

АДИАБАТИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ И УДАРНО-ВОЛНОВОЕ СЖАТИЕ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ПЛАСТИФИЦИРОВАННОГО ОКТОГЕНА

*Е.Н. Богданов, В.И. Буренин, С.Г. Губачева, Д.Н. Замотаев, А.М. Ивин,
Г.А. Козлов, Д.В. Крючков, А.Н. Малышев, Е.С. Митин, А.А. Окинчичи,
А.В. Родионов, А.А. Седов, В.И. Скоков, А.В. Цветков, М.Е. Шаврин*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение. При математическом моделировании детонационных процессов и определении характеристик технических устройств, содержащих твердые взрывчатые вещества (ВВ), на практике часто используются аналитические уравнения состояния (УРС) продуктов взрыва (ПВ) с линейной зависимостью давления от внутренней энергии, основными элементами которых являются опорная изэнтропа, проходящая через точку Чепмена-Жуге, и параметр Грюнайзена вдоль этой изэнтропы. Верификация УРС ПВ проводится с привлечением различной экспериментальной информации. Основная роль отводится изучению адиабатического (изэнтропического) расширения продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге [1]-[3]. Определенную ценность для моделирования представляют данные по перескатым детонационным волнам в области давлений, реализуемых при контактном разгоне металлических лайнеров и оболочек [4]-[8].

В настоящей работе представлены результаты проведенных в интересах верификации уравнений состояния продуктов пластифицированного октогена экспериментальных исследований адиабатического расширения и ударно-волновой сжимаемости продуктов взрыва в диапазоне давлений от 0 до 50 ГПа. Для этого использованы две основные редакции экспериментов.

Исследования адиабатического расширения и торможения продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге проведены в постановке метода преград, в котором параметры состояний на адиабате расширения продуктов взрыва определяются по результатам регистрации затухания ударных волн в малоплотных преградах, вплотную контактирующих с зарядом исследуемого ВВ. Регистрация зависимостей волновых скоростей от времени производилась посредством трёхканального микроволнового интерферометра (РИФ), а зависимостей скоростей контактной границы продукты взрыва - окно из фторида лития от времени – с помощью лазерного интерферометра VISAR.

Перескаты детонационные волны в образцах ВВ генерировались при воздействии металлических ударников, разгоняемых до скоростей в несколько километров в секунду продуктами взрыва активного заряда ВВ. Посредством многоканального лазерного интерферометра VISAR регистрировалось движение ударника и контактной границы ПВ – окно из фторида лития, скорость перескаты детонационной волны определялась с помощью одноканального микроволнового интерферометра.

В результате проведенных исследований получена экспериментальная информация о параметрах состояний на ударной адиабате и адиабате расширения продуктов взрыва пластифицированного октогена в диапазоне давлений от 0 до 50 ГПа, а также проведено сравнение экспериментальных данных с результатами расчетов с уравнением состояния на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса (мВдВ) [9].

1 Редакция экспериментов

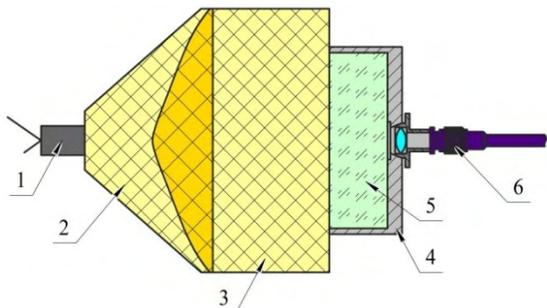
1.1 Исследования адиабатического расширения и торможения продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге

Эксперименты по исследованию адиабатического расширения и торможения продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге проводились в постановке метода преград [1]-[3]. В качестве исследуемых образцов выступали цилиндрические заряды взрывчатого вещества диаметром 120 мм и толщиной 60 мм. Применение достаточно массивных зарядов взрывчатого вещества обусловлено необходимостью уменьшения влияния переходных процессов, связанных с системой

инициирования. Во всех экспериментах инициирование детонации производилось с помощью плосковолнового генератора.

