

УДК 666.233

## ПОЛУЧЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ АЛМАЗОВ ИЗ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. Ю. Долматов<sup>1</sup>, Д. В. Руденко<sup>1</sup>, А. О. Дорохов<sup>2</sup>, А. А. Малыгин<sup>3</sup>,  
А. С. Козлов<sup>1</sup>, В. А. Марчуков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Специальное конструкторско-технологическое бюро «Технолог», 192076 Санкт-Петербург  
diamondcentre@mail.ru

<sup>2</sup>Завод «Пластмасс», 456604 Копейск

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет)  
190013 Санкт-Петербург

Разработан способ получения детонационных наноалмазов из тетрила путем подрыва последнего в водной оболочке при массовом соотношении взрывчатое вещество / вода =  $1/(10 \div 14)$ . Предложенный процесс обеспечивает выход целевого продукта в количестве  $6 \div 7\%$  от исходной массы реагента при содержании наноалмазов в образовавшейся шихте  $57 \pm 6\%$ . Показано, что в плане экономичности и безопасности процесса подготовки зарядов использование индивидуальных взрывчатых веществ имеет преимущества по сравнению с известными многокомпонентными составами.

Ключевые слова: детонационные наноалмазы, алмазная шихта, индивидуальные взрывчатые вещества, тетрил, удельная мощность, кислородный баланс.

DOI 10.15372/FGV20210212

### ВВЕДЕНИЕ

Первая работа о синтезе детонационных наноалмазов (ДНА) (ранее — ультрадисперсных алмазов) была опубликована в 1984 г. [1]. В настоящее время существует достаточно широкий набор способов получения ДНА [2–7]. Как известно, процесс синтеза протекает практически мгновенно (сотые или десятые доли микросекунды) при высоких градиентах давления и температуры в зоне химических реакций и за плоскостью Чепмена — Жуге. При этом важными являются такие вопросы, как механизм образования и регулирование размеров кристаллов ДНА, экономичность и экологичность процесса подрыва зарядов взрывчатого вещества (ВВ) при их получении [8–12]. Так, в работе [13] дано описание существующих представлений о механизме синтеза ДНА из жидких капель углерода. В работе [14] показано, что изменить размер частиц ДНА с помощью микроструктурированных зарядов невозможно. В работе [15] исследовано влияние раз-

мера наночастиц ВВ на размер получаемых частиц ДНА; так, использование частиц ВВ размером до 40 нм приводит к образованию ДНА со средним размером 2.8 нм (вместо  $4 \div 6$  нм при классическом подрыве заряда тротил — гексоген). Увеличение количества мест зарождения ДНА отражается на их размере. А поскольку количество углерода, из которого образуется ДНА, скорее всего, не меняется, то размер частиц наноалмазов, как мы видим, уменьшается.

Известно, что на образование ДНА действует множество факторов: состав молекулы ВВ (или смеси ВВ), удельная мощность ВВ [16], кислородный баланс и плотность заряда [17], наличие или отсутствие оболочки у заряда [5, 6], состав газовой среды во взрывной камере [5, 6], соотношение длины и диаметра заряда [5], место инициирования и др. Первые четыре параметра являются определяющими.

Для получения ДНА используют смесевые заряды, как правило, тротила с гексогеном, для которых подобраны оптимальные значения удельной мощности, кислородного баланса, плотности заряда и наиболее подходящий тип оболочки. Однако с технологической и экономической точки зрения оптимальным было бы использование индивидуального ВВ: нет необ-

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-29-19112).

© Долматов В. Ю., Руденко Д. В., Дорохов А. О., Малыгин А. А., Козлов А. С., Марчуков В. А., 2021.

ходимости в проведении опасных и трудоемких стадий дробления и смешения различных ВВ, исключается применение дефицитного и дорогостоящего гексогена. Кроме того, желательным является использование утилизируемого ВВ, обладающего достаточно большой мощностью и чувствительностью к инициирующему импульсу и дающее значительный выход ДНА. Всем этим требованиям отвечает утилизируемый тетрил (N-метил-2,4,6-тринитрофенилнитрамин).

