

**В. Ю. Долматов^{1*}, V. Myllymäki², A. Vehanen²,
А. О. Дорохов³, М. Н. Киселев³**

¹Федеральное государственное унитарное предприятие
“Специальное конструкторско-технологическое бюро
“Технолог”, Санкт-Петербург, Россия

²“CarbodeonLtd. Oy”, Ваанта, Финляндия

³АО “Завод “Пластмасс”, г. Копейск, пос. Советов, Россия

*diamondcentre@mail.ru

Зависимость выхода детонационных наноалмазов от параметров детонационного процесса

Для определения зависимости выхода детонационных наноалмазов от мощности используемых взрывчатых веществ было введено новое понятие – удельная мощность взрывчатых веществ (с которой связана скорость детонации и давление газов в плоскости Чепмена-Жуге), равная отношению теплоты взрыва к единице массы и времени. Найдена зависимость выхода детонационных наноалмазов от скорости детонации и давления в плоскости Чепмена-Жуге. Оптимальный (> 5 % (по массе)) выход детонационных наноалмазов происходит при значении удельной мощности взрывчатых веществ 30000–60000 кДж/(кг·мкс), скорости детонации 7250–8000 м/с, давлении в плоскости Чепмена-Жуге 21–28 ГПа.

Ключевые слова: детонационные наноалмазы, мощность взрывчатых веществ, давление в плоскости Чепмена-Жуге, выход наноалмазов, скорость детонации, теплота взрыва, состав зарядов взрывчатых веществ.

В настоящее время процесс синтеза детонационных наноалмазов (ДНА) из зарядов смеси тротила и гексогена достаточно хорошо изучен, известны оптимальные эмпирические значения основных управляющих параметров синтеза: состав заряда (~ 60 % тротила и ~ 40 % гексогена), плотность заряда (1,6–1,7 г/см³) [1], оптимальный кислородный баланс (–35–(–60)) [1], наличие водной или водно-солевой бронировки заряда [2], неокислительная, а лучше, восстановительная среда подрыва [3], давление (> 17 ГПа) и температура (не менее 3000 К) в зоне химической реакции (ЗХР) [4]. Однако количественная зависимость выхода ДНА от реальной мощности смесевых и индивидуальных взрывчатых веществ (ВВ), от давления продуктов детонации (ПД) в плоскости Чепмена-Жуге и от скорости детонации зарядов ВВ не установлена. Установление этих зависимостей является целью настоящей работы.

Наиболее универсальной характеристикой для ВВ, по мнению автора, является мощность ВВ и связанный с ней выход ДНА (при прочих равных условиях). Однако принятое определение мощности ВВ в “тротиловом эквиваленте” оценивает работу продуктов детонации (ПД) ВВ (фугасность и бризантность ВВ) и не является научным определением мощности ВВ в процессе синтеза ДНА.

Мощность, определяемая во взрывотехнике как теплота, выделяемая при взрыве на единицу массы, также не может быть использована для точных расчетов и не является классическим определением мощности, под которой понимают выделение энергии в единицу времени.

В процессе синтеза ДНА за единицу времени выделения энергии при взрыве можно принять время химической реакции, равное времени прохождения элемента ВВ и ПД от фронта детонационной волны до плоскости Чепмена-Жуге (т. е. от начала до конца зоны химической реакции). Это время составляет десятые и сотые доли микросекунды. Для многих практических расчетов точное время существования ЗХР имеет определяющее значение, так как позволяет определить реальную мощность ВВ, которая сильно отличается для разных типов ВВ или их смесей и влияет на выход ДНА при прочих равных условиях. Поэтому было предложено определять мощность ВВ как отношение теплоты взрыва единицы массы к единице времени*, т. е.

$$W = \frac{Q}{\tau},$$

где W – мощность ВВ, кДж/(кг·мс); Q – теплота взрыва, кДж/кг; τ – время выделения энергии от фронта детонационной волны до плоскости Чепмена-Жуге, мкс.