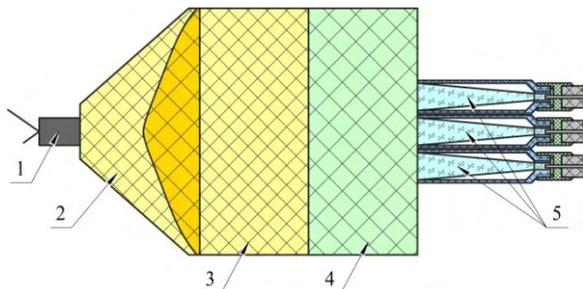
Опыты по регистрации волновых профилей на границе раздела продукты взрыва – окно из фторида лития [10]-[11] проводились с использованием многоканального комплекса лазерного интерферометра VISAR с длиной волны λ зондирующего излучения 532 нм (см. рисунок 1). На поверхности окна из фторида лития диаметром 40 мм и толщиной 20 мм, обращенной к образцу взрывчатого вещества, имелся слой алюминия толщиной 10 мкм.

В опытах по расширению продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге в малоплотные преграды использовался трехканальный микроволновый радиоинтерферометр с длиной волны λ зондирующего излучения 3,2 мм [12], с помощью которого регистрировались профили волновой скорости в пористом полистироле с начальной плотностью 0,26 и 0,70 г/см³ (см. рисунок 2) и газах – воздухе, аргоне, ксеноне и азоте (см. рисунки 3-4).



1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской ударной волны, 3 – заряд исследуемого ВВ, 4 – корпус, 5 – окно, 6 – оптический датчик

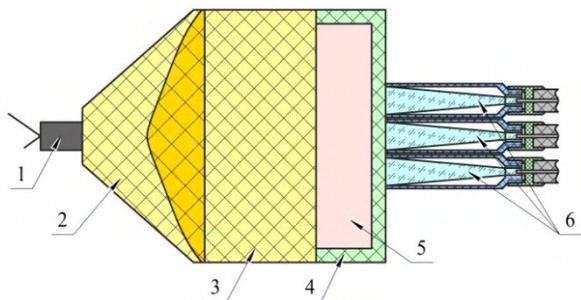
Рисунок 1. Эскиз экспериментальной сборки для исследования торможения продуктов взрыва во фторид лития



1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской ударной волны, 3 – заряд исследуемого ВВ, 4 – пористый полистирол, 5 – излучатели микроволнового радиоинтерферометра

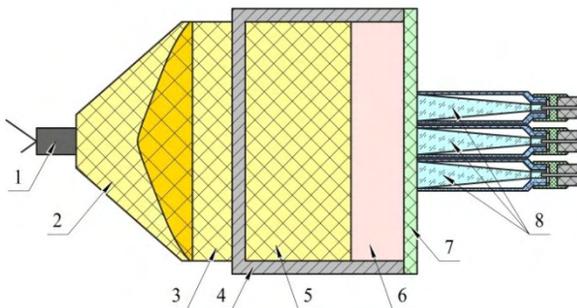
Рисунок 2. Эскиз экспериментальной сборки для исследования расширения продуктов взрыва в пористый полистирол

В опытах с плотными газами в состав сборок входила газовая кювета (опыты с воздухом, аргонном и ксенонном при начальном давлении $P_0=1$ атм., см. рисунок 3) или камера высокого давления (опыты с азотом при начальном давлении $P_0=40$ атм., см. рисунок 4). Во втором случае образец исследуемого взрывчатого вещества помещался в камеру, передача детонации в него осуществлялась через дно камеры с использованием вспомогательного инициатора.



1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской ударной волны, 3 – заряд исследуемого ВВ, 4 – корпус, 5 – газ, 6 – излучатели микроволнового радиоинтерферометра

Рисунок 3. Эскиз экспериментальной сборки для исследования расширения продуктов взрыва в воздухе, аргон и ксенон

