

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСИРУЮЩИХ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ВЗРЫВЕ

Наведено результати експериментальних досліджень випромінювання вибуху в дисперсних промислових вибухових речовинах. Виявлені пульсуючі режими динамічних процесів, виконана оцінка частоти пульсацій і встановлено їхній взаємозв'язок з фрактальною розмірністю.

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ERADIATION OF PULSED DYNAMIC PROCESSES IN A TIME OF EXPLOSION

The results of experimental investigations eradiation of explosion in a dispersion industrial explosives was brong. The pulsed regimes of dynamical processes was defined, the estimation frequent of pulsation was executed and its correlation with fractal dimension was placed.

Основным источником сведений о процессах, происходящих при высоких давлениях и температурах во взрывчатых веществах, является их излучение. Для его регистрации применяют оптические методы исследования с помощью высокоскоростной фоторегистрирующей аппаратуры. Однако, как правило, основными параметрами, измеряемыми с его помощью, является скорость процесса. Остальные параметры пересчитываются [1].

Однако, в настоящее время экспериментально доказано отсутствие гладкого детонационного фронта в газах и некоторых жидких ВВ: химические превращения происходят сложной многофронтной волной, что обеспечивает резкое снижение задержек воспламенения. Поток в середине детонационного фронта имеет турбулентный характер.

Неустойчивость плоских детонационных волн является причиной возникновения сильных поперечных возмущений и появления спиновых режимов распространения детонационных волн.

Если условия детонации меняются в сторону удаленности от граничных, происходит переход к многоголовой пульсирующей детонации. Поперечные волны и связанные с ними пульсации фронта рожают волновые пульсации и турбулентность в продуктах детонации, которые затухают лишь на больших расстояниях от фронта [2].

Для жидких ВВ исследованы только пульсирующие режимы [3]. Спиновая детонация для этого класса ВВ не обнаружена [4].

Для взрывчатых веществ гомогенных высокобризантных, литых, т.е. обладающих однородной структурой и имеющих высокую плотность, хорошо применима гидродинамическая теория детонации по двум причинам: неоднородности структуры твердых гетерогенных ВВ практически больше, чем неоднородности, связанные с устойчивостью плоского фронта детонации, поэтому газодинамические неоднородности здесь не проявляются; ширина зоны химической реакции намного меньше размеров заряда. Поэтому основной проблемой было установление уравнения состояния продуктов взрыва. Остальные данные для расчета определяются на основании законов сохранения и правила отбора Чеп-

мена-Жуге. Это с достаточной точностью совпадало с экспериментальными данными.

Появление на взрывных работах нового класса промышленных ВВ, имеющих низкую насыпную плотность и гранулированную структуру, а также смешевых составов, как холодного, так и горячего смешения, явилось основанием для пересмотра изложенного применительно к детонационным процессам в этих средах.

Сама среда представляет собой неоднородную по составу и химическим свойствам структуру. Поэтому и распространение динамических процессов в ней отличается неравновесным характером. Для объяснения отличий детонационных процессов в таких ВВ от монокристаллических и прессованных ВВ А.Я. Апин [5] выдвинул теорию струйчато-пробивного механизма детонации, согласно которой фронт детонации состоит из кумулятивных струй, образующихся вследствие неоднородности структуры и которые поджигают ее в отдельных очагах. Этот принцип отличен от гидродинамической теории, где ведущую роль играет ударная волна. Известны также данные экспериментов, которые полностью выпадают из поля зрения гидродинамической теории и теории струйчато-пробивного механизма. Авторы [6, 2, 7, 8, 9] наблюдали сложность процессов при распространении динамических волн в крупнодисперсных средах, для которых характерна волнистая структура фронта и полосатая структура послесвечения, что позволило авторам [2] связать такую структуру свечения со спиновыми процессами с частотой от 120 кГц до 1 МГц.

Нами применен новый подход к изучению явлений, сопровождающих взрывчатое превращение крупнодисперсных ВВ.

С помощью экспериментальной установки СФР-2М получали фоторегистрограммы процессов, сопровождающих распространение детонационной волны и продуктов взрыва при детонации. Изучали различные типы промышленных ВВ гранулированной, прессованной, литой структуры, а также детонацию в заряде, состоящем из крупных кусков. Ряд исследований проведен в смесях ВВ различного состава.

На полученных фоторегистрограммах изображение, соответствующее перемещающейся по заряду детонационной волне, имеет волнистую структуру.

При изменении физико-химических характеристик ВВ, как-то: заполнение межгранульного пространства водой, на типичных фоторегистрограммах взрыва таких зарядов фиксируется изменение характера детонационного процесса, выражающееся в увеличении его скорости и частоты пульсаций. При тех же характеристиках ВВ (насыпная плотность 0,95, размер гранул 0,5-3 мм и диаметр заряда - 0,15 м) развертка свечения представляет собой практически идеальную прямую линию. Однако, при внимательном рассмотрении видим, что как и в первых двух случаях процесс пульсирующий, т.к. прямая состоит из серии последовательных вспышек.

