

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕИДЕАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ДЕТОНАЦИИ  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

THE RESEARCHING OF NON-IDEAL REGIMES OF DETONATION OF  
INDUSTRIAL EXPLOSIVES

*В работе приведены результаты экспериментальных и аналитических исследований скорости детонации аммонита №6ЖВ в зарядах конечного диаметра. Получена математическая модель, описывающая неидеальный режим детонации аммонита в зарядах от их диаметра, плотности патронирования и критического диаметра детонации ВВ.*

*In this work the results of experimental and analytic researches of detonation's speed of ammonite №6GV in charges of ending diameter are shown. The mathematic model which describes non-ideal regime of detonation's speed of ammonite in charges depends on their diameter, density and critical diameter of detonation of explosive is received.*

**Вступление.** Промышленные взрывчатые вещества (ВВ), как правило, представляют собой физически и химически неоднородные смеси из двух и более компонентов, различных по химическому строению и свойствам. Подавляющее большинство промышленных ВВ являются аммиачно-селитренными смесями, основным компонентом которых является нитрат аммония. Нитрат аммония имеет слабо выраженные взрывчатые свойства и его смеси со взрывчатыми нитросоединениями или невзрывчатыми горючими компонентами являются кинетически неоднородными реагирующими системами. В отличие от индивидуальных ВВ, при детонации промышленных ВВ химические реакции во фронте детонационной волны происходят в несколько стадий. Поэтому промышленные ВВ при детонации имеют ярко выраженные особенности и аномалии процесса детонации, которые недостаточно изучены.

**Анализ предыдущих исследований.** Ранее проведенными исследованиями детонационной способности промышленных ВВ было установлено, что их детонационные характеристики связаны с неидеальным режимом протекания химических реакций при детонации. Неидеальный режим детонации объясняется тем, что общее время и полнота завершения химических реакций при детонации зависит от скорости разложения и сгорания отдельных частиц ВВ, определяемых размером частиц и равномерностью их смешения. Наличием фазы вторичных реакций, проходящих за фронтом волны детонации в условиях, когда их скорость зависит от газовой диффузии и смешения отдельных продуктов первичного распада. С этими особенностями превраще-

ния в детонационной волне связаны характерные для промышленных ВВ явления растянутости зоны химических реакций и большего чем у индивидуальных ВВ критического диаметра детонации. Это приводит к аномальной зависимости скорости детонации и критического диаметра ВВ от плотности патронирования заряда. Для промышленных ВВ наблюдается характерный спад скорости детонации при увеличении плотности заряда сразу после ее максимума, отвечающего некоторой плотности, для которой вводят понятие критической плотности. При увеличении плотности ВВ в заряде сверх критической спад скорости может быть таким резким, что детонация в заряде данного диаметра становится неустойчивой. Проблема устойчивости детонации зарядов промышленных ВВ при взрывных работах имеет большое научное значение, так как определяет их эффективность и безопасность применения.

**Целью работы** является исследование неидеальных режимов детонации промышленных ВВ типа аммонита в зарядах конечного диаметра и плотности с учетом аномальной зависимости их детонационных характеристик от плотности ВВ.

**Материалы и результаты исследований.** В работе [1] обосновано, что критическая плотность промышленных ВВ характеризуется точкой максимума на кривой  $D = \varphi(\rho_{ВВ})$ . При этом экстремальный вид зависимости для зарядов конечного диаметра промышленного ВВ зависит от его состава, размеров частиц компонентов, равномерности их смешения. С уменьшением размеров частиц, достижения их более равномерного и тесного смешения соответствующая точка максимума на кривой  $D = \varphi(\rho_{ВВ})$  сдвигается в область более высоких плотностей ВВ в заряде. В связи, с чем делается заключение, что в пределе при достаточно тонкой обработке аммонитной массы ВВ можно наблюдать вид зависимости  $D = \varphi(\rho_{ВВ})$ , мало отличающийся от аналогичной зависимости для ВВ индивидуального типа. Вместе с тем, аномальный вид зависимости для промышленных ВВ связан с возникновением области неидеальной детонации в зарядах конечного диаметра, зависящей от плотности их патронирования, отличной от оптимальной плотности в предельном диаметре заряда, в котором достигается идеальный режим детонации, параметры которого неизвестны. При изготовлении промышленных ВВ необходимо осуществлять их патронирование в заряды, в которых возможно протекание детонационного режима соответствующего идеальному режиму детонации.

