

УДК 622.235.213

Меньшиков Павел Владимирович

младший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН,
620075, г. Екатеринбург,
ул. Мамина-Сибиряка, 58;
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Шеменив Валерий Геннадиевич

кандидат технических наук,
заведующий лабораторией
разрушения горных пород,
Институт горного дела УрО РАН
e-mail: rgp@igduran.ru

Синицын Виктор Александрович

кандидат технических наук,
старший научный сотрудник,
Институт горного дела УрО РАН

О ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ШИРИНЫ ЗОНЫ ХИМИЧЕСКОЙ РЕАКЦИИ НА ПРИМЕРЕ ЭМУЛЬСИОННОГО ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА «ФОРТИС»

Аннотация:

Основываясь на выводах гидродинамической теории детонации, можно рассчитать давление на фронте детонационной волны, показатель политропы, теплоту взрыва, время и ширину зоны химической реакции. В статье представлены подходы к определению ширины зоны химической реакции по уравнениям Харитона и Эйринга и проведен расчет ширины зоны химической реакции по принципу неопределенности в квантовой механике для эмульсионного ВВ «Фортис».

Ключевые слова: взрывчатые вещества, детонационная волна, ширина зоны химической реакции, скорость детонации, принцип неопределенности в квантовой механике, время химической реакции

Menshikov Pavel V.

junior researcher,
The Institute of mining UB RAS,
620075, Yekaterinburg, 58, Mamin-Sibiryak st.
e-mail: menshikovpv@mail.ru

Shemenyev Valery G.

candidate of technical sciences,
the head of the rocks break-down laboratory,
The Institute of mining UB RAS,
e-mail: rgp@igduran.ru

Sinitzin Victor A.

candidate of technical sciences,
senior researcher,
The Institute of mining UB RAS

ON THE ABILITY OF DETERMINATION THE WIDTH OF CHEMICAL REACTION ZONE, THE EMULSION EXPLOSIVE AGENT "PHORTIS" BEING AN EXAMPLE

Abstract:

Grounding on the conclusions of hydrodynamic detonation theory both the pressure in the detonation wave-front, the poly-tropic exponent, heat of explosion and the width of chemical reaction zone could be calculated. The approaches to determination the width of chemical reaction zone according to the Khariton and Eiring equations are presented. The width of chemical reaction zone calculation according to the uncertainty principle in the quantum mechanics for emulsion explosive agent "Phortis" is performed.

Key words: explosive agents, detonation wave, the width of chemical reaction zone, velocity of detonation, uncertainty principle in quantum mechanics, the time of chemical reaction

Детонация представляет собой самоподдерживающийся процесс перемещения по взрывчатому веществу (ВВ) ударного фронта со сверхзвуковой скоростью (скачка давления), сопровождающийся химическим превращением веществ.

Первая математическая модель детонационной волны в газах, опирающаяся на теорию ударных волн, в виде гидродинамической теории детонации была разработана одновременно В.А. Михельсоном, Д.Л. Чепменом и Е. Жуге. Эта модель не рассматривает кинетику химической реакции в детонационной волне, а представляет ударный фронт в виде поверхности разрыва, отделяющей исходное вещество от продуктов его химического превращения.

Развитие этой теории получило в работах Я.Б. Зельдовича, Д. Неймана и В. Дёринга, независимо предложивших модель детонационной волны, учитывающую физиче-

скую зону превращения исходного ВВ в конечные продукты взрыва. Согласно этой модели, при распространении детонации вдоль заряда ВВ вначале происходит его нагревание, а химические реакции происходят спустя определенное время. В ходе химических реакций выделяется тепло, которое приводит к дополнительному расширению газообразных продуктов взрыва и увеличению скорости их движения. Таким образом, зона химических реакций толкает ведущую ударную волну и обеспечивает ее устойчивость.

Для полного описания процесса детонации, помимо скорости детонации, необходимо также знать распределение скорости потока продуктов детонации на фронте волны во времени и время существования самой волны. Зная эти параметры, основываясь на выводах гидродинамической теории, можно рассчитать давление на фронте детонационной волны, показатель политропы, теплоту взрыва и определить во многих случаях время и ширину зоны химической реакции.