Заполнение межгранульного пространства различными типами жидких наполнителей (раствор аммиачной селитры, бензин, растворы солей), приводят к росту скорости процесса или его снижению, но обязательно к изменению частоты пульсаций на один-два порядка, а, следовательно, механизма взрывчатого

превращения и внешней картины свечения, сопровождающего химическое превращение ВВ.

Изучение тонкой структуры детонационного свечения производили, используя фоторегистрограммы с различной степенью увеличения отдельных кадров или общей картины свечения. Увеличенные снимки отдельных фрагментов фоторегистрограмм позволяют более детально рассмотреть движение передних и задних фронтов детонационной волны, а также шлейф послесвечения – газов взрыва. Каждая пульсация – это сложный процесс, отличающийся неравновесной динамикой и имеющая свою картину в фазовой плоскости ($V-t$). При общих оценках можно говорить лишь о тенденции процесса, а именно, при росте скорости переднего фронта детонационной волны наблюдается снижение почти до нуля скорости заднего фронта, а при снижении скорости переднего фронта наблюдаем рост скорости заднего фронта, т.е. процессы идут практически в противофазе. Полученные при большом увеличении данные отражают, как уже упоминалось, неравновесный характер процесса, который характеризуется разрывом непрерывности свечения, т.е. функция $V = f(t)$ будет иметь несколько разрывов.

Исходя из сказанного, можно лишь примерно, оценить данные о частоте пульсации и их периоде.

Подтверждением этого может служить изменение не только частоты пульсации, но и скоростных характеристик, а также линейности процесса при заполнении межгранульного пространства водой. При малых масштабах детонационный фронт на фоторегистрограммах представляет собой четко вырисованную. линию, на которой отсутствуют пульсации, а тем более разрывы свечения, что свидетельствует об устойчивости процесса и возможности оценки его параметров с высокой степенью точности. Однако, увеличение фоторегистрограммы позволяет увидеть процесс по иному. Интенсивность свечения, сопровождающего взрыв водонаполненного гранулозола, имеет также пульсирующий характер. Однако, частота этих пульсаций превосходит частоту пульсаций сухого гранулозола на один или несколько порядков.

С каждой новой ступенью увеличения обнаруживаются новые и новые детали на кривой зависимости $V = f(t)$. И, кроме того, увеличивается общее число регистрируемых пульсаций, а, соответственно, их частота.

В таблице 1 приведены данные о зависимости частоты пульсаций от масштаба измерений.

Такое поведение присуще фрактальным процессам, при которых каждая увеличенная структура позволяет различить новые и новые более мелкие подобию.

Подробный анализ и исследования кривых зависимости интенсивности излучения от времени с помощью R/S -анализа позволил также установить фрактальность этих процессов и определить фрактальную размерность [10].

Для этого фоторегистрограммы фотометрировали с помощью фотометра ИФО-451. Данные фотометрирования представили собой серии временных рядов, напоминающие функции Вейерштрасса-Мандельброта, т.е. функция

непрерывна, но не дифференцируема ни в одной точке. Такие функции, как правило, обладают фрактальными свойствами.

Таблица 1 – Зависимость частоты пульсаций детонационного фронта от масштаба измерений

Параметры. Тип ВВ	Масштаб	Период пульсаций, T , с	Частота пульсаций, Гц	Примечание
Гранупотол Сухой	1:1	$0,12 \cdot 10^{-4}$	$0,9 \cdot 10^{-5}$	
	1:2	10^{-5}	10^5	
	1:5	$0,45 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^5$	
Гранупотол обводненный	1:1	$0,21 \cdot 10^{-5}$	$8,25 \cdot 10^5$	Данные получены по фрагменту регистрограммы
	1:2	$3,09 \cdot 10^{-6}$	$1,1 \cdot 10^6$	
	1:5	$2,0 \cdot 10^{-6}$	$0,32 \cdot 10^6$	
	1:200	$0,95 \cdot 10^{-6}$	$0,5 \cdot 10^6$	

Временной ряд, полученный при фотометрировании фоторегистрограмм кривой детонационного свечения напоминает фрактальную функцию Вейерштрасса - Мандельброта;

$$W = \sum_{N=-\infty}^{+\infty} \frac{(1-e^{ibt}) \cdot e^{i\varphi n}}{b^{(2-D)n}}$$

Принято считать, что эта функция фрактальна с размерностью D .