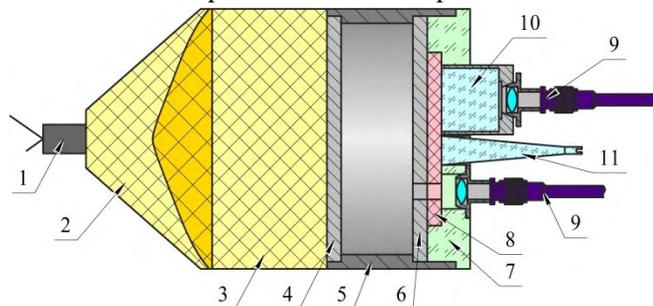


1 – электродетонатор, 2 – генератор плоской ударной волны, 3 – вспомогательный заряд ВВ, 4 – корпус камеры высокого давления, 5 – заряд исследуемого ВВ, 6 – газ, 7 – крышка, 8 – излучатели микроволнового радиоинтерферометра

Рисунок 4. Эскиз экспериментальной сборки для исследования расширения продуктов взрыва в азоте

1.2 Исследования пересжатой детонации

Эксперименты по исследованию ударно-волновой сжимаемости продуктов взрыва проводились в традиционной для данного типа исследований редакции [13]-[15]. На рисунке 5 представлен эскиз экспериментальной сборки.



- 1 – электродетонатор,
- 2 – генератор плоской ударной волны,
- 3 – активный заряд ВВ,
- 4 – алюминиевый ударник,
- 5 – корпус, 6 – алюминиевый экран,
- 7 – крышка, 8 – образец исследуемого ВВ,
- 9 – оптический датчик,
- 10 – окно из фторида лития,
- 11 – излучатель радиоинтерферометра

Рисунок 5. Эскиз экспериментальной сборки для исследования ударно-волновой сжимаемости продуктов взрыва

Пересжатые детонационные волны создавались с помощью нагружающих устройств, работа которых основана на разгоне продуктами взрыва металлических ударников и последующем их торможении на мишенях, содержащих образцы исследуемого ВВ.

Для регистрации характеристик процессов в экспериментальных сборках применялись методы доплеровской диагностики. Зависимости скорости ударников и границ раздела продукты взрыва – окно из фторида лития от времени регистрировались с помощью лазерного интерферометра VISAR. Для осуществления зондирования поверхности ударника в образце и экране выполнялись отверстия. Значения скоростей пересжатых детонационных волн в образцах исследуемого ВВ определялись с помощью микроволновой диагностики.

2 Результаты экспериментов

2.1 Результаты исследований адиабатического расширения и торможения продуктов взрыва из состояния Чепмена-Жуге

На рисунке 6 для иллюстрации представлены зарегистрированные многоканальным лазерным интерферометром VISAR зависимости скорости контактной границы раздела продукты взрыва – фторид лития от времени. Представленные записи имеют типичный вид со спадом скорости, обусловленным воздействием волны разрежения.

Эксперименты по исследованию расширения продуктов взрыва в малоплотные преграды – пористый полистирол и газы продемонстрировали идентичность регистрируемой информации, что объясняется высокой отражающей способностью фронта ударной волны. Микроволновой диагностикой проведена непрерывная во времени регистрация не только процессов движения ударных волн в преградах, но и процессов распространения стационарной детонации в зарядах взрывчатого вещества. Данную возможность демонстрирует рисунок 7, на котором представлены результаты эксперимента по расширению продуктов взрыва в пористый полистирол с начальной плотностью около $0,3 \text{ г/см}^3$. Во всех проведенных экспериментах стационарная детонация в образцах возбуждалась на глубине 1,5-2 мм, что свидетельствует об отсутствии влияния системы инициирования.

Для определения точек на адиабате расширения (торможения) продуктов взрыва зависимости скорости границы раздела или фронта ударной волны в преграде от времени аппроксимировались полиномами второй степени, последние экстраполировались к моменту $t=0$. С использованием ударных адиабат материалов преград из [16] рассчитывались значения массовой скорости U и давления P на адиабате расширения (торможения) продуктов взрыва.

