

## УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ НЕРЕАГИРУЮЩЕГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА FOX-7 И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ЕГО ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА

Б. А. Надыкто, А. И. Ломайкин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 607188, г. Саров Нижегородской обл.

Для нового низкочувствительного ВВ 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена (FOX-7) разработаны уравнение состояния нереагирующего ВВ и уравнение состояния его ПВ. Холодное давление берется в форме  $P(\sigma) = 3B_0(\sigma^{5/3} - \sigma^{4/3})$ , где  $\sigma = \rho/\rho_0$  – степень сжатия,  $\rho_0$  и  $B_0$  – равновесная плотность вещества и модуль объемного сжатия при  $P = 0$ ,  $T = 0$  К. Параметры  $\rho_0$  и  $B_0$  подбираются на основании экспериментальных данных.

Параметры за фронтом детонационной волны рассчитываются из законов сохранения на ударном скачке, исходя из уравнения состояния ПВ с учетом энергии превращения. Скорость детонации определяется в расчетах как минимальное значение скорости ударной волны  $D(\rho)$  в ПВ. Уравнение состояния ВВ FOX-7 тестировано по экспериментаальным данным на нормальной изотерме, уравнение состояния ПВ FOX-7 – по экспериментальной зависимости скорости детонации от начальной плотности ВВ.

Отмечается, что уравнения состояния ВВ и ПВ FOX-7 близки к уравнениям состояния октогена и гексогена. Это может быть следствием одинакового поведения этих трех ВВ при сжатии ввиду их одинакового элементного состава  $\text{CH}_2\text{N}_2\text{O}_2$ .

*Ключевые слова:* уравнение состояния, взрывчатые вещества, продукты взрыва, FOX-7, детонация, октоген.

### Введение

Разработанное в конце 1990-х годов [1, 2] новое взрывчатое вещество (ВВ) 1,1-диамино-2,2-динитроэтилен (FOX-7) привлекает к себе внимание высокими энергетическими характеристиками в сочетании с низкой чувствительностью к механическому воздействию и ударной волне, а также малой вероятностью несанкционированного перехода горения в детонацию [3].

Для многих задач расчета кинетики детонационного превращения, связанных с исследованием инициирования ВВ, безопасности обращения с ними, аварийных ситуаций и др., требуется знание уравнения состояния еще нереагирующего («холодного») ВВ и уравнения состояния продуктов взрыва ВВ. Получение экспериментальных данных для таких веществ представляет трудную задачу, их количество весьма ограничено и точность не всегда позволяет построить непрерывные

зависимости. В этой ситуации расчетно-теоретические и полуэмпирические подходы, использующие ограниченное число доступных экспериментальных точек, могут дать более полное описание поведения ВВ. Опубликованные данные по сжатию ВВ FOX-7 при комнатной температуре до 4 ГПа [4] и полученные недавно [5] экспериментальные данные по зависимости скорости детонации от начальной плотности ВВ FOX-7 дают возможность тестировать разрабатываемые уравнения состояния.

Для расчета уравнения состояния ВВ и продуктов взрыва ВВ применяется подход [6–8], успешно используемый для расчета уравнения состояния различных инертных материалов в широкой области давлений. Как и в случае многих инертных материалов, по мере сжатия ВВ происходит резкое изменение сжимаемости материала, которое описывается изменением параметров уравнения состояния. Расчет характеристик ста-

ционарной детонации ВВ возможен при знании уравнения состояния ПВ и тепловой энергии, выделяющейся в точке Жуге при детонационном превращении. Имеется ряд уравнений состояния продуктов взрыва ВВ, получаемых из различных предположений о состоянии детонировавшего материала.

Представлен еще один вариант уравнения состояния продуктов взрыва ВВ. Параметры за фронтом детонационной волны как обычно рассчитываются из законов сохранения на ударном скачке, исходя из уравнения состояния ПВ с учетом энергии превращения. Как и для инертных материалов, энергия и давление представляются в виде суммы упругой и тепловой составляющей. В продуктах взрыва достаточно большие молекулы ВВ разбиваются на мелкие фрагменты типа  $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $NO_2$ . Поэтому равновесная плотность ПВ при  $T = 0$  принимается в расчетах равной около  $1 \text{ г/см}^3$ . Реально параметры уравнения состояния ПВ подбираются из условия описания возможно большего числа экспериментальных данных, включая параметры точки Жуге при различных плотностях ВВ, изэнтропу разгрузки из точки Жуге, параметры пережатой детонации и повторного сжатия ПВ (критических торможения ПВ).