Доказано, что фрактальная размерность $D(W_\epsilon)$ функции Вейерштрасса-Мандельброта заключена в пределах

$$D - (B/\epsilon) \leq D(W_\epsilon) \leq D$$

При малых значениях D функция по существу гладкая, но когда $D \rightarrow 2$ начинает сильно флуктуировать и напоминает шум в электронных цепях [11].

Из сравнения этих данных с полученными нами следует ожидать, что кривая, отражающая процессы свечения при распространении детонационной волны, носит фрактальный характер.

Фрактальность кривой оценивали, используя методики, приведенные в работах [11,12]. Размерность по покрытию графика клетками шириной b_t вдоль оси времени и длиной b_a вдоль пространственной сетки координат (самая малая клетка имеет размерность $(t \times a)$ определяется выражением:

$$N(\epsilon; a, t) \sim \epsilon^{-Dn}$$

где $N(\epsilon; a, t)$ - число клеток, необходимое для покрытия кривой.

Используя целочисленное значение времени, для высоты покрытия использовали меньшую величину: $a = 0,0001$.

Полученные временные ряды исследовали также с применением метода нормированного размаха или метода Херста [11].

Как обнаружил Херст для многих временных рядов величина t , так называемый временной размах, хорошо описывается соотношением:

$$R/S = (\tau/2)^H,$$

где R - разность между максимальным и минимальным значениями функции; t - длительность рассматриваемого промежутка времени; S - стандартное отклонение или квадратный корень из дисперсии. Размах R определяется из выражения:

$$R(t) = \max X(t, \tau) - \min X(t, \tau),$$

где $\max X(t, \tau)$ и $\min X(t, \tau)$ максимальное и минимальное отклонение функции соответственно.

Если кривая фрактальна, то выполняется соотношение: $D_f = 2-H$, где D_f - фрактальная размерность кривой.

Для случайного процесса с независимыми значениями и конечной дисперсией: $R/S = (\pi\tau/2)^{1/2}$.

Если зависимость $\ln(R/S)$ от $\ln(\tau/2)$ есть прямая линия, то показатель Херста можно определить как угловой коэффициент этого графика. Для определения значения H разработана специальная программа.

По изложенной методике исследовали числовые ряды, представляющие собой экспериментально измеренные значения плотности почернения фотопленки, пропорциональные интенсивности излучения, вызываемого изменением интенсивности излучения взрывного процесса при его распространении вдоль образующей цилиндрических зарядов ВВ.

В таблице 2 приведены значения фрактальных размерностей для различных типов гранулированных ВВ

Таблица 2 – Значения фрактальных размерностей для различных типов гранулированных ВВ

Тип ВВ	Гранулотол сухой	Гранулотол водонаполненный	Граммонит 30/70	Граммонит 70/30	Граммонит 79/21
Фрактальная размерность	1,2-1,35	1,7-1,9	1,35	1,25	1,2-1,3

Хорошо коррелирует показатель фрактальной размерности с частотой пульсации: чем больше частота пульсаций, тем больше фрактальная размерность. Частота пульсаций, в свою очередь, связана со степенью однородности исходного материала. Однородностью и плотностью заполнения определяется механизм химических реакций. Ведущая роль в механизме однородных ВВ принадлежит ударной волне, а в неоднородных предлагаются различные механизмы: очаговый и струйчато-пробивной.

Частота пульсаций, как показали дальнейшие измерения, зависит от типа ВВ, полноты и характера заполнения межгранульного пространства, например, водой.

В таблице 3 приведены данные о периоде и частоте пульсаций для различных типов ВВ в сухом и водонаполненном состоянии.

Таблица 3 – Частота пульсаций при распространении детонации по цилиндрическому заряду ВВ

Тип ВВ. Параметры	Грануло- тол	Граммонит 30/70	Граммонит 50/50	Граммонит 70/30	Граммонит 79/21
Сухие ВВ					
Период пульсации, с	$0,12 \cdot 10^{-4}$	$0,75 \cdot 10^{-4}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-4}$	
Частота пульсаций, Гц	90	133,0	127,0	65,0	82,8
Водонаполненные ВВ					
Период пульсаций, с	$0,212 \cdot 10^{-5}$ $0,9 \cdot 10^{-6}$	$0,2 \cdot 10^{-5}$ $0,14 \cdot 10^{-5}$	$0,3 \cdot 10^{-5}$ $0,2 \cdot 10^{-5}$	$0,3 \cdot 10^{-5}$ $0,25 \cdot 10^{-5}$	$0,32 \cdot 10^{-5}$ $0,28 \cdot 10^{-5}$
Частота пульсаций, Гц	825-1100	500-700	300-500	330-400	330-350

Из данных таблицы не следуют закономерные зависимости частоты пульсаций от соотношения тротила и аммиачной селитры в заряде, однако, четко видна зависимость частоты пульсаций от типа наполнителя.

