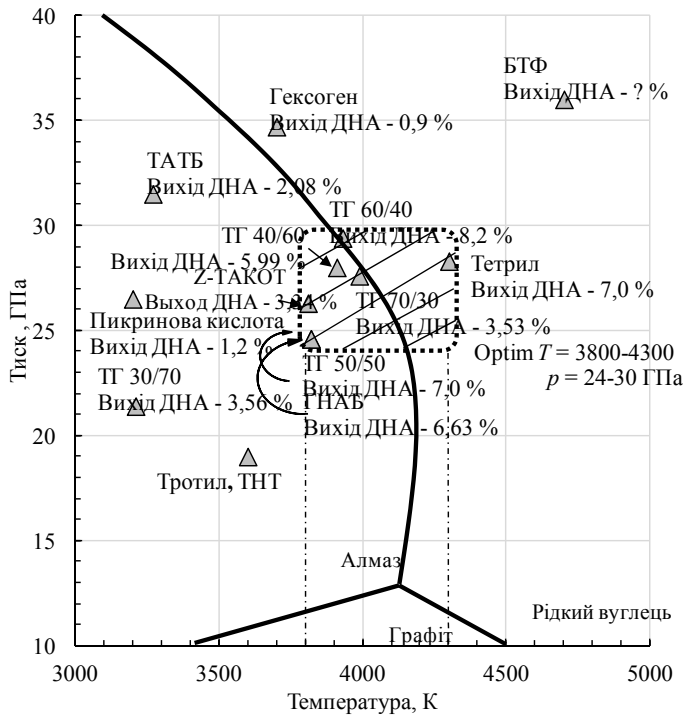


Рис. 2. Фазова діаграма вуглецю [10].

Таблиця 1. Параметри детонації ВР

ВР	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Тиск в площині Ч-Ж, ГПа	Температура детонації в площині Ч-Ж, К	Ширина зони ЗХР, мм	Час реакції, мкс	$D$ , швидкість детонації, м/с	КБ, кисневий баланс, %	Література
ТНТ пресований	1,60	17,7	дані відсутні	1,35	0,22	6900	-74,0	[2, 12]
ТНТ литий	1,62	17,7	3600	1,41	0,30	6850	-74,0	[2, 3]
Гексоген	1,68	33,0	дані відсутні	0,36	0,07	8670	-21,6	[2, 13]
ТГ 60/40	1,66	22,3	3747	0,6	0,10	7510	-53,0	[2, 3, 14]
ТГ 50/50	1,68	24,0–25,5	3820	1,35	0,26		-47,8	[2, 3, 15]
ТГ 50/50	1,74	дані відсутні	3820	0,64	0,13	7570	-47,8	[2, 15]
ТГ 40/60	1,68	26,0	3910	дані відсутні	дані відсутні	7580	-42,6	[15]
ТГ 36/64	1,68	25,8	дані відсутні	< 0,5	< 0,1	7830	-40,5	[3]
ТГ 30/70	1,77	дані відсутні	дані відсутні	0,65	0,12	8052 [75]	-37,3	[2]
Тетрил	1,70	28,3	3700	дані відсутні	0,10	7500	-47,4	[2, 15]
ТАТБ	1,88	29,0	дані відсутні	1,56	0,30	8100	-55,8	[2, 11, 16]

Примітка. ТНТ – 2,4,6-тринітролоуол; ТГ – сплав тротилу з гексогеном (1,3,5-тринітро-1,3,5-триазациклогексан); тетрил – N-метил-2,4,6-тринітрофенілнітрамин; ТАТБ – 1,3,5-триаміно-2,4,6-тринітробензол.

Найважливішим питанням є співвідношення вуглецю в ВР і його виходу в конденсованому вигляді (АШ). У табл. 2 наведено розрахункові та експериментальні дані по вуглецю.

**Таблиця 2. Вихід вільного вуглецю (АШ і ДНА)**

№	ВР	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Кількість вуглецю, % (за масою)					Літе- рату- ра
			у ВР (C <sub>зар</sub> )	Вихід АШ	АШ/C <sub>зар</sub>	Вихід ДНА	ДНА/C <sub>зар</sub>	
1	Тротил* (пресований)	1,57	49,3	19,04	38,6	0,94	1,91	
2	Гексоген* (пресований)	1,61	21,6	3,8	17,6	1,08	5,0	
3	ТГ 60/40 (пресований)	1,58	38,4	16,6	43,2	4,4	11,5	[17]
4	ТГ 60/40 (литий)	1,67	38,4	13,6	35,4	5,2	13,5	[17]
5	ТГ 60/40* (литий)	1,66	38,4	11,8	30,7	8,49	22,1	
6	ТГ 50/50 (литий)*	1,66	35,6	10,1	28,3	6,4	18,0	
7	ТГ 40/60	1,68	32,9	15,0	45,6	6,0	18,2	[17]
8	Тетрил* (пресований)	1,659	39,0	11,6	29,7	7,4	19,0	
9	ТАТБ (пресований)	1,83	37,2	15,9	43	2,08	5,6	[16]

\*Підриг зарядів здійснено у водяній оболонці.