Таким образом, анализ литературных данных и результатов ранее проведенных авторами исследований по синтезу детонационных наноалмазов показал, что в целях экономичности и безопасности подготовки зарядов предпочтительнее использовать в качестве исходных не смеси ВВ, а индивидуальные соединения [5–7].

Цель настоящей работы заключается в разработке процесса получения детонационных наноалмазов с использованием утилизируемого тетрила и в сравнительном анализе полученных результатов с альтернативными технологиями.

## ЭКСПЕРИМЕНТ

Исследование детонационного синтеза проводили во взрывной камере «Альфа-2М» объемом 2.14 м<sup>3</sup>. Заряды ВВ готовили прессованием до давлений 1 200 ÷ 1 400 кгс/см<sup>2</sup>. Масса заряда 500 г, каждый эксперимент осуществляли подрывом подряд пяти зарядов. Подрыв, как правило, проводили в водной оболочке, в ряде случаев — в водном растворе уротропина. Массовое соотношение ВВ/Н<sub>2</sub>О составляло 1/(10 ÷ 14). Диаметр цилиндрического заряда 60 мм, длина ≈120 мм. Газовая среда взрывной камеры — газовые продукты предыдущих взрывов, имеющие неокислительный характер и содержащиеся в основном СО<sub>2</sub>, СО, N<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>.

Очистку ДНА из алмазной шихты осуществляли водным раствором (5 ÷ 10)%-й HNO<sub>3</sub> в присутствии нитрата аммония (5 ÷ 15 %) при температуре ≈230 °С и давлении ≈80 атм [18].

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результаты исследований, изложенные в работах [19–22], свидетельствуют, что при детонационном превращении высокоплотных

смесей типа тротил — гексоген (октоген) за время образования ДНА не происходит полного объемного перемешивания продуктов разложения компонентов заряда, а происходит лишь существенно ограниченное смешение по границам зерен ВВ. Таким образом, различные компоненты заряда реагируют в своем объеме, и образование частиц ДНА из «свободного» углерода, выделяющегося при распаде молекул ТНТ и другого ВВ в смеси, идет в основном независимо.

Для промышленного крупнотоннажного производства ДНА необходимо производство или наличие в больших количествах ВВ по доступным ценам.

В работе [23] исследованы зависимости скорости детонации  $D$  и электрического сопротивления продуктов детонации  $R$  тетрила и пикриновой кислоты от плотности заряда ВВ  $\rho$ . Было показано, что перегиб на прямой зависимости  $D(\rho)$  (в сторону меньших значений  $D$ ) свидетельствует о начале образования ДНА: для тетрила — при  $\rho = 1.584$  г/см<sup>3</sup>, для пикриновой кислоты — при  $\rho = 1.576$  г/см<sup>3</sup>.

Зависимости  $R(\rho)$  для тетрила и пикриновой кислоты практически совпадают. Уменьшение  $R$  с возрастанием  $\rho$  при низкой плотности зарядов (до 1.46 г/см<sup>3</sup>) обусловлено увеличением степени диссоциации воды и содержания свободного проводящего углерода [23]. При высоких плотностях зарядов (>1.5 г/см<sup>3</sup>)  $R$  возрастает с увеличением  $\rho$ , что объясняется появлением и увеличением доли непроводящей алмазной фазы [23].

С помощью электромагнитного измерения массовой скорости было определено давление в плоскости Чепмена — Жуге при плотности, соответствующей излому на зависимости  $D(\rho)$  для тетрила, давление составило ≈20 ÷ 21 ГПа. Для пикриновой кислоты значение аналогичного параметра около 19 ГПа, для ТНТ — 16 ÷ 17 ГПа [24].

