

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МЕЧЕНЫХ АТОМОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕТОНАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

Н. В. Козырев

Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН, 659322 Бийск, admin@ipcet.ru

Методом меченых атомов проведено изучение синтеза наноалмазов, образующихся при детонации смесевых взрывчатых веществ. Исследованы сплавы тротила с гексогеном, октогеном, тэнном, бензотрифуроксаном. Показано, что во всех случаях основная доля наноалмазов образуется из углерода ТНТ. Сделан вывод, что за время химической реакции в детонационной волне, распространяющейся в гетерогенных взрывчатых веществах, равновесные параметры не успевают установиться. В гомогенной смеси ТНТ/тэн отдельные компоненты реагируют совместно с образованием общих продуктов.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, детонационный синтез, наноалмазы, метод меченых атомов.

ВВЕДЕНИЕ

Метод меченых атомов, связанный с использованием взрывчатых веществ (ВВ) или инертных материалов, содержащих изотопы каких-либо элементов, довольно редко применяется для исследования детонационных процессов. Это обусловлено:

— существованием критических размеров стационарной детонации заряда ВВ, что требует использования значительных количеств веществ, содержащих изотопные атомы;

— необходимостью обеспечения условий подавления вторичных химических реакций, которые приводят к образованию новых соединений и перераспределению изотопной метки между молекулами продуктов взрыва (ПВ).

Однако на сегодняшний день этот метод практически единственный позволяет проследить путь отдельных атомов в реакциях образования ПВ. В работе [1] исследован процесс детонации гомогенного идеального ВВ — бис-тринитроэтиладипата, содержащего кислородные и углеродные изотопные метки в определенных положениях молекулы ВВ. В этой же работе изотоп азота ^{15}N , введенный в молекулу нитрата аммония, использован для изучения диффузионных явлений при детонации гетерогенной смеси этого вещества с тротилом. Для уменьшения критического диаметра и предотвращения воздействия на продукты взрыва вторичных ударных волн, отраженных от стенок калориметра, заряды исследуемых ВВ помещались в массивную оболочку из золота. В результате было показано, что в слу-

чае индивидуальных ВВ практически все внутримолекулярные связи в исходных молекулах в процессе детонации разрушаются, после чего фрагменты молекул рекомбинируют статистически случайным образом до тех пор, пока не наступит «закалка» продуктов вследствие адиабатического расширения. При детонации гетерогенной смеси нитрата аммония с тротилом происходит примерно 12%-е смешение компонентов, а толщина эффективного диффузионного слоя составляет ≈ 0.6 мкм.

Особый интерес представляет применение метода меченых атомов для исследования процесса образования наноалмазов в детонационной волне (ДВ). Наноразмерные кристаллы алмазов образуются из собственного углерода ВВ в области термодинамической стабильности при высоких давлениях и температурах, развивающихся при детонации [2]. В ходе адиабатического расширения продуктов взрыва, воздействия отраженных ударных волн, химического взаимодействия с окружающей средой выход наноалмазов снижается вследствие графитизации и газификации. Поэтому полученные при взрыве ВВ наноалмазы являются свидетелями процессов, происходящих в зоне химических реакций ДВ, и исследование их синтеза с использованием изотопного метода может дать информацию о механизме явлений, наблюдаемых при детонации.

Обогащенный изотопом углерода ^{13}C по метильной группе тротил был использован для исследования процесса синтеза наноалмазов из гетерогенных смесей с гексогеном [3] и окто-

геном [4]. Показано, что наноалмазные кластеры образуются в основном из атомов углерода, входящих в состав молекул ТНТ, а вклад октогена в указанный процесс незначителен. На основании этого сделан вывод об отсутствии заметного перемешивания продуктов за время химической реакции в детонационной волне. Детальный анализ результатов изотопных экспериментов проведен в работе [5].