Согласно гидродинамической теории детонации, в точке Жуге скорость детонации D определяется по формуле [1]

$$D = U + C, \text{ м/с}, \quad (1)$$

где U – массовая скорость продуктов детонации на фронте процесса, м/с;

C – скорость звука в газообразных продуктах взрыва, которая определяется по формуле

$$C = \sqrt{\lambda RT}, \text{ м/с}, \quad (2)$$

где γ – показатель адиабаты, $\gamma = 1,4$ для газообразных продуктов взрыва;

R – удельная газовая постоянная, $R = 287$ Дж / кг·К;

T – температура газообразных продуктов взрыва, К.

Анализ скорости звука и скорости детонации позволяет установить некоторые закономерности их взаимосвязи. Разделив влияние упругой и тепловой составляющей давления и энергии на скорость распространения фронта, можно выразить ее через суммарный волноэнергетический фактор. Волновую составляющую данного фактора определяет скорость звука, а тепловую — энергосодержание в зоне химической реакции, определяющее массовую скорость.

Зависимость скорости распространения детонационной волны от скорости звука представляется в виде обобщенной ударной адиабаты [2]:

$$D = 1,2C + 1,7U, \text{ м/с}. \quad (3)$$

Следовательно, массовая скорость продуктов детонации будет равна

$$U = \frac{D - 1,2\sqrt{\gamma RT}}{1,7}, \text{ м/с}. \quad (4)$$

Показатель политропы можно определить из следующего выражения [2]:

$$n = \frac{D}{U} - 1. \quad (5)$$

Используя уравнение

$$D = \sqrt{2Q(n^2 - 1)}, \text{ м/с}, \quad (6)$$

можно определить теплоту взрыва Q :

$$Q = \frac{D^2}{2(n^2 - 1)}, \text{ Дж/кг}. \quad (7)$$

Уравнение Ландау-Зельдовича $P = A\rho^n$ имеет достаточно простой вид и с некоторыми допущениями описывает состояние газообразных продуктов детонации во всем диапазоне давлений расширяющихся продуктов детонации, поэтому оно использовано для вывода соотношений, определяющих параметры детонации.

Давление в детонационной волне определяется по формуле

$$P = \rho_0 D U, \text{ Па}, \quad (8)$$

где ρ_0 – плотность заряда ВВ, т/м³;

D – скорость детонации, м/с;

U – массовая скорость продуктов взрыва, м/с.

Ширина зоны химической реакции a определяется по следующей формуле:

$$a = C \tau, \quad (9)$$

где C – скорость звука в зоне химической реакции, м/с.

Для типичных твердых ВВ время и ширина зоны химической реакции находятся в диапазоне $\tau = 0,024 - 0,85$ мкс, $a = 0,13 - 2,5$ мм [1]. Параметры зон химической реакции [3, 4] для большинства промышленных ВВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры зон химической реакции

ВВ	Время химической реакции t , мкс	Ширина зоны химической реакции a , мм
ТНТ (прессованный с подплавлением) [3]	0,33	1,54
ТНТ (литой)	0,29	1,36
ТНТ (прессованный)	0,19	0,87
ТАТБ (Триаминотринитробензол) (США)	0,24 ÷ 0,31	1,18 ÷ 1,56
ТАТБ/инертный	0,21 ÷ 0,26	1,03 ÷ 1,24
Гексоген/ТНТ (50/50)	0,13	0,64
Гексоген/ТНТ (70/30)	0,08	0,44
Гексоген/ТНТ (90/10)	0,07	0,37
Октоген/инертный	0,06 ÷ 0,19	0,36 ÷ 0,80
Гексоген (агатиrowанный)	< 0,005	< 0,03
Гексоген	0,05 ÷ 0,07	0,28 ÷ 0,36
ТЭН (агатиrowанный)	< 0,005	< 0,03
ТЭН	0,08 ÷ 0,11	0,42 ÷ 0,52
Октоген	0,04 ÷ 0,06	0,25 ÷ 0,33
Гексоген/инертный 94/6	0,05	0,28
Зерногранулит 80/20 [4]	1,7	1,83
Гранулит АС-8	1,8	1,94

Ширину зоны химической реакции возможно определить по известному критическому диаметру заряда ВВ из соотношения Харитона [1] $d_{кр} \approx 2 C \tau$, согласно которому разлет реагирующего ВВ из зоны химической реакции представляет его расширение в боковой волне разряжения.

Соотношение Харитона не применяется для прямых оценок, но до сих пор используется в различных расчетных схемах по определению критического диаметра детонации и дает сильно заниженные значения критического диаметра в основном для жидких ВВ. Для выполнения этого соотношения скорость звука должна иметь нереально высокие значения [4].