Знание уравнения состояния и калорийности ВВ позволяет рассчитать зависимость  $D(\rho)$  за фронтом ударной волны. Из закона сохранения массы на ударном скачке  $\rho(D - u) = \rho_0 D$  путем дифференцирования по плотности получаем выражение  $(D - u) + \rho(dD/d\rho - du/d\rho) = \rho_0 dD/d\rho$ , из которого следует, что условие стационарной детонации Чепмена–Жуге  $D = c + u$  означает равенство нулю производной  $dD/d\rho$ . Из инвариантов Римана следует, что  $\rho du/d\rho$  равно скорости звука  $c$  за фронтом волны. Поэтому скорость детонации определяется в расчетах как минимальное значение скорости ударной волны  $D(\rho)$  в продуктах детонации.

Октоген, гексоген и FOX-7 имеют одинаковый элементный состав  $CH_2N_2O_2$ , отличаясь структурой молекул (см. рис. 1) и значениями плотности при нормальных условиях. При высоких давлениях сжимаемость этих ВВ оказывается близкой и хорошее описание большого объема экспериментальных данных по октогену и гексогену дает дополнительную уверенность в реальности разработанных уравнений состояния для FOX-7. Плотность монокристалла FOX-7 равна  $1,885 \text{ г/см}^3$ , максимальная плотность изготавливаемых образцов ВВ FOX-7 равна  $1,868 \text{ г/см}^3$  [3].

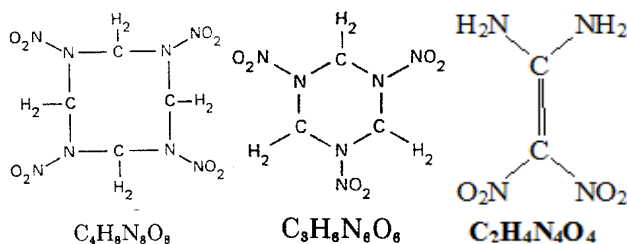


Рис. 1. Структура молекул октогена (слева), гексогена (в центре) и FOX-7 (справа)

### Краткое описание модели

Полуэмпирическое уравнение состояния [6, 7] имеет вид:

$$P(\rho, T) = P_x(\rho) + P_T(\rho, T), \quad E(\rho, T) = P_x(\rho) + E_T(T), \quad (1)$$

где  $P_x$ ,  $E_x$  – потенциальные составляющие давления и энергии,  $P_T$ ,  $E_T$  – тепловые составляющие давления и удельной энергии ядер,  $\rho$  – плотность,  $T$  – температура.

Тепловые составляющие для ядер в уравнении состояния имеют вид:

$$E_T(T) = C_{V0} D \left( \frac{T_D}{T} \right) T, \quad P_T(\rho, T) = \rho \Gamma(\rho) E_T(\rho, T), \quad (2)$$

где  $D(x) = \frac{3}{x^3} \int_0^x \frac{t^3 dt}{e^t - 1}$  – функция Дебая,  $\Gamma(\rho)$  –

функция Грюнайзена,  $C_{V0}$  – значение изохорической теплоемкости, температура Дебая является

функцией плотности:  $T_D(\rho) = T_{D0} \int_{\rho_n}^{\rho} \frac{\Gamma(\rho)}{\rho} d\rho$ .

Следует отметить, что уравнение состояния (в общем случае) является многофазным – потенциальные составляющие давления и энергии задаются в виде кусочно-непрерывных функций, каждый «кусочек» которых относится только к своей «фазе». Это позволяет более гибко описывать поведение термодинамических функций в областях фазовых переходов.

Упругие составляющие энергии и давления определяются выражениями:

$$E(\sigma) = \frac{9B_{0n}}{\rho_{0n}} \left( \frac{\sigma^{2/3}}{2} - \sigma^{1/3} \right),$$

$$P(\sigma) = 3B_{0n} \left( \sigma^{5/3} - \sigma^{4/3} \right),$$

где  $\sigma = \rho/\rho_{0n}$  – степень сжатия,  $\rho_{0n}$  и  $B_0$  – равновесная плотность «фазы» вещества и модуль объемного

сжатия при  $P = 0, T = 0$ . В форме Ми–Грюнайзена тепловая составляющая давления  $P_T = \Gamma \rho E_T$ . Коэффициент Грюнайзена  $\Gamma(\sigma)$  определяется на основании упругих составляющих. В приближении

Дугдейла–Макдональда [8]:  $\Gamma(\sigma) = \frac{2\sigma^{1/3} - 1}{3\sigma^{1/3} - 2}$ . При

$\sigma > 2,4$  применяется интерполяционная формула:

$$\Gamma = \frac{3\sigma^{1/3}}{3\sigma^{1/3} - 2} - 1,16; \text{ если же } \sigma < 0,512 \text{ значение}$$