В настоящей работе продолжают исследование детонационного синтеза наноалмазов из смесевых ВВ методом меченых атомов. Часть экспериментов, описанных в работах [6–8], повторена с использованием более точных методов измерения и анализа.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследовались сплавы тротила с более мощными ВВ — сенсibilизаторами: гексогеном (сплавы ТГ), октогеном (ТО), тэном (ТТ) и бензотрифуроксаном (ТБ). Везде в статье в обозначениях смесевых ВВ первая цифра соответствует содержанию ТНТ, вторая — сенсibilизатора. В качестве изотопной метки использовался бета-радиоактивный углерод-14. Для тротила меченым являлся атом бензольного кольца, связанный с метильной группой, для тэна — центральный атом углерода, у гексогена все атомы углерода равноценны.

Изготовление зарядов проводилось послойной заливкой суспензии сенсibilизатора в расплавленном тротиле при температуре $85 \div 90$ °С. Использовались вещества со следующими среднеситовыми размерами кристаллов: гексоген — 160 мкм, тэн — 330 мкм, бензотрифуроксан — 190 мкм, крупнокристаллический октоген — 350 мкм и высокодисперсный октоген, среднемассовый размер кристаллов которого рассчитан исходя из распределения частиц по размерам.

Подрыв зарядов осуществлялся во взрывной камере объемом 0.175 м^3 в среде азота с начальным давлением 0.8 МПа. Во всех случаях использовались заряды диаметром 38 мм и массой 100 г (разброс по массе не превышал 2 г); инициирование осуществлялось от электродетонатора и бустера — таблетки флегматизированного гексогена массой 8 г.

Сбор и анализ конденсированных продуктов взрыва проводились аналогично работе [9]. Выделение алмаза из продуктов осуществлялось кипячением в серно-азотной смеси с последующей отмывкой и сушкой. Качество очист-

ки контролировалось химическим анализом на влажность, на содержание общего углерода, алмаза и несгораемых примесей. По результатам анализа рассчитывался выход наноалмазов относительно массы заряда (B_{nd} , %).

Изотопный состав образцов исследовался на жидкостных сцинтилляционных бета-спектрометрах «LS-230» фирмы «Beckman» [6–8] и «ЛКВ-1219 РАСКВЕТА». Удельная радиоактивность исходного ВВ определялась после его растворения в толуольном сцинтилляторе с добавкой ацетона. Измерение радиоактивности наноалмаза проводилось после получения седиментационно-устойчивой суспензии путем обработки небольшой навески образца в сцинтилляторе на ультразвуковом диспергаторе в течение не менее 10 мин. Для каждого экспериментального образца измерения выполнялись несколько раз, полученные результаты усреднялись.

По результатам измерения удельной радиоактивности рассчитывались следующие величины: η_{nd}^i — доля наноалмазов, образовавшихся из i -го компонента смеси:

$$\eta_{nd}^i = \frac{m_{nd}^i}{m_{nd}} \cdot 100 \%,$$

B_{nd}^i — удельный выход алмазов из i -го компонента (по отношению к его массе в смеси):

$$B_{nd}^i = \frac{m_{nd}^i}{m_0^i} \cdot 100 \% = \frac{B_{nd} \eta_{nd}^i}{g_i \cdot 100},$$

где m_{nd}^i — масса наноалмазов, образовавшихся из i -го компонента смеси; m_{nd} — общая масса полученных алмазов; B_{nd} — суммарный выход наноалмазов относительно массы ВВ, %; m_0^i , g_i — масса и массовая доля ($\sum_i g_i = 1$) i -го компонента в заряде.

Для каждого эксперимента вводилась поправка, учитывающая образование небольших количеств конденсированного углерода и алмаза из бустера, определенная на основе специальных экспериментов. Ниже в таблицах приведено также содержание углерода i -го компонента (C_C^i , %) в общей массе углерода смесевых зарядов (m_C^0): $C_C^i = (m_C^i/m_C^0) \cdot 100$ %, где m_C^i — масса углерода i -го компонента.