Отклонение зависимостей  $D(\rho)$  тетрила и пикриновой кислоты от прямой значительно больше, чем в случае ТГ 50/50, несмотря на близкие кислородные балансы (для тетрила КБ = -47.4 %, для пикриновой кислоты КБ = -45.4 %, для ТГ 50/50 КБ = -47.8 %). Это связано с различием структуры индивидуальных и смесевых ВВ. В ТГ 50/50 частицы ТНТ отделены друг от друга частицами гексогена, что влияет на кинетику образования ДНА и на степень отклонения режима детонации от иде-

Выход алмазной шихты (АШ) и ДНА в зависимости от вида индивидуального ВВ и условий синтеза

Номер опыта	ВВ	КБ, %	Среда подрыва	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Выход АШ, %	Содержание ДНА в АШ, %	Выход ДНА, %	Содержание золы в ДНА, %
1	Тротил [28]	-74.0	Азот, без оболочки	1.59	18*	15.0	2.7	Нет данных
2	Гексоген [27]	-21.6	Азот, без оболочки	1.61	7.0*	8.6	0.6	Нет данных
3	Z-ТАКОТ [29]	-74.2	Нет данных	1.603	18.4*	18.2	3.34	Нет данных
4	ГНАБ [29]	-49.5	Нет данных	1.63	9.47*	70.0	6.63	Нет данных
5	ТАТБ [25]	-55.8	Азот, без оболочки	1.83	15.9*	13.3	2.08	Нет данных
6	Тетрил [27]	-47.4	Азот, без оболочки	1.61	9.10*	45.1	4.10	Нет данных
7	Тротил, чешуйчатый, прессованный	-74.0	Водная оболочка	1.567	19.04	4.7	0.94	1.86
8	Тротил, мелкодисперсный	-74.0	Водная оболочка	1.578	19.74	3.4	0.71	1.41
9	Гексоген	-21.6	Водная оболочка	1.611	4.1	21.5	1.08	2.87
10	Пикриновая кислота (2,4,6-тринитрофенол)	-45.4	Водная оболочка	1.490	12.45	3.68	0.46	2.71
11	Пикриновая кислота (влажность 7.7 %)	-45.4	Газовая среда — продукты детонации, водная бронировка	1.570	13.14	9.13	1.20	3.19
12	Тетрил (повторение опыта № 6)	-47.4	Азот, без оболочки	1.642	0.97	38.0	0.37	54.16
13	Тетрил	-47.4	Водная оболочка	1.645	9.59	63.06	6.32	0.73
14	Тетрил	-47.4	Оболочка из водного раствора уротропина	1.644	10.30	50.94	7.05	0.46

Примечания. Опыты 2, 5, 6 — объем взрывной камеры 0.175 м<sup>3</sup>; тротил — 2,4,6-тринитротолуол; гексоген — 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексан; Z-ТАКОТ — 2,4,8,10-тетранитро-5Н-бензотриазоло-2,1-а/-бензотриазоли-6-ум; ГНАБ — бис(2,4,6-тринитрофенил)-диазин; ТАТБ — 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензол; тетрил — N-метил-2,4,6-тринитрофенилнитрамин; пикриновая кислота — 2,4,6-тринитрофенол; опыты 7–14 — газовая среда предыдущих подрывов.

ального.

Как известно, использование оболочки заряда даже толщиной, равной радиусу заряда ВВ, снижает давление на стенки взрывной камеры в два раза по сравнению со взрывом такого же заряда, но без оболочки [19]. В предлагаемом варианте (при массовом соотношении ВВ / водная оболочка = 1/(10 ÷ 14)) толщина оболочки превосходит радиус заряда ВВ в 8 ÷ 10 раз. Взрыв заряда в такой системе

снижает скорость разгрузки продуктов детонации, приближая их состав к равновесному при окислении углерода до СО<sub>2</sub>. Кроме того, водная оболочка позволяет обеспечить максимально полное взаимодействие в зоне химических реакций, удержать давление и температуру еще в течение доли микросекунды, обеспечивая большее время для образования кристаллитов ДНА, увеличивая их количество. При этом наличие водной оболочки заряда способствует

быстрому отводу избыточного тепла при взрыве, препятствуя графитизации ДНА и окислению водой и углекислым газом.

Анализ данных, представленных в таблице, свидетельствует, что использованные ранее индивидуальные ВВ или дают малый выход ДНА (опыты 1–3, 5, 6) или не производятся в промышленных масштабах (опыт 4).