$\Gamma = 3/2$ . Граница между фазами определяется выражением:

$$\rho_k^* = \left( \frac{3B_{0k}}{\rho_{0k}^{4/3}} - \frac{3B_{0k+1}}{\rho_{0k+1}^{4/3}} \right)^3 \left( \frac{3B_{0k}}{\rho_{0k}^{5/3}} - \frac{3B_{0k+1}}{\rho_{0k+1}^{5/3}} \right)^{-3}$$

С использованием описанного выше уравнения состояния можно рассчитать значения термодинамических функций при задании одной из трех пар входных параметров: плотность–температура, плотность–энергия, плотность–давление. Например, с использованием описанного выше уравнения состояния можно рассчитать сжатие веществ ударными волнами. Пусть плотность, давление и внутренняя энергия вещества перед фронтом ударной волны  $\rho_{00}, P_0, E_0$ , за фронтом ударной волны  $\rho, P, E$ . Уравнение ударной адиабаты имеет вид:

$$E - E_0 = \frac{(P_H + P_0)}{2} \left( \frac{1}{\rho_{00}} - \frac{1}{\rho} \right).$$

Тепловую энергию в соответствии с (1) можно записать в виде:

$$E_T = \frac{(P_H - P_X)}{\Gamma(\sigma)\rho}, \quad \sigma = \rho/\rho_{00}.$$

В этом случае связь между плотностью и давлением за фронтом ударной волны определяется выражением:

$$P_H = \frac{P_X - \Gamma \rho (E_X - E_X^0 - E_T^0 - P_0(1/\rho_{00} - 1/\rho)/2)}{1 - \Gamma \rho (1/\rho_{00} - 1/\rho)/2}.$$

По найденному значению  $P_H$  на основании законов сохранения массы и импульса на фронте ударной волны определяется массовая скорость

$$u = \left( \frac{P_H(\sigma - 1)}{\rho_{00}\sigma} \right)^{1/2}$$

и скорость ударной волны  $D = \sigma u / (\sigma - 1)$  и, таким образом, получается расчетная зависимость  $D(u)$ .

Для построения уравнения состояния конкретного вещества нужно знать поведение теплоемкости в зависимости от температуры (минимальная информация – значение теплоемкости при нормальных условиях) и зависимость давления от

плотности при  $P = 0, T = 0$  К, которая определяется из экспериментальной изотермы при комнатной температуре или экспериментальных данных по ударно-волновому сжатию вещества.

### Уравнение состояния нереагирующего ВВ FOX-7

Для ВВ FOX-7 в работе [4] имеются экспериментальные значения давления на изотерме 300 К, которые указывают на резкое изменение наклона зависимости  $P(\rho)$  при давлении  $\sim 2$  ГПа (см. рис. 2). Это можно объяснить изменением электронной структуры ВВ при сжатии. Поэтому параметры уравнения состояния ВВ FOX-7 были подобраны различными: ниже и выше 2 ГПа. Эти значения близки к значениям параметров ВВ октогена (см. табл. 1).

Таблица 1

Параметры УРС ВВ FOX-7, ВВ октогена

Обозначение	Название	Значение		Размерность
		FOX-7	октоген	
$n$	Количество фаз	2	2	1
$C_{V0}$	Теплоемкость	$2,36 \cdot 10^{-3}$	$2,36 \cdot 10^{-3}$	кДж/(г·К)
$T_D$	Температура Дебая	650	655	К
$\rho_{01}$	Плотность фазы 1	1.97	1.96	г/см <sup>3</sup>
$V_{01}$	Модуль объемного сжатия фазы 1	19.6	19.6	ГПа
$\rho_{02}$	Плотность фазы 2	2.044	2.024	г/см <sup>3</sup>
$V_{02}$	Модуль объемного сжатия фазы 2	44.2	44.2	ГПа

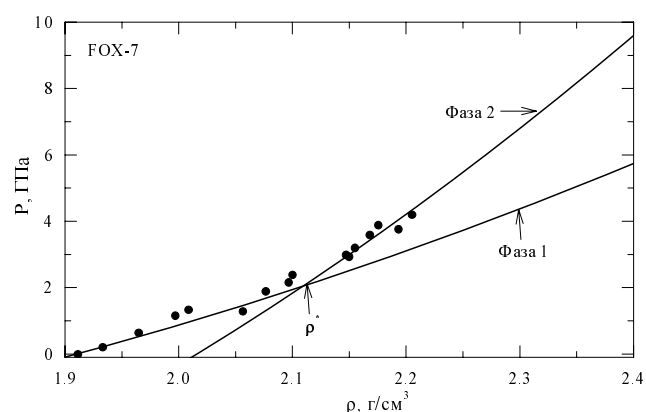


Рис. 2. Зависимость давления от плотности на изотерме  $T = 300$  К для ВВ FOX-7. Данные статических экспериментов по FOX-7 [4] показаны маркерами. Линиями показан расчет для двух электронных фаз ВВ FOX-7

Сравнение результатов расчета по уравнению состояния с данными [4] для ВВ FOX-7 приведено на рис. 3, там же приведены экспериментальные

данные [9, 10] и расчет для комнатной изотермы октогена. Видно, что нормальные изотермы ВВ FOX-7 и октогена близки как при низких, так и при более высоких давлениях. Для октогена в [10] приведены также экспериментальные данные на изотермах 100 и 140 °С, которые хорошо описываются расчетом.