Одним из наиболее широко используемых ВВ II класса является аммонит №6ЖВ, который применяется при взрывных работах в патронах различного диаметра. Для этого промышленного ВВ неизвестен вид зависимости скорости детонации от взаимного влияния на нее плотности ВВ и диаметра заряда. Поэтому оптимальные параметры патронирования при производстве и применении ВВ в зависимости от диаметра также неизвестны. Это, в свою очередь, приводит к снижению эффективности взрывных работ.

В экспериментальных исследованиях были использованы образцы от разных партий аммонита №6ЖВ. Согласно данным работы [2], зависимость

изменения скорости детонации индивидуальных ВВ от их плотности и диаметра заряда может быть представлена уравнениями степенного вида. Учитывая возможность неидеального режима детонации, обобщенная зависимость скорости детонации аммонита №6ЖВ от его плотности ( $\rho_{ВВ}$ ) и диаметра заряда ( $d_{ВВ}$ ) может иметь существенные отличия от зависимости, полученной в работе [2]:

$$D = A * \rho_{ВВ}^{\alpha} * d_{ВВ}^{\beta} \quad (1)$$

где  $A, \alpha, \beta$  – экспериментальные величины, полученные в опытах.

Поэтому для промышленных ВВ вид функции (1) можно установить только из многофакторного эксперимента с учетом аномального возрастания его критического диаметра детонации от плотности заряда. В этом случае функция зависимости скорости детонации аммонита представляет собой сложную функцию нескольких взаимосвязанных переменных:

$$D = \varphi_1 [A_1(d_{кр}); A_2(\rho_{ВВ}); A_3(d_{кр})], \quad (2)$$

где  $d_{кр}$  – критический диаметр детонации ВВ,  $d_{кр} = \varphi_2(\rho_{ВВ})$ .

Исследование детонационных свойств аммонита №6ЖВ проводили известными методами. Критический диаметр детонации аммонита определяли методом конуса, а скорость детонации ВВ – методом ионизационных датчиков [3]. Для определения скорости детонации использовался прибор [4], позволяющий измерять интервалы времени ( $\tau$ ) между срабатыванием ионизационных датчиков, расположенных в заряде ВВ на точно измеренной базе (Б). Скорость детонации определяли по формуле:

$$D = Б / \tau .$$

Полученные данные о скорости детонации аммонита №6ЖВ при разных плотностях патронирования и диаметрах зарядов ВВ были обработаны методами корреляционного анализа. На первом этапе определялась зависимость скорости детонации аммонита при фиксированном диаметре заряда и различных плотностях ВВ. В качестве переменной, определяющей его скорость детонации, было выбрано отношение плотности патронирования ВВ к максимальной кристаллической плотности смеси тротила и нитрата аммония. В составе аммонита №6ЖВ содержится 21% тротила и 79% аммиачной селитры. Смесь этих компонентов дает максимальную кристаллическую плотность:

$$\rho_{кр.} = 0,21\rho_{ТНТ} + 0,79\rho_{АС} = 0,21 * 1,663 + 0,79 * 1,725 = 1,712 \text{ г/см}^3.$$

В результате исследований скорости детонации аммонита в зависимости от отношения  $\left(\frac{d_{ВВ}}{d_{кр.}}\right)$  были получены зависимости  $D = \varphi\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$  для зарядов различного диаметра. Для диаметров зарядов аммонита, равных соответственно 32, 36 и 120 мм, были получены следующие зависимости:

$$\begin{aligned} D_{32} &= 5778,51 (\rho_{ВВ}/\rho_{кр.})^{0,6836}, \\ D_{36} &= 5829,38 (\rho_{ВВ}/\rho_{кр.})^{0,61856}, \\ D_{120} &= 5844,5 (\rho_{ВВ}/\rho_{кр.})^{0,288}. \end{aligned}$$

