

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

ВВ, снижается скорость детонации и т.д. Изучение газовой фазы дает важную информацию о кинетических процессах в ВВ, вызываемых ионизирующими излучениями.

В [4] были представлены результаты анализа экспериментальных исследований выхода газообразных продуктов разложения из облученных образцов октогена и ТАТБ, проведенных с использованием манометрического метода на базе измерительно-вычислительного комплекса «Вулкан-2000». Эксперименты по облучению нейтронами образцов ВВ выполнялись при четырех последовательных статических пусках реактора БИГР, обеспечивших суммарную поглощенную дозу 0,84 Мрад. На основании анализа кинетических кривых выделения газообразных продуктов разложения была получена информация о константе скорости реакции и энергии активации термического разложения, константе радиационного разложения (радиолиза) ВВ, временах выхода продуктов газовой фазы и др.

В настоящей работе представлены результаты анализа экспериментальных данных для необлученных и облученных образцов из пластифицированных октогена и ТАТБ. Получены оценки констант радиационного разложения k_r , а также характерных времен выхода газообразных продуктов разложения. Показано, что у пластифицированного октогена константа радиолиза примерно на 20 % ниже измеренной ранее для октогена [4], а время выхода продуктов разложения больше, что может быть объяснено присутствием в пластифицированном октогене связующего. Согласно сделанным оценкам, константа радиолиза у прессованных образцов из пластифицированного ТАТБ примерно в 1,6 раза больше, чем у одноименных образцов в виде гранул.

1 Экспериментальные данные для пластифицированных октогена и ТАТБ

Химическую стойкость ВВ определяли манометрическим методом с использованием измерительно-вычислительного комплекса «Вулкан-2000». Масса ВВ – 0,5 г. Время проведения опытов - 5 часов.

Химическую стойкость ВВ оценивали по константе скорости реакции и энергии активации термического разложения, рассчитанным по экспериментальным данным об изменении объема выделившихся газов в результате выдержки при повышенной температуре. Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Кинетические параметры (энергия активации и константа скорости реакции) термического разложения пластифицированных октогена и ТАТБ

ВВ		Температура, °С	k_T, c^{-1}	E, кал/моль
Пластифицированный октоген	исходный	190	$2,1 \cdot 10^{-7}$	43100
	облученный		$2,4 \cdot 10^{-7}$	43000
Пластифицированный ТАТБ	исходный	225	$1,2 \cdot 10^{-7}$	46900
	облученный (гранулы)		$1,9 \cdot 10^{-7}$	46400
	облученный (прессованный образец)		$2,0 \cdot 10^{-7}$	46500

На рисунках 1 и 2 представлены результаты измерений объема выделившихся газов от времени выдержки необлученных и облученных образцов из пластифицированных октогена и ТАТБ.

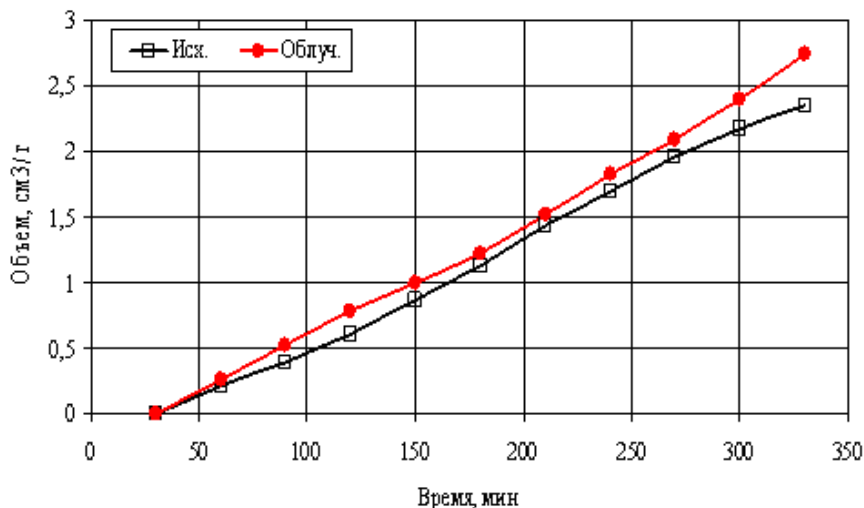


Рисунок 1. Зависимость объема выделившихся газов из образцов пластифицированного октогена от времени проведения эксперимента