Авторы [25] использовали прессованный цилиндрический заряд ТАТБ высокой плотности ( $1.83 \text{ г/см}^3$ ), что должно обеспечить, по их теоретическим расчетам, выход ДНА около 13 % (максимальный выход ДНА из ТГ по многолетней практике не превышает 8.5 %), а для насыпного заряда тринитроаминобензола (плотность  $1.05 \text{ г/см}^3$ ) выход должен составлять примерно 5.5 %. После проведения экспериментов для прессованного заряда (опыт 5) получен выход ДНА только 2.08 %, а насыпного заряда — 0.14 % (в работе [17] рекомендовано использовать плотность заряда не менее  $1.6 \text{ г/см}^3$ ).

Авторы [25] объясняют неудачу тем, что заряд ТАТБ имеет большой критический диаметр (более 6 мм [26]). Однако этот размер в  $3 \div 7$  раз меньше, чем диаметр заряда ТАТБ в [25], и вряд ли влияет на выход ДНА. Давление инертного газа (азота) в камере составляло 9 атм, что должно благоприятно сказаться на выходе ДНА. Однако этого не произошло. По-видимому, причина небольшого выхода ДНА обусловлена, наряду с влиянием других факторов, отсутствием водной оболочки заряда. Как свидетельствуют эксперименты (см. опыты 12–14 в таблице), использование оболочки увеличивает выход ДНА в  $\approx 20$  раз.

Тем не менее изменение условий синтеза ДНА, предложенное авторами настоящей статьи, потребовало повторить синтез ДНА из тротила, гексогена, тетрила и исследовать новый способ получения наноалмазов из пикриновой кислоты (2,4,6-тринитрофенола).

Использование водной (или водноротропиновой) оболочки заряда позволило увеличить время поддержания высоких значений температуры и давления в зоне химических реакций и эффективно снизить температуру в постдетонационных процессах, сохраняя образовавшиеся ДНА.

Данные опытов 7 и 8 (см. таблицу) показали, что прессование до одинаковой плотности промышленного (чешуйчатого) ТНТ и мелкодисперсного (перекристаллизованного из аце-

тона) ТНТ дают практически один и тот же небольшой выход ДНА ( $0.7 \div 0.9 \%$ ), несмотря на наличие водной оболочки у заряда. Выход ДНА из гексогена в водной оболочке в опыте 9 ( $\approx 1.1 \%$ ) в сравнении с опытом 2 без оболочки ( $0.6 \%$ ) в два раза выше, но все равно очень мал.

Впервые был исследован процесс получения ДНА из промышленно выпускаемой пикриновой кислоты (опыты 10 и 11) в двух вариантах: стабилизированная 7.5 %  $\text{H}_2\text{O}$  и сухая (более опасная в обращении). Несмотря на наличие водной оболочки, выход ДНА в этом случае также был небольшим — 0.46 и 1.2 % соответственно. Таким образом, использование пикриновой кислоты для промышленного производства ДНА экономически не эффективно.

В опыте 12 были апробированы условия получения ДНА из тетрила согласно работе [27] (без оболочки). Однако выход ДНА также оказался ничтожно малым (0.37 %) и непригодным для промышленного производства. Только использование водной или водноротропиновой оболочки (опыты 13, 14) увеличило выход ДНА примерно в 20 раз — до  $6.3 \div 7.05 \%$  при минимальном количестве несгораемых примесей в ДНА  $0.36 \div 0.94 \%$ . Данный метод, с учетом больших запасов тетрила, позволяет рекомендовать разработанный способ получения ДНА для промышленного производства. Кислородный баланс тетрила — 47.4 %, что находится в интервале рекомендуемого диапазона КБ =  $-35 \div -55 \%$  [17], плотность заряда при достаточно безопасном давлении прессования  $1200 \div 1400 \text{ кгс/см}^2$  составляет рекомендуемую величину  $\approx 1.64 \text{ г/см}^3$  [17]. Удельная мощность тетрила ( $46000 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{мкс)}$ ) и давление в плоскости Чепмена — Жуге (26.7 ГПа) [26] также соответствуют рекомендуемым диапазонам  $30000 \div 60000 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{мкс)}$  [16] и  $21 \div 28 \text{ ГПа}$  [16] соответственно. Таким образом, предварительная оценка возможного выхода ДНА из тетрила указывает на возможность получения высокого выхода наноалмаза, что и было продемонстрировано при экспериментальном воплощении нового варианта синтеза ДНА.