Теплота взрыва отдельных видов ВВ и их смесей определена многократно и незначительно зависит от методики определения и конкретных исполнителей [5, 6], время существования ЗХР достаточно точно определено в [7, 8]. Однако выход ДНА сильно зависит от условий проведения процесса детонационного синтеза.

Все данные по выходу ДНА были определены автором данной работы, все подрывы проведены во взрывной камере Альфа-2-М емкостью 2,14 м³, заряды изготавливал и подрывал один и тот же оператор, подрыв производили в водной бронировке.

Основные параметры детонационного процесса получения ДНА (экспериментальные и из литературных источников) приведены в таблице. Видно, что мощность для разных типов ВВ или их смесей отличается в ~ 6 раз, а количество выделяемого тепла – максимально в 1,35 раза.

Теплоту взрыва рассчитывали также по аддитивности (по пропорциональному вкладу составляющих смесь индивидуальных ВВ). Предварительно по хорошо известным тепловым эффектам смесевых ВВ было установлено, что такой расчет дает ошибку 1,4–1,8 %, что в данном случае несущественно.

На рис. 1 представлена зависимость выхода ДНА от мощности ВВ. Если принять оптимальный выход ДНА ≥ 5 % (по массе), то следует использовать ВВ, обладающие мощностью 30–60 кДж/(кг·мс). Лучший результат был получен при использовании состава ТГ 60/40, подорванного в водной бронировке. Вместе с тем, можно использовать заряды ТГ 50/50, ТГ 40/60, ТГ 36/64 и тетрил.

Использование зависимости выхода ДНА от давления ПД в плоскости Чепмена-Жуге показывает, что давление ПД должно быть в диапазоне 21–28,5 ГПа (рис. 2).

* В качестве единицы массы целесообразно использовать 1 кг или 1 моль ВВ, а в качестве единицы времени – 1 мкс, соизмеримую со временем протекания процессов в зоне химической реакции (время, необходимое для продвижения вещества от фронта детонационной волны до плоскости Чепмена-Жуге, где завершается химическая реакция).

Параметры детонационного процесса зарядов тротил–гексогена и тетрила

ВВ или состав смеси	Кислородный баланс, %	Плотность заряда, г/см ³	Q, кДж/кг	τ , мкс	W, кДж/кг·мкс	Выход ДНА, % (по массе)	Скорость детонации, мкс	Давление в плоскости Ч-Ж**, ГПа
Тринитротолуол (ТНТ) (литой)	-74	1,62	4232 [5, 6]	0,29 [8]	14593	1,06	6850 [7]	ср. 18,5 [13]
ТГ 70/30	-58,3	1,61	4684*	0,08 [8]	58550	4,7	7420 [5]	27,6 [13]
ТГ 60/40	-53,0	1,66	4835*	0,14 [8]	34540	7,2	7510 [5]	22,3 [9]
ТГ 50/50	-47,8	1,62	4944 [5]	0,13 [8]	38031	6,0	7670 [8]	24,6 [10]
ТГ 40/60	-42,6	1,66	5137*	0,11 [8]	46700	5,8	7850 [12]	26,0 [4]
ТГ 36/64 (прессованный)	-40,5	1,68	5197*	0,10 [7]	51970	5,4	8000 [7]	ср. 28,1 [13]
ТГ 30/70	-37,3	1,60	4969 [6]	0,08 [8]	66100	4,4	8052 [5]	21,4 [15]
Гексоген (ГГ)	-21,6	1,68	5740 [12]	0,07 [8]	82000	1,1	8670 [12]	34,5 [12];
Тетрил	-47,4	1,65	4602 [5]	0,10 [7]	46000	5,6	7500 [7]	26,7 [13]

*По известным значениям теплоты взрыва тротила и гексогена по методу аддитивности можно легко определить теплоту взрыва этих смесей [6].