Таблица 1
Результаты экспериментов с использованием меченого тротила

ВВ	$C_C^{\text{TNT}}, \%$	$\eta_{nd}^1, \%$	$\eta_{nd}^{\text{TNT}}, \%$	$B_{nd}^{\text{TNT}}, \%$
ТГ 80/20	90.13	13.7 ± 0.9 [6]	95.6 ± 6.3 [6]	6.7 ± 0.4
ТГ 60/40	77.39	13.4 ± 0.9 [6]	93.8 ± 6.3 [6]	11.7 ± 0.8
ТГ 50/50	69.53	12.4 ± 0.6	87.1 ± 4.2	11.9 ± 0.6
ТГ 40/60	60.34	12.1 ± 0.8 [6]	84.7 ± 5.6 [6]	11.9 ± 0.8

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Сплавы тротил/гексоген

Эксперименты по синтезу наноалмазов выполнялись с использованием как меченого тротила, так и гексогена. В табл. 1 приведены величины, рассчитанные при использовании меченого тротила. Поскольку в молекуле ТНТ атомы углерода не являются равноценными, расчет проведен как на один атом углерода (η_{nd}^1), так и на все семь (в предположении, что все атомы ТНТ равновероятно участвуют в реакциях).

В табл. 2 представлены величины, рассчитанные по результатам экспериментов с использованием меченого гексогена. Все углеродные атомы гексогена равноценны, поэтому вычисления проводились на весь содержащийся в молекуле углерод.

Анализ результатов экспериментов, приведенных в табл. 1 и 2, показал следующее.

— Основная доля наноалмазов для всех исследованных смесей образуется из углерода тротила.

— Сумма долей наноалмазов, образовавшихся из гексогена и ТНТ (при расчете на все семь атомов углерода), для всех смесей несколько меньше, но близка к 100 %. Это ука-

зывает почти на одинаковую степень участия различных атомов углерода тротила в химических реакциях образования продуктов детонации.

— Удельный выход алмазов из тротила во всех случаях превышает выход при использовании гексогена. При увеличении содержания сенсibilизатора доля B_{nd}^{TNT} вначале повышается, затем начиная с содержания ТНТ около 60 % рост прекращается и выход стабилизируется на уровне ≈ 12 %.

— Удельный выход наноалмазов из гексогена несколько возрастает при увеличении его содержания в смеси. Полученные результаты согласуются с данными по детонации смеси меченого гексогена с сажой [10], согласно которым $B_{nd}^{\text{TNT}} = 1.0 \pm 0.2$ %.

Сплавы тротил/октоген. Влияние дисперсности октогена на выход наноалмазов

При проведении данных работ использовался меченый тротил. В табл. 3 представлены величины, рассчитанные по результатам экспериментов с использованием октогена различной дисперсности (\bar{d} — средний диаметр частиц октогена).

В результате исследований установлено следующее.

— Выход алмазов возрастает при увеличении дисперсности октогена, причем для сплавов с меньшим его содержанием возрастание существенно выше.

— Влияние размера частиц сенсibilизатора носит двоякий характер:

для смесей с относительно небольшим содержанием октогена (30 % и менее) увеличение его дисперсности приводит к повышению удельного выхода алмазов из тротила (B_{nd}^{TNT}), в то время как доля наноалмазов, образовавшихся из ТНТ (η_{nd}^{TNT}), остается практически постоянной;

Таблица 2
Результаты экспериментов с использованием меченого гексогена

ВВ	$C_C^{\text{RDX}}, \%$	$\eta_{nd}^{\text{RDX}}, \%$	$B_{nd}^{\text{RDX}}, \%$
ТГ 80/20	9.87	2.6 ± 0.3 [7]	0.74 ± 0.08
ТГ 70/30	15.81	4.4 ± 0.6 [7]	0.99 ± 0.14
ТГ 60/40	22.61	4.9 ± 2.5 [7]	0.94 ± 0.48
		5.30 ± 0.5	1.02 ± 0.10
ТГ 40/60	39.66	14.0 ± 1.2 [7]	1.36 ± 0.12