Полученные зависимости (рис. 1–4) выхода ДНА и алмазной шихты (АШ) от кислородного баланса и от плотности заряда ВВ позволяют сделать выводы о предпочтительных условиях реализации процесса синтеза ДНА.

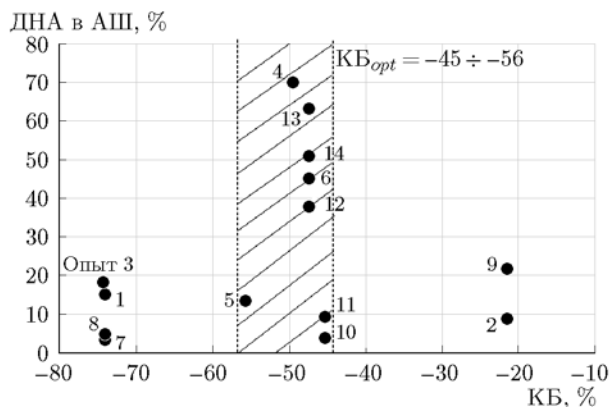


Рис. 1. Зависимость выхода ДНА от кислородного баланса:

цифры около точек — номер опыта

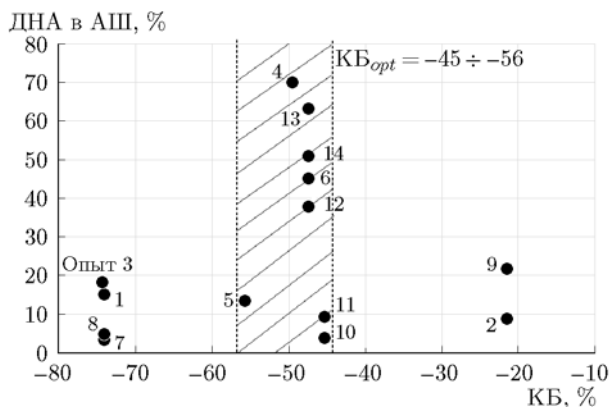


Рис. 3. Зависимость содержания ДНА в АШ от кислородного баланса:

цифры около точек — номер опыта

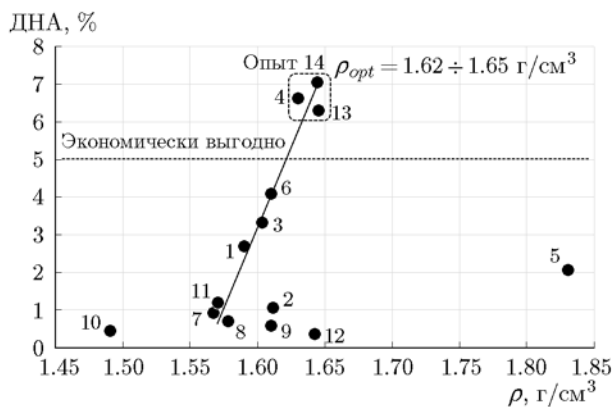


Рис. 2. Зависимость выхода ДНА от плотности заряда:

цифры около точек — номер опыта

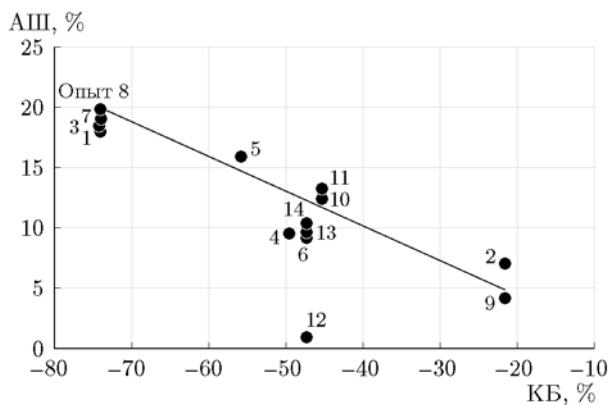


Рис. 4. Зависимость выхода АШ от кислородного баланса:

цифры около точек — номер опыта

Кислородный баланс в пределах  $-45 \div -56 \%$  (рис. 1) и плотность заряда ВВ в интервале  $1.62 \div 1.65 \text{ г/см}^3$  (рис. 2) дают возможность обеспечить экономически приемлемый выход ДНА в количестве 5 %. Аналогичное значение кислородного баланса также предпочтительно для оптимизации выхода ДНА и АШ (рис. 3). При этом наблюдается практически прямо пропорциональная зависимость выхода АШ от кислородного баланса (рис. 4). Таким образом, анализ полученных зависимостей позволяет в прогнозном порядке определять выход ДНА, АШ и содержание ДНА в АШ по значениям кислородного баланса и плотности заряда.

## ВЫВОДЫ

Разработан новый промышленный способ получения ДНА из индивидуального ВВ — тетрила с большим выходом ( $6 \div 7 \%$ ) и высоким содержанием ДНА в алмазной шихте ( $51 \div 63 \%$ ), что существенно упрощает химическую очистку ДНА. Обогащенная ДНА алмазная шихта может найти применение в качестве модифицирующих добавок в полимерной химии, гальванике, маслах и смазках без дополнительной обработки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ставер А. М., Губарева Н. В., Лямкин А. И., Петров Е. А. Ультрадисперсные алмазные порошки, полученные с использованием энергии взрыва // Физика горения и взрыва. — 1984. — Т. 20, № 5. — С. 100–104.
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. Коломийчук В. И., Мальков И. Ю. Исследование синтеза ультрадисперсной алмазной фазы в условиях детонации смесевых составов // Физика горения и взрыва. — 1993. — Т. 29, № 1. — С. 120–128.
4. Митрофанов В. В., Титов В. М. О смешении продуктов детонации смесевых взрывчатых веществ в зоне химических реакций // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 5. — С. 102–107. — DOI: 10.15372/FGV20160509.
5. Даниленко В. В. Взрыв: физика, техника, технология. — М.: Энергоатомиздат, 2010.
6. Долматов В. Ю. Детонационные наноалмазы. Получение, свойства, применение. — СПб.: НПО «Профессионал», 2011.
7. Пат. РФ № 22712551 от 11.03.2019. Способ получения детонационных наноалмазов / Долматов В. Ю., Руденко Д. В., Лисицин О. Н., Киселев М. Н., Дорохов А. О., Денисов И. В.
8. Rubtsov I. A., Ten K. A., Prueel E. R., Kashkarov A. O., Kremenko S. I., Voronin M. S., Shekhtman L. I., Zhulanov V. V., Tolochko B. P. Methods to restore the dynamics of carbon condensation during the detonation of high explosives // J. Phys.: Conf. Ser. — 2019. — V. 1147, N 1. — P. 012038.
9. Толочко Б. П., Чернышев А. П., Боханов Б. Б., Тен К. А., Пруэл Э. Р., Ляхов Н. З. Исследование превращения адамантан — алмаз. Радикальный механизм образования наночастиц алмаза при ударно-волновом воздействии на адамантан // Журн. структур. химии. — 2016. — Т. 57, № 7. — С. 1550–1557.
10. Долматов В. Ю. О механизме детонационного синтеза наноалмазов // Сверхтвердые материалы. — 2008. — № 4 (174). — С. 25–34.
11. Долматов В. Ю., Юрьев Г. С., Мюллюмаки В., Королев К. М. Почему детонационные наноалмазы маленькие // Сверхтвердые материалы. — 2013. — № 2. — С. 21–28.
12. Долматов В. Ю., Мюллюмаки В., Веханен А. Возможный механизм образования наноалмаза при детонационном синтезе // Сверхтвердые материалы. — 2013. — № 3. — С. 19–28.
13. Pichot V., Comet M., Risse B., Spitzer D. Detonation of nanosized explosive: New mechanistic model for nanodiamond formation // Diam. Relat. Mater. — 2015. — V. 54. — P. 59–63.