В связи с указанным, промышленные ВВ по своим взрывчатым свойствам, определяемым механизмом реакции, следует разделить на классы в зависимости от степени заполнения межгранульного (или порового) пространства.

Поскольку основное влияние на механизм детонации в системе оказывает вода, оценим количественную величину этого влияния, введя для этого понятие гидродинамического коэффициента, который численно равен отношению массы воды к массе взрывчатого вещества в единице объема:

$$K = \frac{m_{H_2O}}{m_{ВВ}} = \frac{\rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O}}{\rho_{ВВ} \cdot V_{ВВ}},$$

где ρ_{H_2O} - плотность воды; V_{H_2O} - объемная доля воды во взрывчатом веществе; $\rho_{ВВ}$ - плотность гранул ВВ; $V_{ВВ}$ - объемная доля ВВ.

В таблице 4 приведены результаты этой оценки.

Расчеты и экспериментальные данные показывают, что при изменении гидродинамического коэффициента в пределах $0,19 \leq K \leq 0,34$ – режим детонации может быть описан гидродинамическими законами, а при величине K , изменяющейся в пределах $0 \leq K \leq 0,19$, механизм меняется на очаговый (или струйчато-пробивной), характеризующийся пульсирующим режимом.

Незначительное влияние начальных условий меняет режимы химических реакций.

Реальные условия еще больше усложняют процессы, например, в присутствии инертных частиц в заряде режимы детонации не только меняют свой характер (механизм), но и оказываются на грани устойчивости.

Таблица 4 – Влияние количества воды в заряде гранулолола на режим детонации

№№ опы-та	$\rho_{ВВ}$, 10^{-3} кг/м ³	$V_{порВВ}$	$V_{ВВ}$	ρ_{H_2O} , 10^{-3} кг/м ³	$V_{H_2O}, \%$	D , м/с	K	Механизм детонации
1	1,6	0,35	0,65	1	35	5500	0,34	Гидродинамический
2	1,6	0,35	0,65	1	20	5400	0,19	Гидродинамический
3	1,6	0,35	0,65	1	10	4900	0,09	Пульсирующий
4	1,6	0,35	0,65	1	6,5	4800	0,04	Пульсирующий
5	1,6	0,35	0,65	1	0	4500	0	Пульсирующий

(Обозначения в таблице аналогичны формуле 1).

Исследования показали также, что изучаемые процессы очень чувствительны к первоначальным условиям, отличаются неоднородностью.

В связи с этим такие системы должны описываться нелинейными уравнениями, что требует нового подхода, учитывающего фундаментальные достижения статистической физики, неравновесность явлений и их фрактальность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва / Т.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. – М.: Наука, 1975.- 704 с.
2. Пульсуюча і спінова детонація вибухових речовин / О.О. Вовк, В.І. Плужник, Г.І. Чорний и др. // Вісник АН УРСР. – № 4. – 1979. – С. 18-23.
3. Дремін А.Н. Пульсуючий детонаційний фронт // ФГВ. – 1983. – № 4. - Т.19. - С. 159-169.
3. Детонаційні хвилі в конденсованих середовищах / А.Н. Дремін, С.Д. Савров, В.С. Трофімов, К.К. Шведов. – М.: Наука, 1970. - 161 с.
4. Дремін А.Н.. Механізм детонації рідких вибухових систем // Взривне дело. – М.: Недра, 1963, №52/9. - С. 25-39.
5. Апин А.Я. О детонації і вибуховому горінні вибухових речовин // ДАН СРСР. – 1945. – 50. - С. 285-288.
6. Некоторые особенности детонации гранулированных ВВ / М.Т. Друкованый, В.М. Комир, В.П. Билоконь и др. // Взрывное дело. – № 70/27. - М.: Недра, 1971. – С. 5-9.
7. Шведов К.К., Дремін А.Н. Пульсуючі по довжині заряду вибухові процеси в пористих ВВ // ФГВ. – 1985. – № 6. - Т. 21. - С. 123-125.
8. Ершов А.П., Куперштох А.И. Описание фрактальных структур при взрыве // Письма в ЖТФ. – 1990. – №3. - Т. 16. – С. 42-46.
9. Федров А.В., Меньших А.А., Ягодин Н.Б. Структура детонационного фронта в гетерогенных ВВ // Хим. физ. – 1999. – 18. – № 11. - С. 64-68.
10. Об устойчивости динамических процессов в активных дисперсных средах / А.Ф. Булат, В.В. Репка, С.В. Бондарева и др. // Дисперсные системы: Тез. докл. XVII конференции стран СНГ. – Одесса. – 1996. – С. 34-35.
11. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991 - 254 с.
12. Мун. Ф. Хаотические колебания. - М.: Мир, 1990 -312 с.