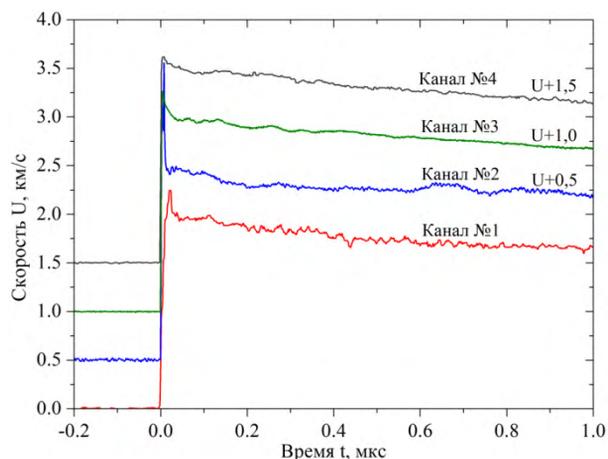


Рисунок 6. Экспериментальные зависимости скорости контактной границы продукты взрыва – фторид лития от времени

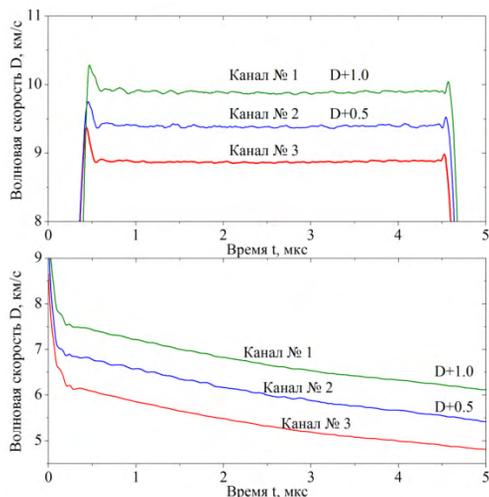


Рисунок 7. Экспериментальные профили скорости детонационной волны в ВВ (а) и ударной волны в пористом полистироле (б)

2.2 Результаты исследований пересжатой детонации

На рисунке 8 для иллюстрации представлены зависимости скорости свободной поверхности ударника от времени, зарегистрированные лазерным интерферометром в 5 экспериментах по изучению ударно-волновой сжимаемости продуктов взрыва. На рисунке 9 представлены соответствующие им зависимости скорости границы раздела продукты взрыва-окно из фторида лития от времени, на которых выявляется выход ударной волны в окно, стационарный участок и приход волны разрежения.

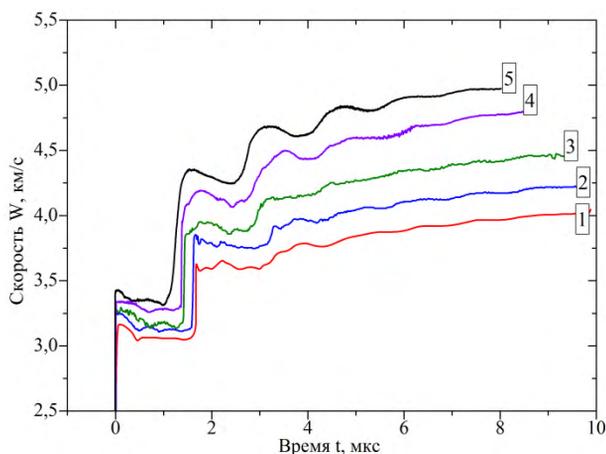


Рисунок 8. Экспериментальные зависимости скорости свободной поверхности ударника от времени

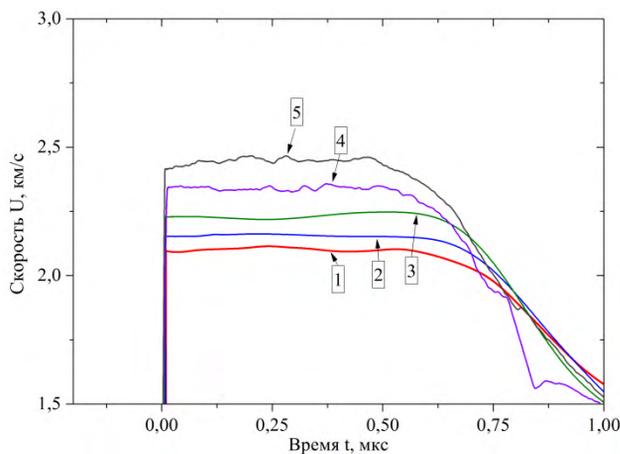


Рисунок 9. Экспериментальные зависимости скорости границы продукты взрыва-окно из фторида лития от времени

Совмещение трех методик доплеровской диагностики позволило получить в каждом опыте информацию о движении ударника (VISAR), пересжатой детонационной волны в ВВ (РИФ) и скорости границы раздела продукты взрыва – окно из фторида лития (VISAR). Для определения параметров состояний на ударной адиабате пересжатых продуктов взрыва использован метод отражения ударных адиабат.