14. Pichot V., Risse B., Schnell F., Mory J., Spitzer D. Understanding ultrafine nanodiamond formation using nanostructure explosives // Sci. Rep. — 2013. — V. 3. — Article ID 2159.
15. Nanodiamonds: Advanced Material Analysis, Properties and Applications / J.-Ch. Arnault (Ed.). — Elsevier Science, 2017.
16. Dolmatov V. Yu., Myllymäki V., Vehanen A., Dorokhov A. O., Kiselev M. N. Dependence of the detonation nanodiamond yield on the detonation process parameters // J. Superhard Mater. — 2019. — V. 41, N 5. — P. 1–5.
17. Долматов В. Ю. Влияние условий детонационного синтеза на выход конденсированного углерода и детонационного наноалмаза на примере смесового заряда тротила и гексогена // Сверхтвердые материалы. — 2018. — № 4. — С. 82–87.
18. Пат. РФ № 2599665 от 10.10.2016. Способ очистки детонационных нанодисперсных алмазов / Макаров И. А., Королев К. М., Марчуков В. А., Колодяжный А. Л., Суцев В. Г.
19. Анисичкин В. Ф. Об особенностях ударно-волнового разложения и синтеза алмаза из ароматических соединений // V Всесоюз. совещ. по детонации, Красноярск, 5–12 августа 1991: сб. докл. — Черноголовка: ИМТЕХ, 1991. — Т. 1. — С. 20–26.
20. Долматов В. Ю., Фуджимура Т., Марчуков В. А., Суцев В. Г., Веретенникова М. В. Опыт промышленного синтеза детонационных алмазов // 5-й Междунар. симпоз. «Алмазные пленки и пленки родственных материалов», Харьков, Украина, 22–27 апреля 2002: сб. докл. — НИЦ ХФТИ, ИПЦ «Контраст», 2002. — С. 33–40.
21. Пат. РФ № 2036835 от 10.06.95. Способ получения ультрадисперсного алмаза / Мисоночников А. Л., Румянцев Б. В.
22. Анисичкин В. Ф. О механизме детонации органических взрывчатых веществ // Хим. физика. — 2016. — Т. 35, № 6. — С. 1–5.
23. Першин С. В., Цаплин Д. Н., Антипенко А. Г. О возможности образования алмаза при детонации тетрила // V Всесоюз. совещ. по детонации, Красноярск, 5–12 августа 1991: сб. докл. — Черноголовка: ИМТЕХ, 1991. — Т. 2. — С. 233–236.
24. Першин С. В., Цаплин Д. Н. Динамические исследования детонационного синтеза плотных фаз вещества // Всесоюз. совещ. по детонации, Красноярск, 5–12 августа 1991: сб. докл. — Черноголовка: ИМТЕХ, 1991. — Т. 2. — С. 237–244.
25. Петров Е. А., Барабошкин К. С., Бычин Н. В., Ларионов Б. В., Байромьян И. В. Исследование ТАТБ для детонационного синтеза наноалмазов // VI Ставеровские чтения «Ультрадисперсные порошки, наноструктуры, материалы», 9–12 сентября 2012, Красноярск: сб. докл. — Красноярск: СФУ, 2012. — С. 14–15.

26. **Краткий** энциклопедический словарь. Энергетические конденсированные системы / под ред. Б. П. Жукова. — Изд. 2-е, исправл. — М.: Янус К, 2000.
27. **Петров Е. А.** Исследование физико-химических процессов детонационного синтеза наноалмазов // Междунар. науч.-техн. и методическая конф., 22–24 декабря 2004, Казань: сб. докл. — 2004. — С. 881–888.
28. **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.
29. **Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю., Сагдиев Ф. А.** Синтез алмаза при детонации ароматических нитросоединений // V Всесоюз. совещ. по детонации, Красноярск, 5–12 августа 1991: сб. докл. — Черногоровка: ИМТЕХ, 1991. — Т. 1. — С. 27–30.

*Поступила в редакцию 24.12.2019.*

*После доработки 16.03.2020.*

*Принята к публикации 24.04.2020.*

---