Таблица 3

Результаты экспериментов с использованием меченого тротила и октогена различной дисперсности

ВВ	C_C^{TNT} , %	\bar{d} , мкм	B_{nd} , %	η_{nd}^{TNT} , %	B_{nd}^{TNT} , %
ТО 70/30	84.19	350	6.72	90.5 ± 4.1	8.7 ± 0.4
		8.83	9.47	92.7 ± 4.3	12.6 ± 0.6
ТО 50/50	69.53	350	6.65	92.7 ± 4.3	12.3 ± 0.6
		13.8	7.88	78.2 ± 3.6	12.3 ± 0.6

Таблица 4

Результаты экспериментов по синтезу наноалмазов из сплавов тротила с тэном и бензотрифуроксаном

ВВ	C_C^{TNT} , %	B_{nd} , %	η_{nd}^{PETN} , %	B_{nd}^{PETN} , %	η_{nd}^{TNT} , %	B_{nd}^{TNT} , %	η_{nd}^{BTF} , %	B_{nd}^{BTF} , %
ТТ 90/10	94.6	3.60	5.35 ± 0.21	1.92 ± 0.08	94.65*	3.78 ± 0.01	—	—
ТБ 60/40	66.0	8.13	—	—	79.5 ± 3.6	10.8 ± 0.5	20.5*	4.2 ± 0.7

Примечание. *Определено по разнице.

при содержании октогена 50 % и более размер его частиц не влияет на величину B_{nd}^{TNT} , однако значение η_{nd}^{TNT} при увеличении дисперсности значительно уменьшается.

Сплавы тротил/тэн, тротил/бензотрифуроксан

Указанные сенсibilизаторы выбраны для исследования синтеза наноалмазов в сплавах с тротилом по следующим причинам.

Тэн содержит в молекуле связанные друг с другом атомы углерода, но по своей структуре он отличается от тротила. Это мощное бризантное ВВ с небольшим отрицательным кислородным балансом (КБ = -10.1 %), по сравнению с ТНТ (КБ = -74.0 %), практически не дает конденсированного углерода в продуктах взрыва. Кроме того, тэн растворяется в тротиле в количестве 13 % [11]. Поэтому в сплавах при содержании тэна меньше этого значения исходные компоненты должны быть перемешаны на молекулярном уровне. Изучение синтеза наноалмазов в этом случае может дать информацию об образовании алмазных частиц из гомогенных смесей ВВ с различной молекулярной структурой. Исходя из этого в качестве объекта исследования была выбрана смесь ТНТ/тэн 90/10. После расплавления тротила и добавления к нему тэна последний растворялся, и для заливки использовался прозрачный раствор, в котором визуально кристаллы не наблюдались. При проведении данных работ использовался меченый тэн.

Бензотрифуроксан (БТФ) — безводородное ВВ, по мощности близкое к гексогену и октогену. Его молекула, как и тротил, содержит в структуре бензольное кольцо. Кислородный баланс бензотрифуроксана (-38.1 %) меньше, чем у гексогена (-21.6 %), поэтому при детонации он выделяет большее количество конденсированного углерода. По этим причинам выход наноалмазов из смесей тротила с БТФ должен быть довольно высоким. Кроме того, температура детонации этого ВВ очень высока и наноалмазы образуются более крупного размера [12]. При проведении данных работ использовался меченый тротил.