3 Численное моделирование экспериментов

Моделирование экспериментов проводилось с использованием одномерного программного комплекса [17] в двух основных редакциях: 1 – расширение и торможение продуктов взрыва из

состояния Чепмена-Жуге и 2 – ударно-волновое сжатие продуктов взрыва в режиме пересжатой детонации.

Для образцов исследуемого ВВ на основе октогена использовалось уравнение состояния на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса (А.Б. Медведев, А.В. Скобеев) [9]. Для активного заряда ВВ на основе гексогена во второй редакции расчетов использовался УРС ПВ в форме В.Н. Зубарева [18]. Детонация активного заряда в расчете задавалась в слое толщиной 0.3 мм. Плосковолновой генератор в расчетах не моделировался.

Во всех расчетах для материалов преград, ударника и экрана использовалось уравнение состояния Ми-Грюнайзена, параметры которого определены на основе данных [16]. Для учета влияния упруго-пластических свойств в ударнике и экране применялись используемые во ВНИИЭФ модели упруго-пластического деформирования.

Далее представлены основные результаты расчетного моделирования в сравнении с полученными в рамках настоящей работы экспериментальными данными.

На рисунке 10 представлены зависимости скорости границы раздела продукты взрыва – окно из фторида лития от времени, зарегистрированные с помощью лазерного интерферометра VISAR. Сравнение с результатами расчетов указывает на их согласованность с экспериментальными профилями скорости. На рисунке 11 приведены экспериментальные данные на адиабате расширения-торможения продуктов взрыва. Расчетная изэнтропа расширения продуктов взрыва удовлетворительно воспроизводит экспериментальные данные, в том числе при больших степенях расширения продуктов взрыва (в области низких давлений).

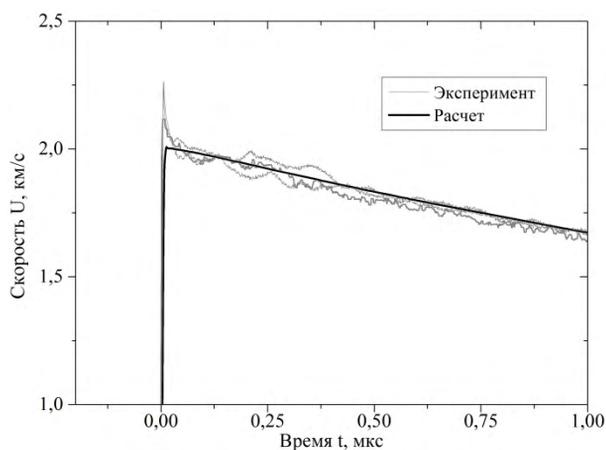


Рисунок 10. Экспериментальные зависимости скорости контактной границы продукты взрыва – фторид лития от времени в сравнении с результатами расчетного моделирования

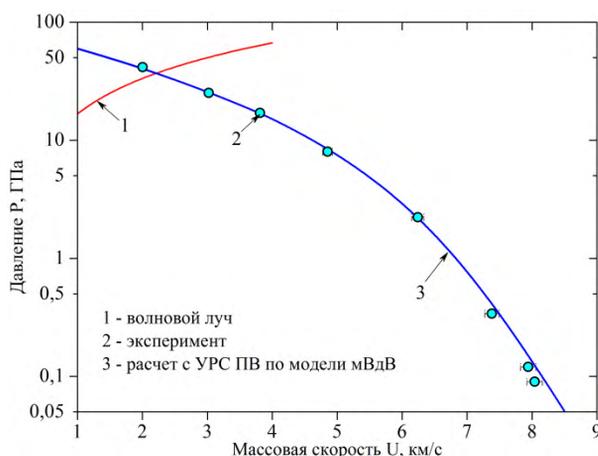


Рисунок 11. Зависимость давления от массовой скорости на опорной изэнтропе продукты взрыва

На рисунке 12 для иллюстрации представлены результаты моделирования одного из экспериментов по исследованию ударно-волнового сжатия пересжатых продуктов взрыва. Представленные результаты демонстрируют согласованность расчетов и экспериментальных профилей скоростей ударника и границы раздела продукты взрыва – окно. На рисунке 13 представлена зависимость давления от плотности на ударной адиабате пересжатых продуктов взрыва. Расчетная зависимость находится в согласии с результатами экспериментов.