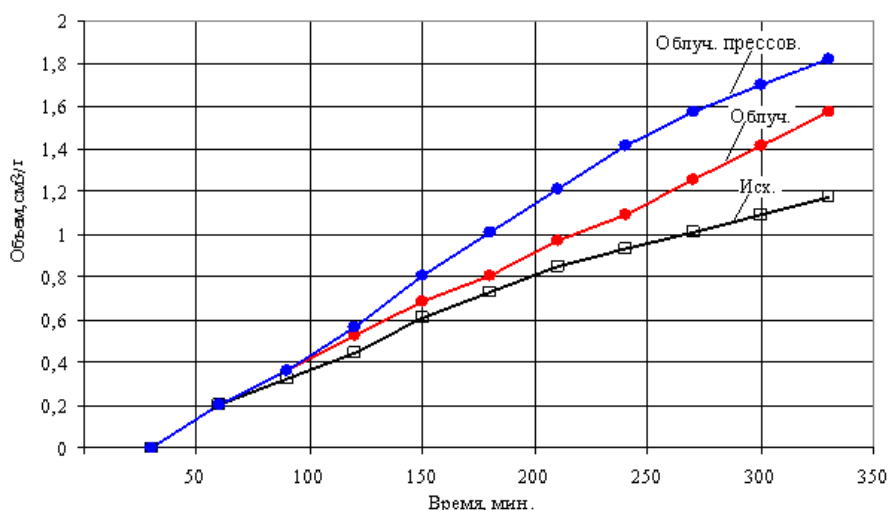


Рисунок 2. Зависимость объема выделившихся газов из образцов пластифицированного ТАТБ от времени проведения эксперимента

2 Результаты анализа экспериментальных данных для необлученных образцов из пластифицированных октогена и ТАТБ

Временная зависимость объема газов $V_T(t)$, вышедших из необлученного образца ВВ в процессе его выдержки, полученная из уравнения баланса (с учетом термического разложения и кинетики выхода) может быть представлена в следующем виде [4]:

$$V_T(t) = \frac{V_\infty}{1-\gamma_T} \left[1 - \gamma_T - \exp(-k_T t) + \gamma_T \exp\left(-\frac{t}{\tau_T}\right) \right] \quad (1.)$$

Здесь V_∞ - объем выделяющихся газообразных продуктов при полном термическом разложении ВВ; k_T - константа термического разложения ВВ при заданной температуре; τ_T - характерное время выхода газов за счёт термического разложения, зависящее, вообще говоря, от типов наполнителя и связующего, температуры, размеров зерна, дефектов и т.д.; параметр $\gamma_T \equiv k_T \tau_T$.

В условиях наших экспериментов (температура термостата $T = 190^\circ\text{C}$ и 225°C , времена выдержки образцов в термостате не превышают 330 мин.) выполнено неравенство $k_T t \ll 1$, и, зная экспериментальные значения объема вышедших газов из необлученных образцов $V_{T,\text{exp}}(t)$, для определения параметра τ_T выражение (1) приведём к следующему виду:

$$\tau_T \approx \frac{t - \xi k_T^{-1}}{1 - \xi - \exp(-\frac{t}{\tau_T})}, \quad \text{где } \xi = \frac{V_{T,\text{exp}}(t)}{V_\infty} \quad (2)$$

При $\xi \ll 1$ и для достаточно больших времён выдержки из (2) следует удобное для оценки τ_T выражение:

$$\tau_T \approx t - \frac{\xi(t)}{60 \cdot k_T} \quad (\text{время в мин.}) \quad (3)$$

Как показывают оценки с использованием экспериментальных значений $V_{T,\text{exp}}(t)$, соответствующих нижним кривым рисунков 1 и 2 в диапазоне времен выдержки образцов 100-250 мин., время выхода газов для пластифицированных октогена и ТАТБ составляет примерно $\tau_T \approx 30$ мин. Это значение в $\sim 1,5$ раза больше полученного ранее для необлученных образцов октогена и ТАТБ ($\tau_T \approx 20$ мин. [4]). Увеличение характерного времени выхода газов, обусловленных термическим разложением пластифицированных октогена и ТАТБ, может быть объяснено присутствием в таких образцах связующего.