На рис. 4 приведены расчетные зависимости скорости фронта волны от массовой скорости и давления от плотности при ударно-волновом сжатии сплошных образцов ВВ FOX-7. Для сравнения приведены также расчетные и экспериментальные данные [11] для ВВ октогена с плотностью 1,90 г/см<sup>3</sup>.

На рис. 4 представлены полученные на основании разработанного уравнения состояния ВВ FOX-7 зависимости  $D(u)$  и  $P(\rho)$  для образцов ВВ с начальной плотностью 1,885, 1,760, 1,503 г/см<sup>3</sup>. Показаны также экспериментальные точки из работы [11] для октогена с начальной плотностью 1,9 г/см<sup>3</sup>.

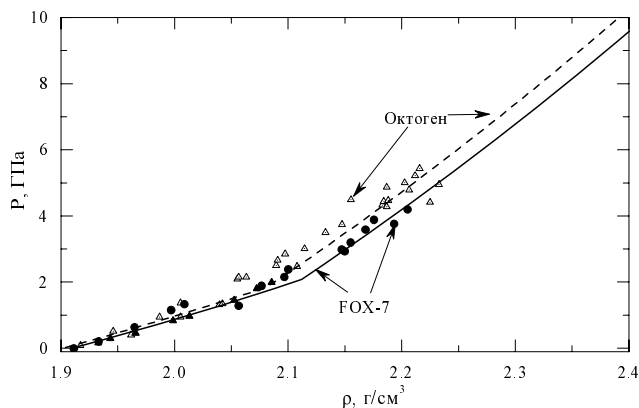
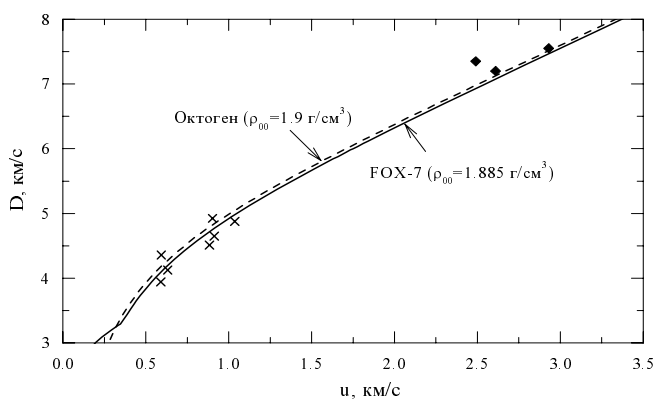
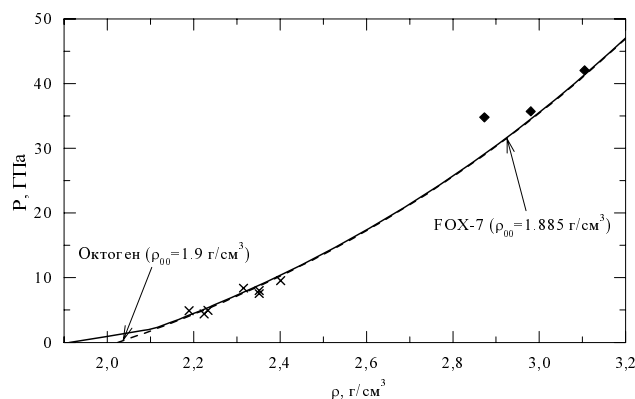


Рис. 3. Зависимость давления от плотности на изотерме  $T = 300$  К для ВВ FOX-7 и ВВ октогена. Данные статических экспериментов показаны маркерами: круглые – FOX-7 [4], треугольные – октоген [9, 10]. Линиями показан расчет по УРС ВВ FOX-7 (сплошная) и УРС ВВ октогена (пунктирная)