З даних табл. 2 видно, що великого виходу ДНА можна досягти, коли на утворення вільного вуглецю йде 28–35 % від загального вуглецю в молекулі ВР або суміші ТГ (№ 6, 7, 9) або 20±2 % загального вуглецю на утворення ДНА.

Що стосується експерименту з отримання ДНА з ТАТБ [16], то автори роботи вважають, що вихід наноалмазів повинен скласти ~ 13 % (за масою) від маси ВР (розрахунки не наводяться), між тим в ДНА, як і в разі гексогену, перейшло ~ 5 % (за масою) від загального вуглецю в молекулах ВР.

Тут, принаймні, є дві причини: відповідно до [18], кількість азоту в ТАТБ аномально велика (32,6 % (за масою)) і одне це заважає утворенню і росту вуглецевої праструктури наноалмазів (оптимальний діапазон – 23–28 % (за масою)); при щільності заряду ТАТБ, що дорівнює 1,83 г/см<sup>3</sup>, швидше за все, є ефект перетиснутої детонації, де відсутня ЗХР. Відсутність цієї зони заважає нормальному зародженню праструктури ДНА, для якої явно необхідна ЗХР. З табл. 1 випливає, що для утворення ДНА з прийнятним (≥ 5 % (за масою)) виходом необхідна ЗХР з розмірами ~ 0,6 мм, що є досить великою відстанню.

## ВИСНОВКИ

Зроблено припущення, що конденсований вуглець в зоні хімічних реакцій повинен мати щільність в діапазоні 2,5–3,2 г/см<sup>3</sup> для його визначення в плазмі методом МКРР.

Можливе виникнення фрактальної вуглецевої сітки з одночасними флуктуаціями щільності вуглецю в ЗХР з утворенням тривимірного упорядкованого ядра в вузлах сітки.

Для утворення ДНА час хімічних реакцій в ЗХР знаходиться в діапазоні 0,1–0,3 мкс, а ширина ЗХР може змінюватися від 0,4 до 1,4 нм.

Час існування відносного плато для складів тротил–гексоген (найбільш бажаних для утворення ДНА) становить від ~ 1,8 до ~ 4,4 мкс, що відповідає відстані від фронту детонаційної хвилі 4,4–9,5 мм або 1/3–3/4 діаметра заряду. Далі йде падіння кількості частинок АШ.

Значного вихіду ДНА (більше 6 % (за масою)) можна досягти, коли на утворення вільного вуглецю йде 28–35 % від загального вуглецю в ВР або  $20 \pm 2$  % (за масою) на утворення, власне, ДНА.

На утворення ДНА з ТАТБ, як і у випадку гексогену, йде лише 5 % (за масою) від загального вуглецю в молекулах цих індивідуальних ВР.

Недоліком ТАТБ є використовувана висока щільність заряду ( $\rho = 1,82 \text{ г/см}^3$ ), що призводить до перетиску детонації (відсутній ЗХР – місце зародження праструктури ДНА) і дуже велика кількість азоту в молекулі (32,6 % (за масою))

Робота виконана за часткової фінансової підтримки РФФД в рамках наукового проекту № 18-29-19112.

V. Yu. Dolmatov<sup>1</sup>, A. N. Ozerin<sup>2</sup>, A. Vehanen<sup>3</sup>, V. Myllymäki<sup>3</sup>,  
A. O. Dorokhov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Federal State Unitary Enterprise “Special Design and Technological Bureau “Technolog”, St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Institution of Science Institute “Institute of synthetic polymeric materials named after N.S. Enikolopov RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup>“Carbodeon Ltd. Oy”, Vantaa, Finland

<sup>4</sup>JSC “Plastmass” Plant”, Kopeysk, Chelyabinsk region, Russia

On the question of the mechanism of formation of detonation diamonds

*The possibility of the formation of a detonation nanodiamond (DND) infrastructure in the plasma of a chemical reaction zone in the form of a fractal carbon network with the formation of a three-dimensional ordered carbon nucleus in its nodes is shown, the density of nodes should be in the range of  $2.5\text{--}3.2 \text{ g/cm}^3$ . When passing through the Chapman-Jouguet plane, plasma formations of carbon crystallize in DND or amorphize. DNDs are formed at a distance of  $1/3\text{--}3/4$  of the charge diameter from the detonation wave front. Under optimal conditions, DND formation takes  $\sim 20$  % wt. total explosive carbon.*