Используя величины параметров k_T и τ_T , с помощью формулы (1) получаем расчетные значения объема вышедших газов $V_{T,\text{th}}(t)$ из необлученных образцов ВВ во всем диапазоне времени эксперимента. Сравнение экспериментальных $V_{T,\text{exp}}(t)$ и расчетных $V_{T,\text{th}}(t)$ значений объема газов для пластифицированного октогена при значениях параметров $k_T = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ c}^{-1}$, $\tau_T = 30$ мин. представлено на рисунке 3.

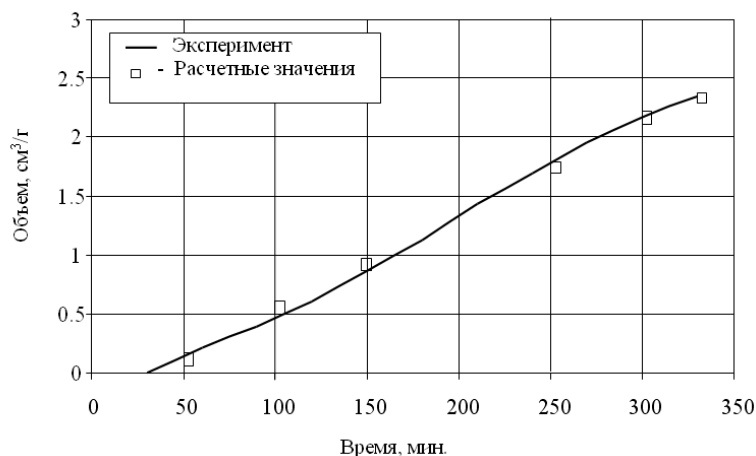


Рисунок 3. Расчетные и экспериментальные значения объема газов, выделившихся из образцов необлученного пластифицированного октогена

В диапазоне времен наблюдения (150-330) мин. для необлученного пластифицированного октогена расхождение расчетного и экспериментального значений не превосходит 9%. В области $t < 150$ мин. наблюдается большее расхождение, одной из возможных причин которого является

увеличение относительной ошибки измерений малых объемов выделившихся газов. Расхождение в интервале (50-100) мин. составляет 20-25 %.

Для пластифицированного ТАТБ при значениях параметров $k_T = 1,2 \cdot 10^{-7} \text{ с}^{-1}$ и $\tau_T \approx 30$ мин. наблюдается примерно такое же расхождение расчетных и экспериментальных значений.

3 Оценка констант радиолiza пластифицированных октогена и ТАТБ

Временная зависимость объема выделившегося из образца газа $\Delta V_D(t)$, образовавшегося при радиационном разложении ВВ при нейтронном воздействии, может быть записана в принятой модели в виде [4]:

$$\Delta V_D(t) = V_\infty (\eta_r \cdot k_r \cdot D - \delta_z) \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_r}\right) \right), \quad (4.)$$

где k_r - константа радиолiza; D - поглощенная доза (рад/г); η_r - доля газообразных продуктов в продуктах радиационного разложения ВВ; δ_z - доля т.н. «заклиненных» газов при температуре выдержки; τ_r - время выхода газов, образовавшихся при радиолize, при температуре выдержки.

Оценку k_r можно сделать, используя экспериментальные данные, полученные при временах, больших по сравнению с τ_r , когда газы, образовавшиеся при радиолize, в основном вышли из облученного образца. Тогда, пренебрегая экспонентой в (4), приближенно получим:

$$k_r \approx \frac{\Delta V_{D,\text{exp}} + \delta_z \cdot V_\infty}{V_\infty \cdot \eta_r \cdot D}, \quad (5.)$$

где $\Delta V_{D,\text{exp}}$ - экспериментально измеренное значение объема выделившихся газов за счёт радиолiza при временах выдержки $t > \tau_r$.