В табл. 4 приведены результаты экспериментов по синтезу наноалмазов из сплавов тротила с тэном и с бензотрифуроксаном. Расчет выполнен на все семь атомов углерода в молекуле тротила. Из табл. 4 видно, что, как и для смесей с гексогеном и октогеном, большая часть наноалмазов образуется из углерода тротила.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего, следует отметить, что содержание углерода тротила в общей массе углерода смеси ТНТ/тэн (C_C^{TNT}) равно доле наноалмазов, образовавшихся из этого компонента (η_{nd}^{TNT}) (см. табл. 4). Это указывает на одинаковую степень участия всех атомов углерода ТНТ и тэна в реакции образования алмазных частиц. Отсюда можно сделать вывод, что

для гомогенных смесевых ВВ в детонационной волне отдельные компоненты с различной структурой распадаются и реагируют совместно с образованием общих продуктов взрыва.

Другие изученные смеси являются гетерогенными, и для них нет соответствия между содержанием углерода тротила в общей массе углерода смесевого ВВ и долей образовавшихся из него алмазов. Для всех исследованных составов вторая величина заметно больше. Это может объясняться раздельным реагированием фрагментов, образующихся при разложении исходных молекул различных компонентов смеси, и отсутствием их перемешивания в процессе конденсации углерода. Указанный вывод особенно очевиден для смеси ТНТ/БТФ, поскольку оба компонента имеют структурно одинаковые углеродные фрагменты бензолных колец. Поэтому механизмы и кинетика процессов зародышеобразования и роста алмазных частиц до размеров в несколько тысяч (или десятков тысяч) атомов для этих веществ должны быть близки. Вывод об отсутствии смешения продуктов в гетерогенных смесях ВВ за время химической реакции в ДВ подтверждается также сравнением выхода наноалмазов, образовавшихся из углерода двух различных сенсibilизаторов — тэна в виде гомогенного раствора в тротиле (см. табл. 4) и гексогена (см. табл. 2). Несмотря на более высокий кислородный баланс (что означает меньшее количество свободного углерода в продуктах детонации), из тэна образуется заметно больше алмазной фазы конденсированного углерода, чем из гексогена.

Одно из объяснений значительного различия в удельных выходах наноалмазов, образовавшихся из тротила и гексогена (см. табл. 1, 2), состоит в том, что кислородный баланс гексогена больше, чем у тротила. В работе [13] выдвигается гипотеза, что компоненты мелкозернистых ВВ на основе тротила и гексогена или октогена перемешиваются при детонации до завершения формирования углеродных частиц и начала окисления углерода. Для объяснения различий в степени перехода углерода разных компонентов смеси в алмазную фазу предлагается механизм протекания реакций через стадию образования метана и зародышей наноалмаза. Более вероятным представляется механизм образования наноалмазов, основанный на термодинамическом подходе.

В детонационной волне за время химической реакции фрагменты распада молекул раз-

личных компонентов перемешиваются только в узкой зоне вблизи поверхности раздела фаз, где реагируют совместно с образованием «общих» продуктов. В остальных частях заряда реакции протекают независимо. Таким образом, в зоне химических реакций существуют «микрообъемы», которые характеризуются разным составом продуктов и разной температурой, поскольку последняя непосредственно связана с протеканием экзо- или эндотермических реакций, а ее выравнивание (вследствие теплопроводности) является вторичным процессом. Поэтому микрообъемы находятся в разных условиях по отношению к состоянию термодинамического равновесия углеродных фаз, а следовательно, могут различаться по фазовому составу конденсированных продуктов. (В общем случае микрообъемы могут характеризоваться разными давлением и плотностью, особенно в случае грубодисперсных смесей с размером частиц компонентов, сравнимым с шириной детонационной зоны.) Области «чистого» тротила (вне зоны смешения) характеризуются, по видимому, более низкой температурой, поэтому имеют более благоприятные условия для образования алмазной фазы углерода. В результате при одинаковом среднем давлении в микрообъемах гексогена (октогена) углерод может конденсироваться в форме графита (сажи), в то время как в микрообъемах тротила существуют условия термодинамической стабильности алмазной фазы. Узкая зона диффузионного перемешивания находится в промежуточных условиях. Скорость выравнивания (осреднения) детонационных параметров (температуры, давления и плотности — концентрации реагентов), а также массовая доля исходных веществ в разных микрообъемах зависят от состава ВВ и дисперсности компонентов.