**Плоскость Чепмена-Жуге.

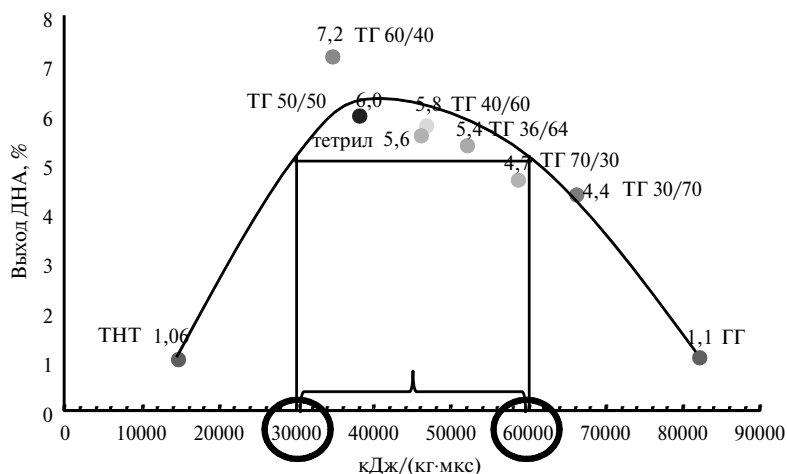


Рис. 1. Зависимость выхода ДНА от мощности ВВ.

Зависимость выхода ДНА от скорости детонации (интегральный показатель) показывает (рис. 3), что необходимо использовать ВВ, имеющие скорость детонации от 7250 до 8000 м/с, т. е. зная скорость детонации ВВ или состав их смеси можно с достаточной точностью оценить выход ДНА из этих продуктов.

На рис. 4 представлена практически прямо пропорциональная зависимость между скоростью детонации ВВ и их мощностью. Таким образом, зная скорость детонации можно достаточно точно определить удельную мощность ВВ и их составов. Однако данные по мощности ТГ 70/30 [8] неоправданно сильно выпадают из этой зависимости, возможно, время химической реакции в данном случае было намного меньше, чем в реальном процессе.

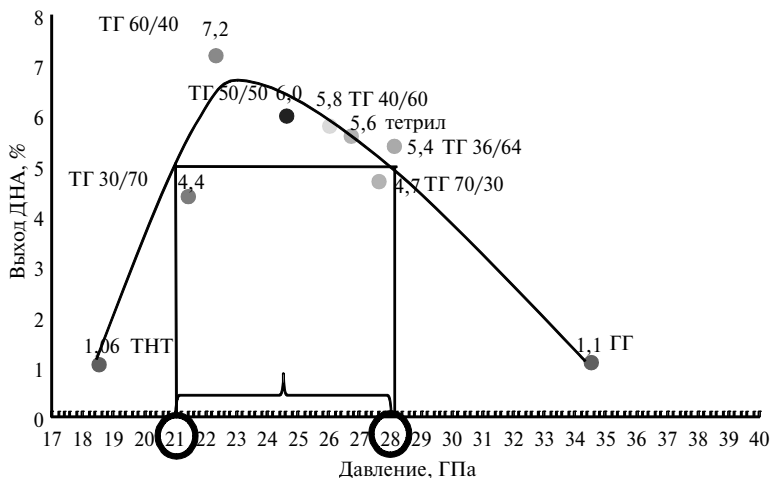


Рис. 2. Зависимость выхода ДНА от давления в плоскости Чепмена-Жуге при подрыве ВВ.

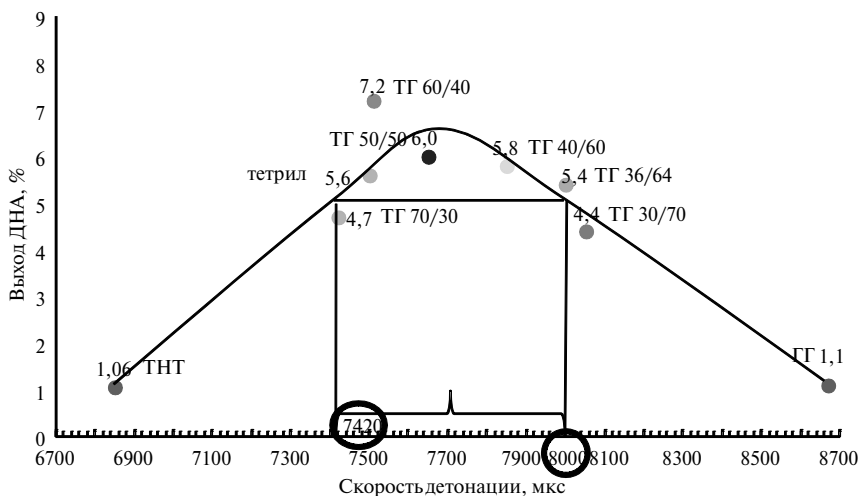


Рис. 3. Зависимость выхода ДНА от скорости детонации ВВ.