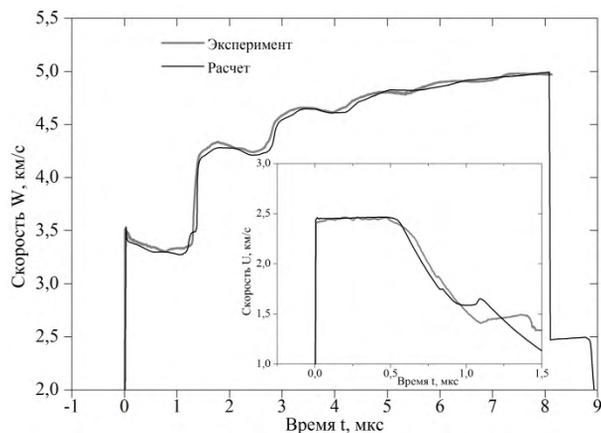


Рисунок 12. Результаты моделирования экспериментов по исследованию ударно-волнового сжатия продуктов взрыва

Заключение. В результате проведенных исследований получена экспериментальная информация о параметрах состояний на ударной адиабате и адиабате расширения продуктов взрыва пластифицированного октогена в диапазоне давлений от 0 до 50 ГПа.

В экспериментах по исследованию адиабатического расширения ПВ с привлечением многоканального комплекса микроволновой диагностики получена информация о параметрах состояний в области давлений ниже 30 ГПа. Непрерывные профили скорости границы раздела ПВ-окно получены с помощью лазерного интерферометра VISAR. В экспериментах по исследованию пересжатых детонационных волн получена информация о параметрах состояния на ударной адиабате в диапазоне давлений от значения давления в точке Чепмена-Жуге до 50 ГПа.

Полученные в работе экспериментальные данные использованы для тестирования уравнения состояния на основе модели мВдВ (А.Б. Медведев, А.В. Скобеев) [9]. Результаты одномерного моделирования с использованием УРС ПВ на основе модифицированной модели Ван-дер-Ваальса находятся в согласии с экспериментальными данными в широкой области давлений от 0 до 50 ГПа.

Список литературы

1. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. УФН, 1965, т.85, № 2, стр. 179
2. Евстигнеев А.А., Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н. Изэнтропическое расширение и уравнение состояния продуктов взрыва тротила // ФГВ, 1976, № 5, с. 758-763
3. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Телегин Г.С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ // ПМТФ, 1969, № 4, с. 127-132
4. Skidmore I.C., Hart S. The equation of state of detonation products behind overdriven detonation waves in Composition B / Proceedings of Fourth Symposium (International) on Detonation – 1965, White Oak, Maryland, 1965, pp. 47-51
5. Kineke J.H., West C.E. Shocked state of four overdriven explosives / Proceedings of Fifth Symposium (International) on Detonation – 1970, Pasadena, CA, 1970, pp. 533-543
6. Альтшулер Л.В., Зубарев В.Н., Телегин Г.С. Пересжатые детонационные волны в конденсированных ВВ // ФГВ, 1974, № 5, с. 728
7. Green L.G., Lee E.I., Holmes N.C. Shock measurements on explosives in the supra-compressive region / International Symposium on Pyrotechnics and Explosives, Beijing, China, 1987