Влияние состава ВВ на выход наноалмазов объясняется изменением среднего детонационного давления относительно линии фазового равновесия графита с алмазом. Если с ростом содержания сенсibilизатора детонационные параметры достигают таких значений, что процесс конденсации углерода в микрообъемах ТНТ заканчивается на линии фазового равновесия графита с алмазом, то дальнейшее повышение параметров не будет приводить к увеличению массы образующихся наноалмазов. Этим объясняется наличие стационарного участка на зависимости выхода алмазов из тротила (B_{nd}^{TNT}) от содержания сен-

сибилизатора в смеси (см. табл. 1). Некоторое повышение выхода наноалмазов из гексогена с ростом его содержания (см. табл. 2) обусловлено увеличением количества компонентов, находящихся в зоне смешения, и, возможно, изменением ширины этой зоны.

Механизм влияния дисперсности сенсibilизатора на выход наноалмазов заключается в следующем:

— в повышении доли исходных компонентов, успевших перемешаться до окончания реакций образования продуктов (при постоянной толщине объем зоны смешения пропорционален площади поверхности раздела компонентов);

— в увеличении скорости осреднения p, T -параметров для различных микрообъемов.

Экспериментальные результаты по влиянию дисперсности октогена (см. табл. 3) в рамках предложенного подхода объясняются следующим образом. При небольшом содержании сенсibilизатора (30 % и менее), когда расстояние между отдельными кристаллами сравнительно велико, повышение его дисперсности приводит к более равномерному нагружению тротила волной сжатия от реагирующих частиц октогена. В результате выход наноалмазов из тротила растет и стремится к значению на стационарном участке. В случае большого содержания октогена ($\approx 50 \div 60$ %) средние детонационные параметры во всем объеме тротила соответствуют области термодинамической стабильности алмазной фазы углерода. При повышении дисперсности октогена суммарный выход наноалмазов из заряда увеличивается вследствие роста количества алмазов, образующихся из сенсibilизатора. Это связано с ростом его массы в зоне смешения.

При анализе экспериментов не учитывались изотопные эффекты, обусловленные различием масс изотопов ^{12}C и ^{14}C . Представляется вероятным, что как термодинамический, так и кинетический изотопные эффекты не играют существенной роли в реакции синтеза наноалмазов, что можно объяснить следующими причинами.

Незначительное количество изотопа ^{14}C по сравнению с другими изотопами углерода практически не влияет на термодинамические свойства конденсированных продуктов детонации и фазовую диаграмму углерода.

Сравнение энергии, выделяющейся при детонации ВВ, с энергиями химических связей

в исходных молекулах показывает, что образование свободного углерода, не связанного с атомами других элементов [14], невозможно. Энергия, выделяющаяся при детонации тротила, не превышает 193 ккал/моль, а при детонации гексогена — 295.8 ккал/моль. Однако только для разрыва всех связей С—Н и С—N (т. е. для освобождения углеродного скелета молекулы от атомов другого сорта) в тротиле требуется 716 ккал/моль, а в гексогене — 733 ккал/моль. Энергии, выделяющейся при детонации этих ВВ в чистом виде или в смеси, недостаточно для образования свободного углерода, и процесс на первых стадиях должен протекать с охранением части связей.

Рост алмазных частиц до конечных размеров в несколько тысяч (или десятков тысяч) атомов осуществляется посредством быстрой коагуляции углеродных кластеров, а не в результате переноса отдельных атомов углерода к зародышам [15].