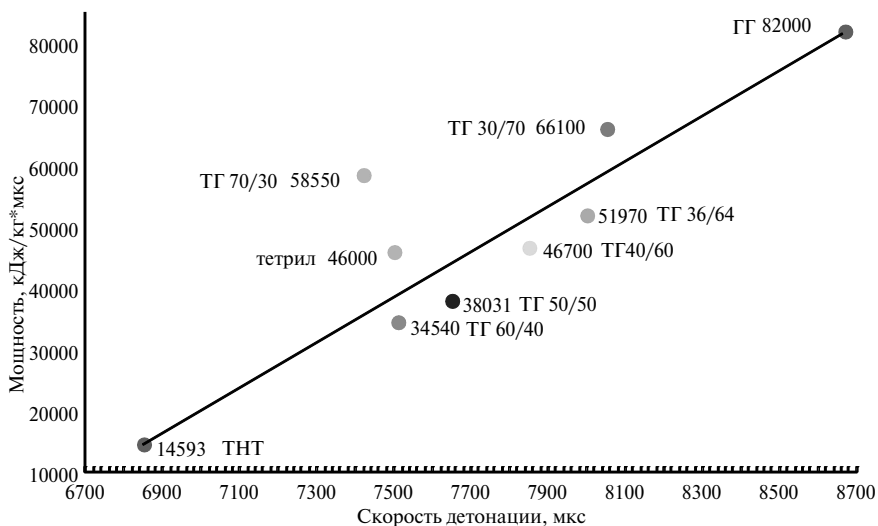


Рис. 4. Зависимость мощности ВВ от скорости детонации ВВ.

Из данных таблицы и рис. 4 видно, что повышение теплоты и мощности взрыва приводит к росту скорости детонации.

ВЫВОДЫ

Для получения ДНА с устойчивым выходом, равным 5 % и более, необходимо, чтобы ВВ или смесевая композиция отвечала следующим условиям:

- мощность ВВ должна составлять 30–60 кДж/(кг·мкс);
- давление ПД в плоскость Чепмена-Жуге – в пределах 21–28 ГПа;
- скорость детонации – 7250–8000 мкс.

Зависимость скорости детонации от мощности ВВ близка к прямо пропорциональной.

Для визначення залежності виходу детонаційних наноалмазів від потужності використаних вибухових речовин було введено нове поняття – питома потужність вибухових речовин (з якою пов'язана швидкість детонації і тиск газів в площині Чепмена-Жуге), що дорівнює відношенню теплоти вибуху до одиниці маси і часу. Знайдено залежність виходу детонаційних наноалмазів від швидкості детонації і тиску в площині Чепмена-Жуге. Оптимальний (> 5 % (за масою)) вихід детонаційних наноалмазів відбувається при значенні питомої потужності вибухових речовин 30000–60000 кДж/(кг·мкс), швидкості детонації 7250–8000 м/с, тиску в площині Чепмена-Жуге 21–28 ГПа.

Ключові слова: детонаційні наноалмази, потужність вибухових речовин, тиск в площині Чепмена-Жуге, вихід наноалмазів, швидкість детонації, теплота вибуху, склад зарядів вибухових речовин.