Эти зависимости позволяют установить функцию, описывающую изменение скорости детонации аммонита от плотности ВВ в открытых зарядах, с помощью которой можно определить для этих условий максимально возможную скорость детонации этого ВВ. Действительно, если отношение  $(\rho_{ВВ}/\rho_{кр.})=1$ , то для зарядов аммонита  $d=32..120$  мм обобщенная зависимость  $D = \varphi\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$  имеет следующий вид:

$$D = 5865,63 \left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)^{0,513} \text{ м/с,} \quad (3)$$

из которой получается, что максимальная скорость детонации  $D_{max} \approx 5865.63$  м/с.

На втором этапе работы проводили исследования по определению критического диаметра детонации аммонита №6ЖВ от плотности патронирования ВВ. Критический диаметр детонации насыпных зарядов определяли методом конуса, а при высокой плотности – методом телескопических зарядов по методике, изложенной в ГОСТ 21982-76 «Аммониты водоустойчивые предохранительные». Четыре прессованных шашки ( $\rho_{ВВ}=1,5..1,7$  г/см<sup>3</sup>) укладывали в колонку так, чтобы их менее плотные торцы были повернуты в одну сторону, и помещали в бумажную гильзу соответствующего диаметра. В свободную часть гильзы насыпали аммонит. Длина подсыпки принималась около 100 мм, плотность – около 1,0 г/см<sup>3</sup>. Приготовленный заряд укладывали на грунт. Вплотную к нему укладывали контрольный патрон и производили взрывание электродетонатором. О полноте детонации судили по наличию воронки в том месте грунта, где был расположен заряд и контрольный патрон. Для зарядов с плотностью патронирования аммонита  $1,7 \geq \rho_{ВВ} \geq 1,0$  получена зависимость критического диаметра от отношения  $\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$ :

$$d_{кр.} = 23,183 \left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)^{2,19478}, \text{ мм} \quad (4)$$

Третий этап исследований заключался в получении обобщенной зависимости неидеальной скорости детонации аммонита в зарядах конечного диаметра с учетом зависимости критического диаметра детонации ВВ от плотности и отношения диаметра патрона к критическому диаметру. Для этого были проведены исследования по изучению скорости детонации аммонита от различных значений отношения плотности патронирования и кристаллической плотности ВВ, а также диаметров зарядов  $\left(\frac{d_{ВВ}}{d_{кр.}}\right)$ . В результате этих исследований удалось получить обобщенную зависимость неидеальной детонации аммонита в виде сложной функции вида (2). Она учитывает многофакторное влияние на параметры детонации ВВ его плотности, критического диаметра и диаметра заряда:

$$D = 5865,63 \left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)^{0,513} \left\{1 - \exp\left[-0.64345 \left(\frac{d_{ВВ}}{d_{кр.}}\right)\right]\right\}, \text{ м/с.} \quad (5)$$

Таким образом, была получена математическая модель, описывающая неидеальные режимы детонации аммонита (5), которая позволяет проводить аналитические исследования режимов его детонации и учитывать влияние на характер неидеальной детонации ВВ плотности его патронирования и критического диаметра детонации. В табл. 1 приведены результаты аналитических исследований по уравнению (5) режимов и параметров детонации аммонита №6ЖВ в патронах диаметром 32..120 мм. Для каждого диаметра заряда аммонита на рис. 1 приведены графики функции изменения скорости детонации от плотности патронирования ВВ и его критического диаметра детонации. Графики зависимостей 1..6 на рис. 1 представляют собой многочлены третьей степени:

$$D = a \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^3 + b \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^2 + c \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right) + d, \quad (6)$$

где  $a, b, c, d$  – коэффициенты многочлена, определяются методами корреляционного анализа.