Поэтому наибольшую известность получило уравнение Эйринга [4, 5]:

$$D/D_u = 1 - a/d, \quad (10)$$

где D_u – идеальная скорость детонации, м/с;

d – диаметр заряда, м.

Из уравнения (10) следует:

$$a = (1 - D/D_u)d = (1 - D_k/D_u)d_k, \quad (11)$$

где D_k – скорость детонации при критическом диаметре d_k , м/с.

Уравнение такого вида наиболее хорошо описывает экспериментальные данные, особенно в области больших диаметров заряда.

Согласно Э.Э. Лин [6], по принципу неопределенности в квантовой механике, если зону протекания химической реакции при детонации рассмотреть как зону возбуждения квантовой системы в когерентном состоянии, можно вычислить ширину зоны химической реакции, не связанную с кинематическими параметрами детонационной волны. В соответствии с аррениусовой кинетикой колебательно инициируемых реакций, время протекания химической реакции можно определить по формуле:

$$\tau = \tau_0 \exp(3n - 6), \text{ с}, \quad (12)$$

где $\tau_0 = 2\pi\hbar/k_B T$, м/с;

$\hbar$ – постоянная Планка, $\hbar = 1,054 \cdot 10^{-34}$ Дж·с;

k_B – постоянная Больцмана, $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/°К;

T – температура взрыва, °К;

n – число атомов в нелинейной многоатомной молекуле; $n = 7$ при взрывном разложении NH_4NO_3 при температуре взрыва > 1000 °К.

Ширина зоны химической реакции определяется по формуле (9).

Для расчета детонационных характеристик и ширины зоны химической реакции были приняты значения скорости детонации эмульсионного ВВ «Фортис 70, 85 и 100» при разной плотности ВВ от 1,1 до 1,25 т/м³, в скважинах диаметром от 192 до 250 мм, полученные с помощью измерительных приборов VODMate, SpeedVOD и DataTrap II Data/VOD Recorder при проведении научно-исследовательских работ на карьерах предприятия ООО «Орика-УГМК» с 2010 по 2014 гг. Результаты расчета времени и ширины зоны химической реакции эмульсионного ВВ «Фортис 70, 85 и 100» по принципу неопределенности в квантовой механике представлены в табл. 2.

Выводы

В результате проведенных расчетов детонационных характеристик для эмульсионного ВВ «Фортис 70, 85 и 100», время и ширина зоны химической реакции находятся в диапазонах: $\tau = 0,018 - 0,032$ мкс, $a = 0,034 - 0,044$ мм. Полученные значения ширины зоны химической реакции ниже предела параметров зон химической реакции для большинства промышленных ВВ.

Для «Фортис 70» время и ширина зоны химической реакции составили: $\tau = 0,02 - 0,028$ мкс, $a = 0,036 - 0,042$ мм; для «Фортис 85» – $\tau = 0,02 - 0,032$ мкс, $a = 0,036 - 0,044$ мм; для «Фортис 100» – $\tau = 0,018 - 0,022$ мкс, $a = 0,034 - 0,037$ мм. Размеры ширины зоны химической реакции «Фортис 70» немного больше ширины зоны химической реакции «Фортис 100» предположительно из-за сухой фазы аммиачной селитры в составе ЭВВ «Фортис 70». Но в целом размеры ширины зоны химической реакции примерно схожи с параметрами зон химической реакции агатированного ТЭН и гексогена.

Возможно также определить ширину зоны химической реакции по соотношениям Харитона и Эйринга, но для этого необходимо знать критический диаметр заряда, идеальную скорость детонации и скорость детонации ВВ при критическом диаметре. Также появляется возможность решения обратной задачи: зная ширину зоны химической реакции, возможно определить критический диаметр заряда.

Таблица 2

Результаты расчета основных детонационных характеристик эмульсионного ВВ «Фортис»