ВЫВОДЫ

В работе показано, что продукты взрыва различных компонентов гетерогенных ВВ не успевают существенно перемешаться в течение процесса конденсации углерода. Исходные молекулы компонентов смеси разлагаются на фрагменты и реагируют отдельно с образованием продуктов, которые различаются как по химическому, так и по фазовому составу. В случае гомогенной двухкомпонентной смеси тротила с тэном отдельные компоненты распадаются и реагируют совместно с образованием общих продуктов взрыва.

За время химической реакции в детонационной волне для гетерогенных смесевых ВВ однородные средние параметры не устанавливаются. Существуют микрообъемы с различными температурой, концентрацией реагентов и плотностью, а для грубодисперсных смесей, возможно, и с различным давлением.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макгайр Р., Орнелъяс Д., Акст И. Химия детонационных процессов: диффузионные явления в неидеальных взрывчатых веществах // Детонация и взрывчатые вещества: Сб. статей. М.: Мир, 1981. С. 160–169.
2. Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю. Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах //

- Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 3. С. 117–126.
3. **Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Коптюг В. А., Мальков И. Ю., Салахутдинов Н. Ф., Титов В. М.** Исследование процесса разложения в детонационной волне изотопным методом // Физика горения и взрыва. 1988. Т. 24, № 3. С. 121–122.
 4. **Анисичкин В. Ф., Дерендяев Б. Г., Мальков И. Ю., Салахутдинов Н. Ф., Титов В. М.** Исследование процесса детонации конденсированных ВВ изотопным методом // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 879–881.
 5. **Анисичкин В. Ф.** Результаты исследований механизма детонации тротила, гексогена и октогена методом изотопных индикаторов // Физика горения и взрыва. 2007. Т. 43, № 5. С. 96–103.
 6. **Козырев Н. В., Сакович Г. В., Сен Чел Су и др.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов // V Всесоюз. совещ. по детонации: Сб. докл. Красноярск, 1991. Т. 1. С. 176–179.
 7. **Козырев Н. В., Брыляков П. М., Сен Чел Су и др.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов методом меченых атомов // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314, № 4. С. 889–891.
 8. **Козырев Н. В., Калашникова Г. С., Голубева Е. С. и др.** Исследование механизма влияния дисперсности октогена на синтез ультрадисперсных алмазов // X Симпоз. по горению и взрыву. Детонация: Тез. докл. Черногловка, 1992. С. 120–122.
 9. **Козырев Н. В., Голубева Е. С.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсных алмазов из смесей тротила с гексогеном, октогеном, тэном // Физика горения и взрыва. 1992. Т. 28, № 5. С. 119–123.
 10. **Козырев Н. В., Сакович Г. В., Сен Чел Су.** Исследование процесса синтеза алмазов из смеси взрывчатого вещества с углеродной добавкой изотопным методом // Физика горения и взрыва. 2005. Т. 41, № 5. С. 117–118.
 11. **Орлова Е. Ю.** Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л.: Химия, 1973.
 12. **Мальков И. Ю., Филатов Л. И., Титов В. М., Литвинов Б. В., Чувиллин А. Л., Тесленко Т. С.** Образование алмаза из жидкой фазы углерода // Физика горения и взрыва. 1993. Т. 29, № 4. С. 131–134.
 13. **Анисичкин В. Ф.** О механизме выделения углерода при детонационном разложении веществ // Физика горения и взрыва. 1994. Т. 30, № 5. С. 100–106.
 14. **Бреусов О. Н.** К вопросу о механизме динамического синтеза алмаза из органических веществ // Хим. физика. 2002. Т. 21, № 11. С. 110–112.
 15. **Titov V. M., Anisichkin V. F., Mal'kov I. Yu.** Synthesis of ultrafine diamonds in detonation waves // Papers 9th Symp. (Intern.) on Detonation. Prepr. Portland, 1989. P. 175–183.

Поступила в редакцию 15/1 2008 г.