Табл. 1. – Результаты аналитических исследований скорости детонации аммонита №6ЖВ

$\rho_{ВВ},$ г/см <sup>3</sup>	$d_{кр.},$ мм	Диаметр заряда, мм					
		32	36	45	70	90	120
1,0	7,1	4204,4	4279,4	4375,3	4443,7	4450,4	4451,6
1,1	8,8	4226,7	4340,5	4502,0	4647,1	4668,4	4674,1
1,2	10,6	4183,8	4335,3	4567,6	4817,6	4867,2	4884,8
1,3	12,7	4090,4	4274,7	4575,0	4947,5	5040,4	5081,6
1,4	14,9	3961,1	4171,9	4532,0	5032,6	5181,7	5260,6
1,5	17,3	3808,8	4039,4	4448,6	5072,7	5286,6	5417,1
1,6	20,0	3643,6	3888,0	4335,2	5070,7	5353,1	5546,6
1,7	22,8	3473,0	3725,9	4200,6	5032,0	5382,1	5646,0
1,712	23,2	3452,5	3706,0	4183,4	5025,1	5383,2	5655,8
$\rho_{кр.},$ г/см <sup>3</sup>		1,08	1,14	1,26	1,54	>1,712	>1,712
$D_{max},$ м/с		4227,9	4345,9	4578,6	5076,7	5383,2	5655,8

Математические приемы позволяют легко исследовать график многочлена (6) и найти точки, соответствующие максимальной скорости детонации и критической плотности ВВ. Исследования на максимум функции проводим при помощи второй производной. Покажем, что если в точке  $\left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right) = \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)_{кр.}$ , то  $D=D_{max}$ . Для этого приравняем первую производную  $D' \varphi \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right) = 0$ , а вторая производная должна быть  $D'' \varphi \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right) < 0$ . В табл. 1 приведены значения  $D=D_{max}$  и критической плотности патронирования аммонита №6ЖВ в диаметрах патронов 32..120 мм. Оказалось, что при патронировании аммонита в

патроны диаметром 90..120 мм у него отсутствует критическая плотность. Поэтому вид зависимости  $D = \varphi\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$  должен быть похож на аналогичную зависимость для индивидуальных ВВ. Сделаем сравнение зависимостей скоростей детонации от отношения  $\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$  для индивидуальных ВВ средней мощности (тротил, пикриновая кислота, нитрогуанидин, пикрат аммония) со смешевыми ВВ равноценного им типа – амматол или аммонит. Данные для этих ВВ взяты из работ [5,6,7] и сведены в табл. 2.