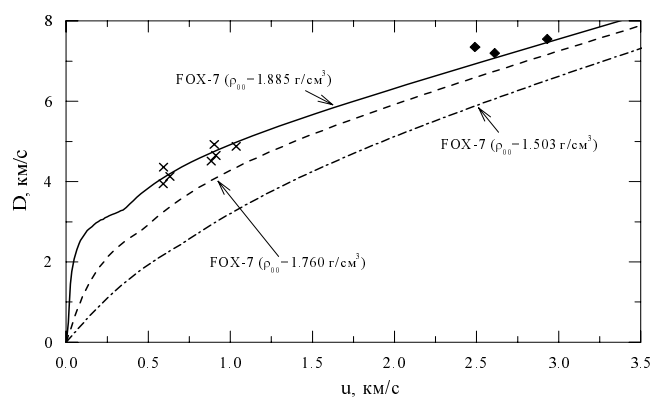


а

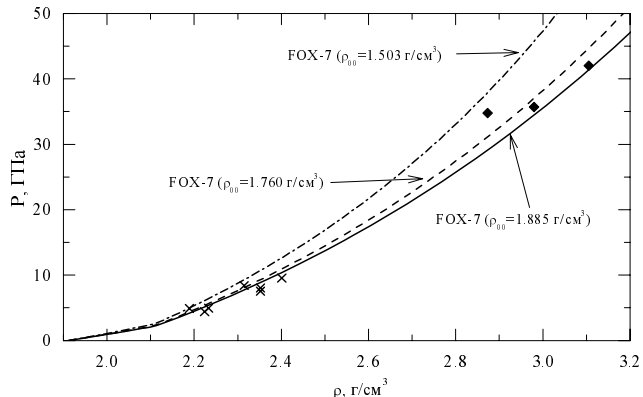


б

Рис. 4. Зависимость  $D(u)$  и  $P(\rho)$  при ударно-волновом сжатии образцов ВВ FOX-7 ( $\rho_{00} = 1,885$  г/см<sup>3</sup>) и ВВ октогена ( $\rho_{00} = 1,9$  г/см<sup>3</sup>). Экспериментальные данные для октогена из работы [11]: ромбы – для монокристалла, кресты – для прессованных образцов. Линиями показан расчет по УРС ВВ FOX-7 (сплошная) и УРС ВВ октогена (пунктирная)



а



б

Рис. 5. Зависимость  $D(u)$  и  $P(\rho)$  при ударно-волновом сжатии образцов ВВ FOX-7 с начальной плотностью 1,885, 1,760, 1,503 г/см<sup>3</sup>. Экспериментальные данные для октогена из работы [11]: ромбы – для монокристалла, кресты – для прессованных образцов

## Уравнение состояния продуктов взрыва ВВ FOX-7

В работе [12] показано, что октоген и гексоген, которые обладают одинаковым элементарным составом  $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_8$ , имеют одинаковое уравнение продуктов взрыва, немного отличаясь калорийностью. Тот же состав элементов у ВВ FOX-7, поэтому таким же образом будем строить уравнение состояния продуктов взрыва ВВ FOX-7. Ниже приводятся результаты расчетов значений термодинамических и кинематических функций для ВВ FOX-7 и их сравнение с данными для октогена и гексогена.

В работе [13] собраны экспериментальные данные по зависимости скорости детонации октогена и гексогена от начальной плотности ВВ и приводится их сравнение с результатами расчетов, в которых используется уравнение состояния Ф. Ри (F. Ree). Экспериментальные данные для октогена взяты из [14], для гексогена – из работ ряда российских авторов [15–20]. Расчет параметров детонации октогена проводился при уравнении состояния продуктов взрыва октогена, заданном в виде двух участков с параметрами:  $\rho_0 = 1,05 \text{ г/см}^3$  и  $V_0 = 9,670 \text{ ГПа}$  (участок I),  $\rho_0 = 1,255 \text{ г/см}^3$ ;  $V_0 = 18,23 \text{ ГПа}$  (участок II) и значением калорийности ВВ  $Q = 3,4 \text{ кДж/г}$ . Сравнение с экспериментальными данными [13–20] для октогена и гексогена с результатами наших расчетов показано на рис. 6.

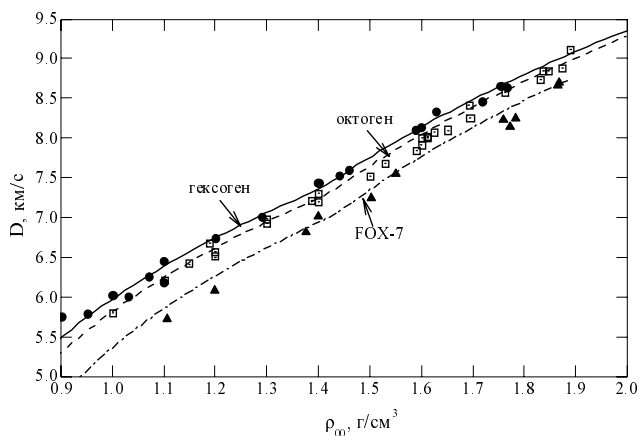


Рис. 6. Сравнение с экспериментальными данными наших расчетных зависимостей скорости детонации от начальной плотности ВВ для октогена, гексогена и ВВ FOX-7. Эксперимент: кружки – для октогена из [13, 14], квадраты – для гексогена из [15–20], треугольники – для ВВ FOX-7 из [5]. Расчетная кривая для октогена – средняя, для гексогена – верхняя, для ВВ FOX-7 – нижняя