**Keywords:** *detonation nanodiamonds, formation mechanism, zone of chemical reactions, Chapman-Jouguet plane, condensed carbon, plasma, time of formation of nanodiamonds.*

1. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 784 с.
2. Loboiko B.G., Lyubyatinsky N.S. Reaction zones of detonating solid explosives, *Combust., Expl., Shock Waves*. 2000. Vol. 36, no. 6. P. 716–733.
3. Дремин А.Н., Шведов К.К. Определение давления Чепмена-Жуге и времени реакции в детонационной волне мощных ВВ. *Журн. прикл. механики и техн. физики*. 1964. № 2. С. 154–159.
4. Dolmatov V.Yu., Myllymaki V., Vehanen A. A possible mechanism of nanodiamond formation during detonation synthesis. *J. Superhard Mater.* 2013. Vol. 35, no 3. P. 143–150.
5. Kondratyev A.M., Rakhel A.D. Melting line of graphite. *Phys. Rev. Lett.* 2019. Vol. 122, art. 175702.
6. Молодец А.М., Молодец М.А., Набатов С.С. Изохорно-изотермический потенциал расплавленных металлов. *ТВТ*. 1998. Т. 36. № 6. P. 914–920.
7. Алешаев А.Н., Зубков П.И., Кулипанов Г.Н., Лукьянчиков Л.А., Ляхов Н.З., Мишнев С.И., Тен К.А., Титов В.М., Толочко Б.П., Федотов М.Г., Шеромов М.А. Применение синхротронного излучения для исследования детонационных и ударно-волновых процессов. *Физ. горен. и взрыва*. 2001. Т. 37. № 5. С. 104–113.

8. Titov V.M., Tolochko B.P., Ten K.A., Lukyanchikov L.A., Prueel E.R. Where and when are nanodiamonds formed under explosion. *Diamond Relat. Mater.* 2007. Vol. 16, no. 12. P. 2009–2013.
9. Аульченко В.М., Жуланов В.В., Кулипанов Г.Н., Тен К.А., Толочко Б.П., Шехтман Л.И. Исследование быстропротекающих процессов рентгенодифракционными методами в Сибирском центре синхротронного и терагерцового излучения. *Успехи физ. наук.* 2018. Т. 188. № 6. С. 577–594.
10. Долматов В.Ю., Дорохов А.О., Мюллюмаки В., Веханен А., Марчуков В.А. Зона химических реакций при детонационном синтезе наноалмазов на фазовой диаграмме углерода. *XXII Междунар. конф. "Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент – техника и технология его изготовления и применения": Сб. научн. тр.* Киев: ИСМ им. В.Н. Бакуля. 2019. Вып. 22. С. 199–204.
11. Dolmatov V.Yu., Dorokhov A.O., Kozlov A.S., Marchukov V.A., Myllymäki V., Vehanen A. Possibility of predictive estimation of the yield of DNDs from individual explosives. *J. Superhard Mater.* 2021. Vol. 43, no. 2. P. 93–99.
12. Жуков Б.П. Краткий энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы. Москва: Янус К, 2000. 596 с.
13. Бабушкин А.Ю., Лямкин А.И., Ставер А.М. Особенности получения ультрадисперсного материала на основе углерода из взрывчатых веществ. *V Всесоюз. совещание по детонации: Сб. докл.* г. Красноярск, 5–12 авг. 1991 г. Красноярск, 1991. Т. 1. С. 81–83.
14. Барабошкин К.С., Козырев Н.В., Комаров В.Ф. Исследование синтеза наноалмазов адсорбционным методом. *Ползуновский вестн.* 2006. Т. 2, № 13. С. 13–18.
15. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Ленинград: Химия, 1973. 688 с.
16. Петров Е.А., Барабошкин К.С., Бычин Н.В., Ларионов Б.В., Байрамян И.В. Исследование ТАТБ для детонационного синтеза наноалмазов. *VI Ставеровские чтения. Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы: Сб. докл.* 9–12 сен. 2012 г., г. Красноярск: СФЦ. С. 14–15.
17. Ставер А.М., Лямкин А.И. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывчатых веществ. *Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства: Межвуз. сб.* Красноярск: Ротапринт КрПИ, 1990. С. 3–22.
18. Dolmatov V.Yu. On the possibility of obtaining nitrogen-free detonation nanodiamonds: Effect of covalently bound nitrogen in explosive molecules on the yield of nanodiamonds. *J. Superhard Mater.* 2020. Vol. 42, no. 4. P. 223–228.

Надійшла до редакції 30.07.20

Після доопрацювання 12.11.20

Прийнята до опублікування 24.11.20