Тип ВВ	Плот- ность ВВ ρ , т/м ³	Диаметр заряда d , мм	Скорость детонации D , м/с	Температура взрыва T , К	Детона- ционное давление P , ГПа	Скорость звука C , м/с	Показа- тель политро- пы n	Теплота взрыва Q , МДж/кг	Массовая скорость продуктов взрыва U , м/с	Время хими- ческой реакции τ , мкс	Ширина зоны хими- ческой реакции a , мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
«Фортис 70» (ЭМ – 70%, АС – 30%, ГГД < 1%, ДТ < 5%)	1,15	250	5355	7307	22,40	1710	1,76	6,88	1943	0,021	0,037
		216	4820	6468	17,76	1608	1,83	4,91	1700	0,024	0,039
			4281	5623	13,66	1500	1,93	3,35	1460	0,028	0,042
		194	5630	7739	25,00	1759	1,72	8,10	2070	0,020	0,036
			5444	7447	23,22	1726	1,74	7,26	1984	0,021	0,036
			5475	7496	23,52	1732	1,74	7,39	1998	0,021	0,036
			5671	7803	25,40	1767	1,72	8,28	2089	0,020	0,036
«Фортис 85» (ЭМ – 85%, АС – 15%, ГГД < 1%, ДТ < 5%)	250	5337	7279	22,23	1706	1,76	6,81	1935	0,022	0,037	
	194	5667	7797	25,37	1766	1,72	8,27	2087	0,020	0,036	
		3868	4975	10,90	1411	2,02	2,42	1280	0,032	0,044	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
«Фортис 100» (ЭМ – 100%, ГГД < 1%, ДТ < 5%)	1,1	250	6080	8445	28,31	1838	1,67	10,38	2279	0,019	0,034
		245	4940	6656	17,93	1632	1,82	5,30	1754	0,024	0,038
«Фортис 100» (ЭМ – 100%, ГГД < 1%, ДТ < 5%)	1,1	216	5520	7566	22,90	1740	1,73	7,59	2019	0,021	0,036
			5390	7362	21,73	1716	1,75	7,03	1959	0,021	0,037
	1,15	240	5627	7734	24,97	1759	1,72	8,08	2068	0,020	0,036
			5544	7604	24,17	1744	1,73	7,70	2030	0,021	0,036
		235	5686	7827	25,55	1769	1,71	8,36	2096	0,020	0,035
		197	5781	7976	26,50	1786	1,70	8,82	2140	0,020	0,035
		194	5387	7357	22,69	1716	1,75	7,01	1958	0,021	0,037
			6168	8583	30,54	1853	1,66	10,87	2320	0,018	0,034
			5885	8139	27,56	1804	1,69	9,34	2188	0,019	0,035
			5646	7764	25,16	1762	1,72	8,17	2077	0,020	0,036
		192	5942	8233	28,18	1815	1,68	9,62	2216	0,019	0,035
	1,2	250	6108	8489	31,20	1843	1,66	10,53	2292	0,018	0,034
		194	5925	8201	29,18	1811	1,68	9,55	2207	0,019	0,035
	1,25	216	5518	7563	26,00	1739	1,73	7,59	2018	0,021	0,036
			5293	7210	23,73	1698	1,76	6,63	1915	0,022	0,037
			5468	7485	25,49	1730	1,74	7,37	1995	0,021	0,036

В настоящее время не получено каких-либо новых методов более точного расчета ширины зоны химической реакции детонационной волны как по соотношениям Харитона и Эйринга, так и по уравнению Лина, основанному на принципе неопределенности в квантовой механике. Хотя приведенные в статье методы расчета дают приблизительную оценку размера ширины зоны химической реакции детонационной волны, но они позволяют в расчетах учитывать скорость детонации, плотность ВВ, диаметр заряда, температуру взрыва, критический диаметр и оценивать время и ширину зоны химической реакции для большинства промышленных ВВ.

Литература

1. Физика взрыва / под ред. Л. П. Орленко. - М.: Физматлит, 2002. - Т.1. - 832 с.
2. Определение и расчет параметров детонации зарядов ВВ: отчет по лабораторным работам / СГТУ. - Самара, 2001. - 25 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://referat.ru/referat/opredelenie-parametrov-detonacii-zaryada-vv-5166>
3. Лобойко Б.Г. Зоны реакции детонирующих твердых взрывчатых веществ / Б.Г. Лобойко, С.Н. Любятинский // Физика горения и взрыва. – 2000. - Т. 36. - № 6.
4. Лавров В.В. О возможности определения размеров зоны детонационной волны косвенными методами / В.В. Лавров; Институт проблем химической физики РАН, г. Черноголовка, 2013 г. [Электронный ресурс] – Режим доступа: (http://conf.nsc.ru/explosion/ru/scientific_program)
5. Митрофанов В.В. Теория детонации / В.В. Митрофанов. – Новосибирск: Изд-во Новосибирского гос. ун-та, 1982. – 92 с.
6. Лин Э.Э. Определение ширины детонационной зоны на основе принципа неопределенности / Э.Э. Лин. - ПЖТФ. - 2011. – Т. 37. - Вып. 10.