Расчет хорошо описывает экспериментальные данные. При одинаковой с октогеном начальной

плотности для гексогена в эксперименте получается немного большее значение скорости детонации. При высокой начальной плотности разница в скорости детонации составляет 0,1 км/с, при плотности 1 г/см<sup>3</sup> разница увеличивается до 0,2 км/с. Для гексогена расчет проведен с тем же уравнением состояния ПВ, как для октогена, при небольшом увеличении калорийности ВВ до 3,7 кДж/г. Рассчитанные значения скорости нормальной детонации в октогене и давление в точке Жуге при начальной плотности ВВ  $\rho_{00} = 1,891 \text{ г/см}^3$  составляют:  $D = 8,98 \text{ км/с}$  и  $P = 39,96 \text{ ГПа}$ . Экспериментальные значения согласно [21] соответственно равны  $D = 9,11 \text{ км/с}$  и  $P = 39,5 \text{ ГПа}$ . Отличие расчета от эксперимента около 1 %. Для гексогена при начальной плотности ВВ  $\rho_{00} = 1,767 \text{ г/см}^3$   $D = 8,70 \text{ км/с}$  и  $P = 34,14 \text{ ГПа}$ . Экспериментальные значения согласно [21] соответственно равны  $D = 8,64 \text{ км/с}$  и  $P = 33,79 \text{ ГПа}$ .

В работе [13] со ссылкой на работы [15–21] приведены измеренные в гексогене значения давления в точке Жуге при различной начальной плотности ВВ. На рис. 7 приведено сравнение этих данных с результатами наших расчетов. Сравнение показывает близость расчетной кривой для гексогена к измеренным значениям. Расчетное давление в октогене при одинаковой начальной плотности ВВ на 2–3 % ниже, чем в гексогене.

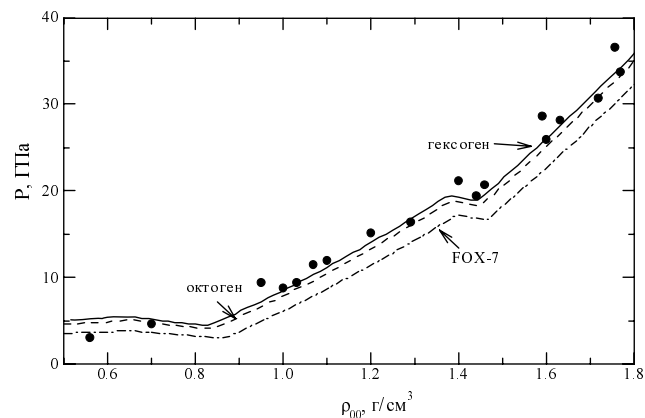


Рис. 7. Зависимость давления в точке Жуге от начальной плотности ВВ для октогена, гексогена и ВВ FOX-7. Маркерами показан эксперимент для гексогена из [13, 15–20]. Расчетная кривая для октогена – средняя, для гексогена – верхняя, для ВВ FOX-7 – нижняя

В работе [22] показано, что расчетное описание экспериментальной зависимости скорости детонации от начальной плотности ВВ, как правило, приводит к хорошему описанию параметров точки Жуге, адиабат разгрузки, повторного нагружения и параметров пересжатой детонации.

Экспериментальные данные [5] для зависимости скорости детонации от начальной плотности ВВ FOX-7 описываются тем же уравнением состояния продуктов взрыва, что и для октогена и гексогена, но с меньшей калорийностью  $Q = 2,6$  кДж/г. Результаты расчетов по уравнению состояния ПВ ВВ FOX-7 показаны на рис. 6–9. На рис. 6 видно, что УРС ПВ ВВ FOX-7 хорошо передает экспериментальные результаты [5] для ПВ ВВ FOX-7.

Рис. 7 показывает закономерное уменьшение давления детонации в FOX-7 при одинаковой начальной плотности по сравнению с гексогеном и октогеном ввиду более низкой калорийности FOX-7.

На рис. 8 показана расчетная зависимость давления от массовой скорости при ударно-волновом сжатии ПВ октогена, гексогена и FOX-7 и на изэнтропах, проходящих через точки Жуге.