3.1 Константа радиолiza пластифицированного октогена

Для пластифицированного октогена, полагая $D = 8,38 \cdot 10^5$ рад, $V_\infty = 620 \pm 10$ см³/г, $\Delta V_{D,\text{exp}}(t) = 0,43$ см³/г при максимальном времени выдержки $t = 330$ мин. (рисунок 1) получим: $k_r \approx \eta_r^{-1} \cdot 8,3 \cdot 10^{-10}$ рад⁻¹ (считая $\delta_z = 0$).

Приведенная величина k_r ниже полученной ранее для октогена на 20 % ($k_r \approx \eta_r^{-1} \cdot 1,04 \cdot 10^{-9}$ рад⁻¹ [4]) и при $\eta_r = 1$ примерно на 6 % превышает значение $k_r = 7,8 \cdot 10^{-10}$ рад⁻¹, известное из литературы (см., напр., [4]). Учет «заклиненных» газов, если их величина окажется существенной, может привести к возрастанию полученной оценки k_r .

По известной величине константы радиолiza k_r , можно с помощью выражения (6) определить характерное время τ_r выхода газов, образованных при радиолize образцов из пластифицированного октогена, основываясь на экспериментальных значениях величины $\Delta V_{D,\text{exp}}(t)$, взятых из кривых, представленных на рисунке 1:

$$\tau_r = - \frac{t}{\ln \left[1 - \frac{\Delta V_D(t)}{V_\infty (\eta_r \cdot k_r \cdot D - \delta_z)} \right]} \quad (6.)$$

Согласно расчетам, усредненная оценка даёт $\tau_r \cong 220$ мин. Это значение почти вдвое больше, чем было получено ранее для октогена [4], что может быть объяснено присутствием в пластифицированном октогене связующего.

На рисунке 4 приведены данные расчета и экспериментальная зависимость объема $V_{D,T\text{exp}}(t)$ (верхняя кривая на рисунке 1) выделившихся газов от времени выдержки из образцов облученного пластифицированного октогена.

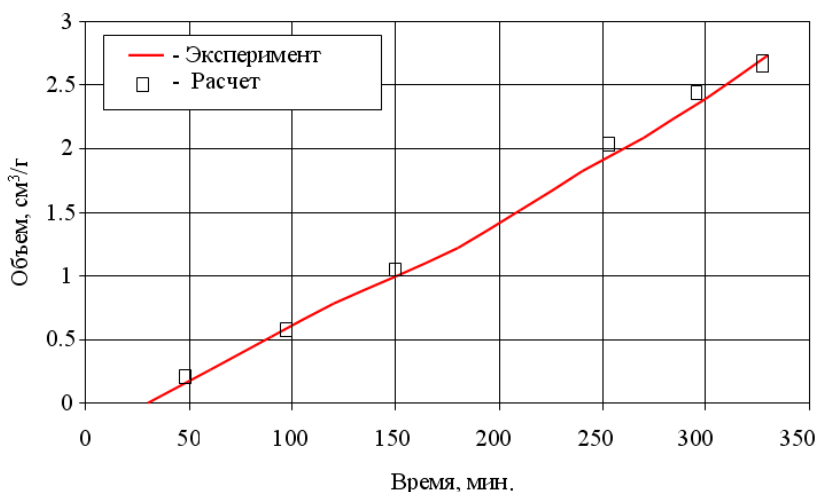


Рисунок 4. Расчетные и экспериментальные значения объема газов, выделившихся из образцов облученного пластифицированного октогена

3.2 Константа радиолиза пластифицированного ТАТБ

Оценку константы радиолиза для образцов из пластифицированного ТАТБ в виде гранул k_r^{gr} можно получить из (5), полагая $V_\infty = 560$ см³/г, $D = 8,38 \cdot 10^5$ рад, $\Delta V_{D,\text{exp}}^{gr} = 0,4$ см³/г при максимальном времени выдержки $t = 330$ мин. (в соответствии со средней кривой на рисунке 2) и считая для простоты $\delta_z = 0$:

$$k_r^{gr} \approx \frac{0.4}{\eta_r \cdot 560 \cdot 8,38 \cdot 10^5} \approx \eta_r^{-1} \cdot 8,5 \cdot 10^{-10} \text{ рад}^{-1} \quad (7.)$$