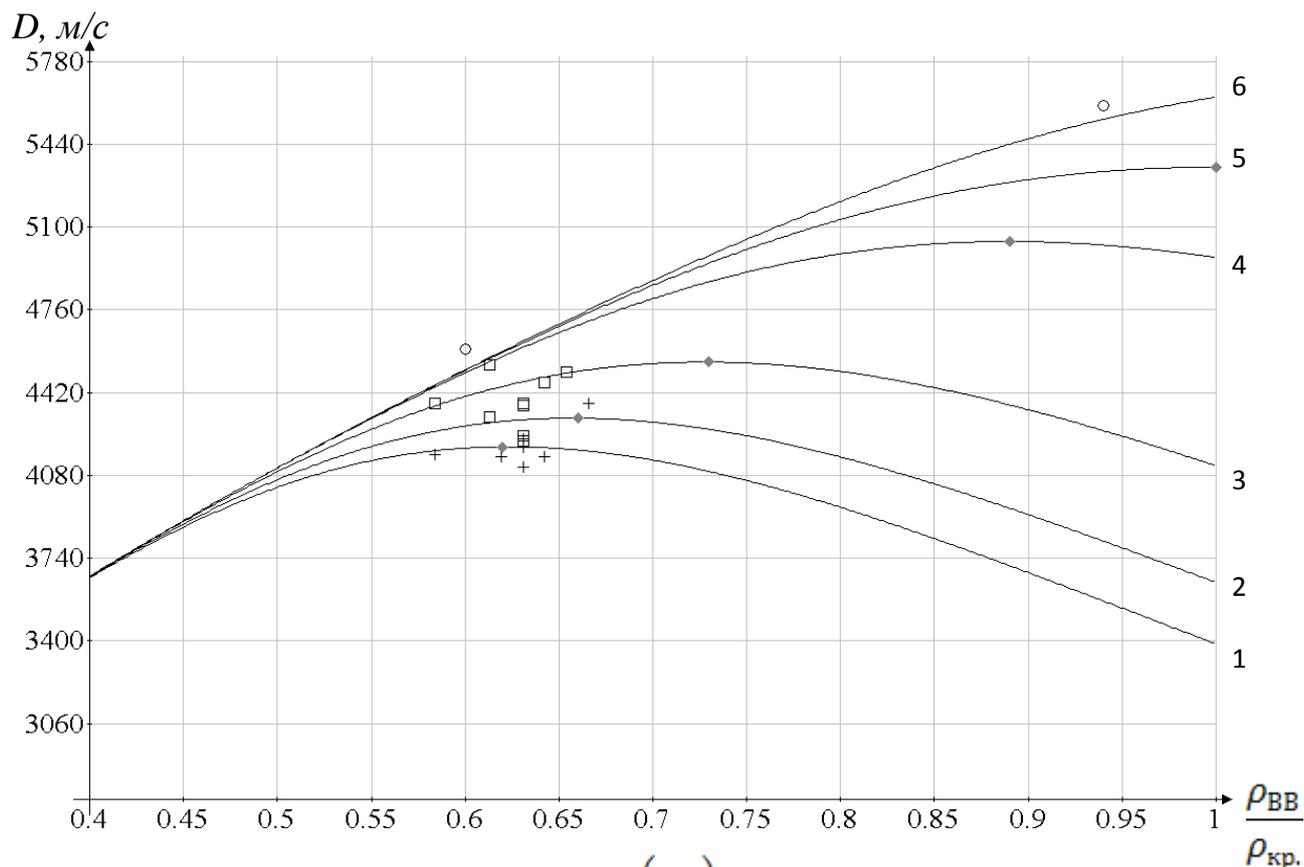


Рис. 1. Графики зависимости  $D = \varphi\left(\frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}}\right)$  для зарядов аммонита №6ЖВ:

1 – 32 мм; 2 – 36 мм; 3 – 45 мм; 4 – 70 мм; 5 – 90 мм; 6 – 120 мм.

В табл. 2 данные №8 и №9 скорости детонации аммонита №6ЖВ в стальных трубах с забойкой получены проф. И.А. Остроушко методом Дотриша [5]. По-видимому, величина скорости детонации для аммонита в трубах несколько завышена, но, тем не менее, неплохо согласуется со скоростью детонации амматола 50/50, так как оба ВВ имеют примерно равную детонационную теплоту взрыва, установленную экспериментально в работе [7].

Сравнение показывает, что наблюдается неплохое сходство параметров детонации смешевых ВВ при больших диаметрах заряда с идеальными режимами детонации индивидуальных. Вместе с тем, справедливо будет отметить, что идеальный режим детонации аммонита №6ЖВ осуществляется только то-

гда, когда ВВ помещено в прочную оболочку (стальную трубу с толщиной стенок 3 мм) и диаметр заряда составляет не менее 78..100 мм. У открытых зарядов аммонита №6ЖВ в бумажных оболочках диаметром 90..120 мм идеальный режим детонации недостижим, хотя на зависимости  $D = \varphi \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)$  отсутствует характерная точка, определяющая критическую плотность детонации. Реально достижимая скорость детонации данного ВВ в открытых зарядах составляют примерно 75% от идеальной скорости детонации.