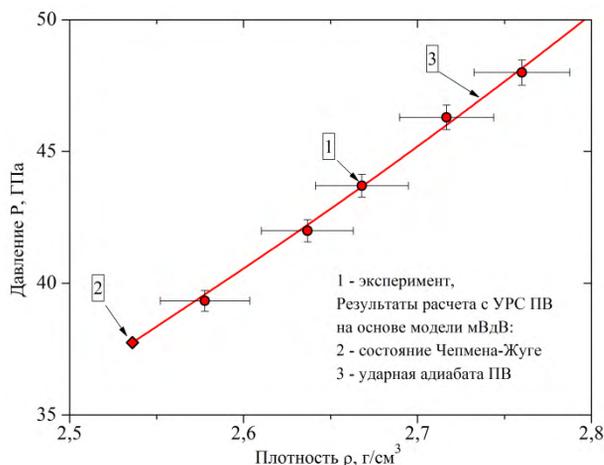


Рисунок 13. Зависимость давления от плотности на ударной адиабате продуктов взрыва

8. Tang P.K., Anderson W.W., Fritz J.N. et al. A study of the overdriven behaviors of PBX-9501 and PBX-9502 / Proceedings of the Eleventh Symposium (International) on Detonation – 1998, Snowmass, Colorado, 1998, pp. 1058-1064
9. Копышев В.П., Медведев А.Б., Скобеев А.В. Расчет детонационных характеристик конденсированных взрывчатых веществ с применением модифицированной модели Ван-дер-Ваальса \ 65 лет ВНИИЭФ. Физика высоких плотностей энергии: Научное издание. – В 2-х выпусках. Выпуск 2. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2011. – 444 с.
10. Gustavsen R.L., Sheffield S.A., Alcon R.R. Progress in measuring detonation wave profiles in PBX9501 // Proceedings of XI Symposium on Detonation, Snowmass, USA, 1998
11. Fedorov A.V. et al. Detonation front in homogenous and heterogeneous HE// Proceedings of APS Conference “Shock Compression of Condensed Matter”, Snowbird, USA, 1999, pp.801-804
12. Невозмущающие методы диагностики быстропротекающих процессов / Под ред. доктора техн. наук А.Л. Михайлова. – Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. – 322 с.
13. Vorthman J.E., Hixson R.S., Anderson W.W., Fritz J.N., Shaw M.S. Release isentropes in overdriven PBX-9501 / Proceedings of Shock Compression of Condensed Matter – 2009, Melville, New York, 2009, pp. 223-226
14. Fritz J. N., Hixson R. S., Shaw M. S., Morris C. E., McQueen R. G. Overdriven-detonation and sound-speed measurements in PBX-9501 and the “thermodynamic” Chapman-Jouguet pressure // J. Appl. Phys., v. 80, N 11, 1996, pp. 6129-6141
15. Hixson R. S., Shaw M. S., Fritz J. N., Vorthman J. E., Anderson W. W. Release isentropes of overdriven plastic-bonded explosive PBX-9501 // J. Appl. Phys., v. 88, N 11, 2000, pp. 6287-6293
16. Экспериментальные данные по ударно-волновому сжатию и адиабатическому расширению конденсированных веществ. Под ред. Р.Ф. Трунина. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2006, 531 с.
17. Гаврилов Н.Ф., Иванова Г.Г., Селин В.И., Софронов В.Н. Программа УП-ОК для решения одномерных задач механики сплошной среды в одно-мерном комплексе. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Методики и программы численного решения задач математической физики. 1982. Вып. 3/11. С.11-14
18. Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Телегин Г.С. Изэнтропы расширения продуктов взрыва конденсированных ВВ. // ПМТФ, 1969, № 4, с. 127-132

КОНСТАНТЫ РАДИОЛИЗА ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫХ ОКТОГЕНА И ТАТБ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

*А.М. Злобин, Т.Е. Кирсанова, Д.А. Кащеев, С.Э. Гребенникова, Ю.В. Шейков,
С.А. Вахмистров, Н.Я. Сысоев, А.А. Девяткин, А.М. Пичугин, К.В. Лизунов*

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Экспериментальные данные, связанные с образованием газообразных продуктов разложения и их выделением из образцов ВВ после воздействия различных видов ионизирующих излучений (ИИ), представляют большой практический интерес. Газообразные продукты, возникающие в объеме конденсированных ВВ при их термическом и радиационном разложении, могут оказывать существенное влияние на механические, термодинамические и газодинамические характеристики ВВ [1] – [4]. В результате образования газов увеличивается внутреннее давление, образуются поры, уменьшается плотность (увеличивается объем), изменяются физико-химические характеристики