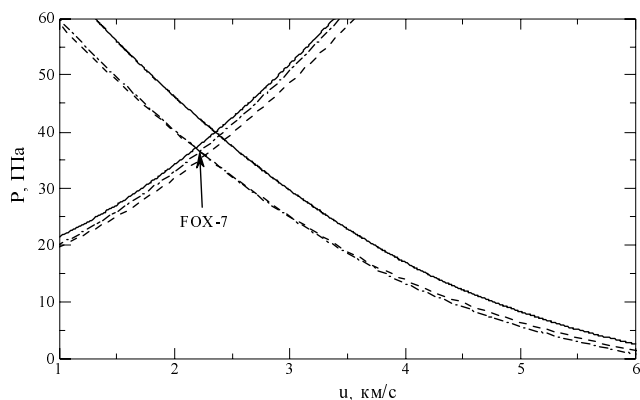


Рис. 8. Зависимость давления от массовой скорости при ударно-волновом сжатии ПВ октогена, гексогена и FOX-7 и на изэнтропах, проходящих через точки Жуге. Расчетная кривая для октогена показана сплошной линией ( $\rho_{00} = 1,891$  г/см<sup>3</sup>,  $E_0 = 3,4$  кДж/г,  $P_0 = 0$ ), для гексогена пунктирной ( $\rho_{00} = 1,8$  г/см<sup>3</sup>,  $E_0 = 3,7$  кДж/г,  $P_0 = 0$ ), для ПВ FOX-7 – штрих-пунктирной ( $\rho_{00} = 1,885$  г/см<sup>3</sup>,  $E_0 = 2,6$  кДж/г,  $P_0 = 0$ )

Расчеты показывают, что изэнтропы разгрузки и повторного нагружения  $P(u)$  для гексогена и FOX-7 практически совпадают.

На рис. 9 показана расчетная зависимость давления от массовой скорости при ударно-волновом сжатии ПВ ВВ FOX-7 и на изэнтропах, проходящих через точки Жуге для трех образцов с начальной плотностью 1,885, 1,760, 1,503 г/см<sup>3</sup>. Значения скорости фронта волны в точке Жуге для FOX-7 с начальной плотностью 1,760, 1,503 г/см<sup>3</sup> в пределах ошибок измерений совпадают с экспериментальными данными [5]. В табл. 2 приведены расчетные значения термодинамических и кинематических функций в точке Жуге для трех образцов. Значение энергии в точке Жуге изменяется в основном за счет изменения потенциальной энергии уравнения состояния при различных начальных плотностях ВВ.

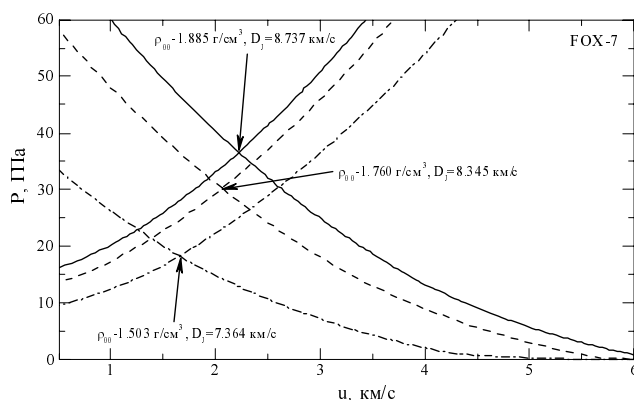


Рис. 9. Зависимость давления от массовой скорости при ударно-волновом сжатии ПВ ВВ FOX-7 и на изэнтропах, проходящей через точки Жуге для трех образцов с начальной плотностью 1,885, 1,760, 1,503 г/см<sup>3</sup>

Таблица 2

Значения функций в точке Жуге для ПВ ВВ FOX-7

Обозначение	Название	Значение			Размерность
		$\rho_{00}=1,885$	$\rho_{00}=1,760$	$\rho_{00}=1,503$	
$\delta_J$	Сжатие	1,341	1,328	1,290	1
$\rho_J$	Плотность	2,527	2,337	1,939	г/см <sup>3</sup>
$u_J$	Массовая скорость	2,221	2,061	1,655	км/с
$D_J$	Скорость нормальной детонации	8,737	8,345	7,364	км/с
$P_J$	Давление	36,56	30,27	18,32	ГПа
$Q$	Калорийность ВВ	2,6	2,6	2,6	кДж/г
$S_J$	Изэнтропическая скорость	6,516	6,283	5,709	км/с
$E_J$	Энергия	5,066	4,724	3,969	кДж/г

## Заключение

Создано уравнение состояния холодного (не-реагировавшего) ВВ FOX-7, которое тестировалось на экспериментальные данные для нормальной изотермы. УРС ВВ FOX-7 близок к уравнению состояния октогена, для проверки которого имеется большее число экспериментальных данных.