Табл. 2. – Зависимость  $D = \varphi \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)$  и параметры идеального режима детонации ВВ

№ п/п	ВВ	Условия взрывания	Зависимость скорости детонации $D = \varphi \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)$	$D=D_{max}$ , при $\left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right) = 1$	Детонационная теплота взрыва ВВ, $Q_{ВВ}$ , кДж/кг	Источник информации
1	Тротил	Заряд в бум. обол.	$7127,4 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,7004}$	7127,4	4562,7	[5]
2	Пикриновая кислота	Заряд в бум. обол.	$7554,91 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,651}$	7554,91	4326,8	[6]
3	Пикрат аммония	Заряд в медн. трубе	$7342,58 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,7443}$	7342,58	–	[5]
4	Нитрогуанидин	Заряд в свинц. трубе	$8537,64 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,7862}$	8537,64	–	[5]
5	Амматол 50/50	Стекл. трубка	$7960,08 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,8483}$	7960,08	4309,4	[5], [7]
6	Аммонит №6ЖВ	Ø90 бум. обол.	$5495,7 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,36}$	5495,7	4081,0	[7]
7	--/--	Ø120 бум. обол.	$5719,06 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,45}$	5719,06	4081,0	[7]
8	--/--	Ø78 стальная труба толщ. ст. 3 мм	$8104,93 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{0,931}$	8104,93	4282,3	[7] Данные по скорости проф. И.А. Остроушко
9	--/--	Ø100 стальная труба толщ. ст. 3 мм	$8092,6 \left( \frac{\rho_{ВВ}}{\rho_{кр.}} \right)^{\frac{0,3231}{\rho_{ВВ}/\rho_{кр.}}}$	8092,6	4282,3	

**Вывод.** Для открытых зарядов аммонита №6ЖВ получена математическая модель, описывающая неидеальный режим скорости детонации ВВ в зарядах конечного диаметра в зависимости от плотности патронирования ВВ и его критического диаметра детонации. Аналитические исследования с помощью данной модели позволили установить критическую плотность аммонита в диаметрах зарядов 32..70 мм и то, что в диаметрах зарядов 90..120 мм критической плотности у данного ВВ нет. Тем не менее, идеального режима детонации аммонита №6ЖВ не удастся достичь даже в диаметре открытого заряда 120 мм. Единственное условие, при котором возможен идеальный режим детонации ВВ, является то, при котором патронирование аммонита осуществляется в прочные стальные оболочки диаметром не менее 78..100 мм.

### **Литература.**

1. Беляев А.Ф. Влияние физических факторов на устойчивость детонации аммиачно-селитренных взрывчатых веществ: Сб. Вопросы теории взрывчатых веществ / Беляев А.Ф. – М.-Л.: Изд-во Академии наук СССР, 1947.– С. 29-85.
2. Калякин С.А. Исследование режимов нестационарной детонации зарядов конечного диаметра и их зависимость от критического диаметра ВВ: Сб. Импульсная обработка материалов/Калякин С.А., Терентьева Е.В. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2005.– С. 75-82.
3. Гольбиндер А.И. Лабораторные работы по курсу: Теория взрывчатых веществ / Гольбиндер А.И. – М.:Госвузиздат, 1962.– 141 с.
4. Лабинский К.Н. Пути развития лабораторной базы для исследования быстропротекающих процессов: Сб. Современные проблемы шахтного и подземного строительства / Лабинский К.Н., Лабинский Н.Н. – Д.: Норд-Пресс, 2006.– С. 132-138.
5. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / Андреев К.К., Беляев А.И. – М.: Оборонгиз, 1960.–595 с.
6. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Дубнов Л.В., Бахаревич Н.С., Ромашов А.И. – М.: Недра, 1982.– 326 с.
7. Макгайр Р. Химия детонационных процессов: Диффузионные явления в неидеальных взрывчатых веществах: Сб. Детонация и взрывчатые вещества / Макгайр Р., Орнелъяс. Д. Акст И. – М.: Мир, 1981.– С. 161-169