Эта оценка примерно на 11 % ниже величины, полученной ранее для ТАТБ ($k_r \approx \eta_r^{-1} 0,96 \cdot 10^{-9}$ рад⁻¹ [4]), что можно объяснить присутствием в этих образцах пластифицированного ТАТБ связующего.

Аналогично, используя экспериментальные данные для облученных прессованных образцов из пластифицированного ТАТБ, полагая в соответствии с верхней кривой на рисунке 2 $\Delta V_{D,\text{exp}}^p(330) \cong 0,64$ см³/г при $t = 330$ мин. для константы радиолиза прессованных образцов k_r^p получим оценку:

$$k_r^p \approx \frac{0.64}{\eta_r \cdot 560 \cdot 8,38 \cdot 10^5} \approx \eta_r^{-1} \cdot 1,36 \cdot 10^{-9} \text{ рад}^{-1} \quad (8.)$$

Таким образом, согласно проведённым оценкам, значения константы радиолиза для гранулированных и прессованных образцов из пластифицированного ТАТБ лежат в диапазоне $\eta_r^{-1}(0,85-1,36) \cdot 10^{-9}$ рад⁻¹, что соответствует разбросу значений примерно 1,6.

Как показал анализ экспериментальных данных для облученных образцов из пластифицированного ТАТБ с использованием рассматриваемой модели, выход образовавшихся при радиолизе газов можно объяснить некоторой задержкой с характерным временем t_0 , т.е. вместо (4) имеет место зависимость вида:

$$\Delta V_D(t, t_0) = V_\infty \cdot k_r \cdot D \left(1 - \exp\left(-\frac{t - t_0}{\tau_r}\right) \right) \quad (9.)$$

Для гранулированных образцов из пластифицированного ТАТБ сделанные на основе экспериментов оценки для времени выхода и времени задержки дают, соответственно, $\tau_r^{gr} \approx 130$ мин, $t_0^{gr} \approx 80$ мин. На рисунке 5 приведено сравнение экспериментальной зависимости объема выделившихся газов для облученных гранулированных образцов из пластифицированного ТАТБ $V_{D,T \text{ exp}}^{gr}(t)$ с расчетом при использовании полученных значений параметров.

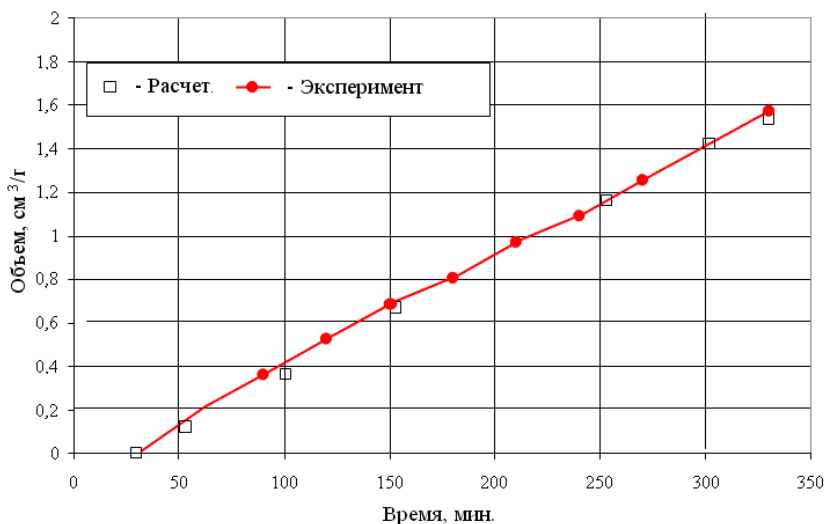


Рисунок 5. Расчетные и экспериментальные значения объема газов, выделившихся из образцов гранулированного облучённого пластифицированного ТАТБ

Исходя из экспериментальных значений для прессованных образцов из пластифицированного ТАТБ, выполнены оценки для времени выхода и времени задержки образовавшихся в результате радиолиза газов, которые дают, соответственно, $\tau_r^p \approx 70$ мин, $t_0^p \approx 90$ мин.