Экспериментальные данные указывают на скачкообразное изменение сжимаемости холодных ВВ, которое можно описать в расчетах изменением параметров уравнения состояния при сохранении его аналитической формы. Такое поведение сжимаемости можно объяснить изменением электронной структуры ВВ при сжатии.

Создано уравнение состояния продуктов детонации ВВ FOX-7 в приближении Ми–Грюнайзена, которое хорошо описывает зависимость скорости нормальной детонации от начальной плотности ВВ. Созданный УРС отличается от уравнения состояния продуктов детонации октогена и гексогена только меньшей калорийностью. Совокупное описание трех ВВ опирается на большее число экспериментов.

Получены параметры точки Жуге, адиабат разгрузки, пересжатой детонации и повторного сжатия ПВ (кривых торможения ПВ) для FOX-7 с разной начальной плотностью.

## Список литературы

1. Latypov N. V., Bergman J., Langlet A., Wellmar U., and Bemm U. Syntheses and Reactions of 1,1-Diamino-2,2-dinitroethylene // *Tetrahedron*. 1998. Vol. 54, N 38. P. 11525–11536.
2. Latypov N. V., Langlet A., Wellmar U. Patent WO99/03818, 1999. New chemical compound suitable for use as an explosive, intermediate and method for preparing the compound.
3. Trzcinski W. Belaada A. // *Central Europ. J. Energetic Mater.* 2016. Vol. 13, № 2. P. 527.
4. Peiris S. M., Wong C. P., Zerilli F. J. Equation of state and structural changes in of diaminodinitroethylene // *J. Chem. Phys.* 2004. Vol. 120. P. 8060.
5. Котомин А. А., Душенюк С. А., Козлов А. С., Илюшин М. А. Детонационная способность и скорость детонации 1,1-диамино-2,2-динитроэтилена // *Химическая физика*. 2017. Вып. 36(6). С 57–60.

6. Надыкто Б. А. // *УФН*. 1993. Т. 163, № 9. С. 37.
7. Надыкто Б. А. // *ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика*. 1996. Вып. 3. С. 58.
8. Dugdale J. S., MacDonald D. K. C. The thermal expansion of solids // *Phys. Rev.* 1953. Vol. 89. P. 832.
9. Адушкин В. В., Ларионов Л. В., Лившиц Л. Д., Сыренков Г. И., Шамцев К. Н. // *Доклады АН СССР*. 1991. Т. 317, № 1. С. 103–104.
10. Gump J. C., Peiris S. M. // *J. Appl. Phys.* 2005. Vol. 97. P. 053513.
11. LASL Shock Hugoniot Data. Edit. S.P. Marsh. University of California Press. Berkeley. Los Angeles. London. 1980. P. 621–622.
12. Nadykto B.A. Equation of state of HE detonation product // in *New Model and Hydrocodes for Shock Wave Processes in Condensed Matter*. Edited by L. Soulard, M. Zocher Paris. 2010. P. 49–50.
13. Steinberg D. J. 8-th International Detonation Symposium. July 15-19. 1985. P. 513.
14. Kurrle J. HMX Detonation vs Density. Report OSAO No 4148. SANL No 901-003, 1971.
15. Kuznetsov N. M., Shvedov K. K. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1966. Vol. 2, N 4. P. 52.
16. Dremin A. N., Pokhil P. F. *Acad. of Sciences, USSR, Proceedings, Phys. Chem. Section*, 128, 839, 1959.
17. Стесик Л. Н., Акимова Л. Н. // *Журн. физической химии*. 1959. Вып. 33(8). С. 148.
18. Стесик Л. Н., Шведова Н. С. // *Журн. прикл. механики и техн. физики*. 1964, № 4. С. 124–126.
19. Krivchenko A. L., Shvedov K. K., Dremin A. N., Kozlov V. S. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1972. Vol. 8, N 4. P. 377.
20. Aleksandrov E. N., Veretennikov V. A., Shvedov K. K., Dremin A. N. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 1967. Vol. 3, N 4. P. 285,
21. Mader C. L. et al. *LASL EXPLOSIVE PROPERTY DATA*. University California Press, Berkeley and Los Angeles, California. 1980.
22. Nadykto B. A. Equation of state for a mixture of unreacted he and he detonation products // *AIP CONFERENCE PROCEEDINGS*. 1426. Shock Compression of Condensed Matter, edited by M. L. Elert, W. T. Butler, J. P. Borg, J. L. Jordan, T. J. Vogler, Melville, New York, 2012. P. 820

Статья поступила в редакцию 08.12.2017