To determine the dependence of the yield of detonation nanodiamonds (DNDs) on the power of explosives used, a new concept is introduced – the specific capacity (SC) of the explosive, equal to the ratio of the heat of explosion to the unit mass and time. For practical use, 1 kg (or 1 mole) of explosives is advisable for use as a unit of mass, and as a unit of time - 1 microsecond, commensurate with the time of the processes in the chemical reaction zone (CRZ). The chemical reaction time is understood as the time required for the matter to move from the front of the detonation wave to the Chapman-Jouguet plane, where chemical reactions are completed. The detonation velocity of explosives and the pressure of gases in the Chapman-Jouguet plane are related to the specific capacity of explosives. The dependence of DNDs yield on the velocity of detonation and pressure in the Chapman-Jouguet plane is found. Optimum yield of DNDs (> 5 % by mass) is accounted for the specific capacity of explosives from 30000 to 60000 kJ/(kg·μsec), at a detonation velocity from 7250 to 8000 m/sec and pressure in the Chapman-Jouguet plane from 21 to 28 GPa.

Keywords: detonation nanodiamonds, explosive power, pressure in Chapman-Jouguet plane, yield of nanodiamonds, detonation velocity, heat of explosion, composition of explosives.

1. Долматов В.Ю. Оценка применимости зарядов взрывчатых веществ для синтеза детонационных наноалмазов. *Сверхтв. материалы*. 2016. № 5. С. 109–113.
2. Долматов В.Ю. Модифицированный способ получения детонационных наноалмазов и их реальный элементный состав. *Журнал прикладной химии*. 2008. Т. 81, вып. 10. С. 1620–1627.
3. Dolmatov V.Yu. Diamond-carbon material and a method for the production thereof. *Pat. US. 7 862 792 B2*. Publ. 04.01.2011.
4. Даниленко В.В. Взрыв: физика, техника, технология. Москва: Энергоатомиздат, 2010. 784 с.
5. Орлова Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Ленинград: Химия, 1973. 688 с.
6. Власов Д.А., Казак А.А. Взаимосвязь между теплотой взрыва ВВ и его разрушительным действием. *Изв. Санкт-Петербургского технологического ун-та (Технического ин-та)*. 2009. № 5. С. 91–94.

7. Дремин А.Н., Шведов К.К. Определение давления Чепмена-Жуге и времени реакции в детонационной волне мощных ВВ. *Журнал прикладной механики и технической физики*. 1964. № 2. С. 154–159.
8. Лобойко Б.Г., Любятинский С.Н. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ. *Физика горения и взрыва*. 2000. Т. 36, № 6. С. 45–64.
9. К.С. Барабошкин, Н.В. Козырев, В.Ф. Комаров, Исследование синтеза наноалмазов адсорбционным методом. *Ползуновский вестник*. 2006. № 2. С. 13–18.
10. Mader C.L. Numerical Modeling of Detonations. Berkley, Los Angeles, London: University of California press., 1979.
11. Ставер А.М., Лямкин А.И. Получение ультрадисперсных алмазов из взрывных веществ. *Ультрадисперсные материалы. Получение и свойства. Межвузовск. сб.* Красноярск: Ротапринт КрПИ, 1990. С. 3–22
12. Лямкин А.И. Образование наноалмазов при динамическом воздействии на углеродсодержащие соединения: Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. г. Красноярск, 2007.
13. Даниленко В.В. Особенности синтеза детонационных наноалмазов. *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 5. С. 104–116.
14. Анисичкин В.Ф., Мальков И.Ю., Сагдиев Ф.А. Синтез алмаза при детонации ароматических нитросоединений. *В Всесоюз. совещание по детонации, Красноярск, 5–12 авг. Сб. докл.* Красноярск, 1991. Т. 1. С. 27–30.
15. Бабушкин А.Ю., Лямкин А.И., Ставер А.М. Особенности получения ультрадисперсного материала на основе углерода из взрывчатых веществ. *В Всесоюз. совещание по детонации, Красноярск, 5–12 авг. 1991 г.: Сб. докл.* Красноярск, 1991. Т. 1. С. 81–83.
16. Першин С.В., Цаплин Д.Н., Антипенко А.Г. О возможности образования алмаза при детонации тетрила. *В Всесоюз. совещание по детонации, Красноярск, 5–12 авг. 1991 г.: Сб. докл.* Красноярск, 1991. Т. 2. С. 233–236.

Поступила в редакцию 21.06.18

После доработки 25.02.19

Принята к публикации 27.02.19