На рисунке 6 представлено сравнение экспериментальной зависимости объема выделившихся газов для облученных прессованных образцов из пластифицированного ТАТБ (верхняя кривая рисунок 2) с расчетом при использовании полученных значений параметров.

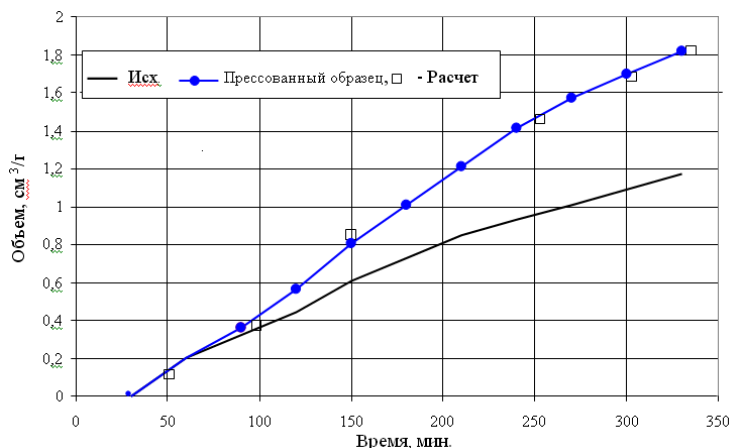


Рисунок 6. Сравнение расчета с экспериментальной зависимостью объема газов $V_{D,T}^p(t)$, выделившихся из облученных прессованных образцов пластифицированного ТАТБ

Список литературы

1. С.М. Рябых. Закономерности образования и накопления радиолитического азота, удерживаемого кристаллической решеткой азидов тяжелых металлов. // Химическая физика, 1990, том 9, №2, с.191.
2. В.Н. Герман, Н.В. Завьялов, А.М. Злобин, Т.Е. Кирсанова, Т.Г. Кирьянова, Е.С. Козлова, Л.Е. Корнилова, С.А. Новиков, Ю.П. Орликов, А.П. Погорелов, В.А. Сеницин, А.К. Фисенко, Л.В. Фомичева, Ю.А. Хохлов. Исследование воздействия импульсного электронного облучения на взрывчатый состав на основе октогена. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 1992, вып.3, с.19-23.
3. В.Н. Герман, Н.В. Завьялов, А.М. Злобин, Т.Е. Кирсанова, Т.Г. Кирьянова, Е.С. Козлова, Л.Е. Корнилова, С.А. Новиков, Ю.П. Орликов, А.П. Погорелов, В.А. Сеницин, А.К. Фисенко, Л.В. Фомичева, Ю.А. Хохлов. Воздействие электронного облучения на взрывчатое вещество ТАТБ. // ВАНТ. Сер. Теоретическая и прикладная физика, 1995, вып.3/1, с. 49-53.
4. 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. Оценка констант радиолитического октогена и ТАТБ при нейтронном облучении // Труды международной конференции (XIX Харитоновские тематические научные чтения, 17-21 апреля, 2017г). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2017, с. 171-178.

PROPAGATION OF REACTIVE CRACKS IN PRESSED HMX-BASED PBX AND REACTION VIOLENCE OF EXPLOSIVE SYSTEM IN THICK WALL CONFINEMENT

Hu Haibo¹, Guo Yingwen¹, Li Tao¹, Fu Hua¹, Shang Hailin¹, Wen Shanggang², Qiu Tian², Yu Hong³

¹Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang, Sichuan, China, 621900

²Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang, Sichuan, China, 621900

³Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing, 100089

Abstract: High temperature gaseous products of conductive reaction on explosive surface can penetrate into preformed crack inside explosive bulk under high pressure to form so-called convective reaction which behaviors as rapid transportation of hot gaseous products along crack and the initiation of