

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК И ДИСПЕРСНОСТИ КРИСТАЛЛОВ ОКТОГЕНА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССА ЕГО ГОРЕНИЯ

Е.В. Халдеев, С.Н. Баранов, Д.А. Пронин, Ю.М. Сустаева, О.В. Шевлягин

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

Введение

При разработке изделий, содержащих ВВ, одной из основных задач является обеспечение уровня пожаровзрывобезопасности конструкции, который во многом определяется характеристиками процесса перехода горения ВВ во взрыв.

Для исследования процесса горения ВВ и определения условий перехода его послойного горения во взрыв в ИФВ используется метод возрастающего давления [1]. Метод основан на регистрации давления газообразных продуктов, образующихся при сгорании заряда из ВВ в камере постоянного объема (манометрической бомбе) до ее разгерметизации в результате разрушения. С учетом степени разрушения бомбы дается заключение о характере протекания взрывного процесса в ВВ. Данный метод позволяет исследовать влияние различных факторов на развитие горения изделий с ВВ, в которых могут быть конструкционные зазоры между деталями из ВВ [1], [2].

При исследовании процесса развития горения различных ВВ [2], показано, что горение зарядов из ряда ВВ со щелевыми зазорами при низкой пористости (не более 1 %) в манометрической бомбе до давлений 60 МПа, может, как переходить во взрыв, так и происходить с высокой скоростью нарастания давления без перехода их горения во взрыв. Переход горения зарядов из ВВ во взрыв в основном имел место в зарядах с высоким содержанием (более 90 %) мощного взрывчатого наполнителя – октоген. Вместе с этим, в опыте с ВВ, имеющим в своем составе высокое содержание октогена (~ 97%) и инертные добавки из полиметилакрилата и оксизина, была зарегистрирована более низкая скорость нарастания давления относительно других ВВ на основе октогена и отсутствие перехода горения во взрыв. На такой результат могло повлиять наличие в данном ВВ инертных добавок полиметилакрилата и оксизина, а также свойств (дисперсность, дефектность кристаллов) взрывчатого наполнителя - октогена.

В связи с этим в рамках поиска способов снижения интенсивности развития процесса горения взрывчатых составов на основе октогена предложено проведение исследований по изучению развития горения ВВ на основе октогена с различной дисперсностью кристаллов, как без добавления, так и с добавлением инертных веществ полиметилакрилата и (или) оксизина.

Целью настоящей работы является исследование факторов, которые могут оказывать влияние на интенсивность развития процесса горения ВВ на основе октогена и на основании полученных результатов рекомендовать способы снижения интенсивности горения ВВ на его основе.

При изучении возможности снижения интенсивности развития процесса горения ВВ на основе октогена проведено:

1) исследование развития процесса горения октогена, имеющего разную дисперсность ($S_{уд}$ – от 300 – 400 см²/г до 1400 – 1900 см²/г) кристаллов;

2) исследование развития процесса горения октогена с добавлением инертных веществ полиметилакрилата и (или) оксизина.

1 Метод исследования перехода процесса горения во взрыв

1.1 Конструкция экспериментальной сборки

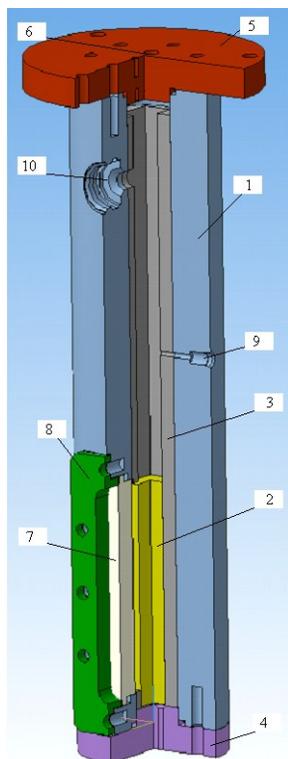
В данной работе для проведения экспериментов использована манометрическая бомба с зарядом из ВВ (см. рисунок 1), имеющим щелевой зазор 0,5 мм.

Манометрическая бомба представляет собой толстостенный цилиндр – корпус 1 из высокопрочной термически обработанной стали. Исследуемое взрывчатое вещество 2, располагается во вкладыше 3, который размещается в канале бомбы. Канал бомбы с обоих концов

герметически закрывается крышками 4, 5. Штуцер для крепления датчика давления присоединяется к бомбе через отверстие 9.

Предохранительная мембрана 10 состоит из свинцовых пластин. Верхняя крышка имеет ввод для электрического провода к воспламенителю 6 (спираль накаливания из нихрома) [2].

Для проведения экспериментов по исследованию процесса развития горения ВВ на основе октогена заряды из ВВ собирались из четырех одинаковых по размерам и форме деталей из ВВ $10 \times 15 \times 150$ мм, по аналогии с работой [1], где исследовалось развитие горение в единичной поре. Предварительно детали попарно склеивались эпоксидным клеем, а затем объединялись в заряд размером $20 \times 30 \times 150$ мм со щелевым зазором 0,5 мм (см. рисунок 2). Коэффициент заряжания при испытании заряда в бомбе составлял 0,37.



- 1 – корпус;
- 2 – заряд из ВВ;
- 3 – вкладыш (2 шт.);
- 4 – дно;
- 5 – крышка;
- 6 – ввод для воспламенителя;
- 7 – окно из оргстекла;
- 8 – прижим;
- 9 – отверстие для крепления датчика давления;
- 10 – предохранительная мембрана

Рисунок 1. Схема экспериментальной сборки (манометрическая бомба с зарядом из ВВ)

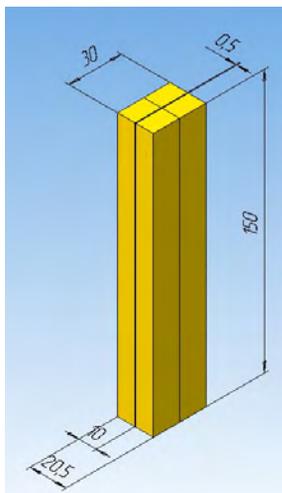


Рисунок 2. Эскиз заряда из ВВ с зазором

Регистрация давления проводилась с помощью системы измерения, в которой использованы датчики давления WIKA, имеющие погрешность $\pm 0,8\%$, быстродействие 1 мс и цифровые осциллографы, имеющие погрешность измерения напряжения $\pm 2\%$. Погрешность системы измерения составляет $\sim 3\%$ в диапазоне измерения давления 0 - 60 МПа [2].

Запуск измерительной аппаратуры СИ осуществлялся с момента подачи напряжения на спираль накаливания.

1.2 Алгоритм обработки полученных результатов

Полученные осциллограммы с датчика давления в виде функции напряжения от времени пересчитывали по калибровочным данным в зависимость давления от времени.

Для всех исследованных ВВ изменение давления в бомбе от времени аппроксимировали зависимостью вида:

$$P(t) = \exp(Bt + C), \quad (1)$$

где коэффициент B в выражении (1) характеризует скорость нарастания давления при горении ВВ в бомбе [2].

Заключение о характере завершающей стадии процесса в манометрической бомбе принимали по состоянию её корпуса [1]:

1) разрушение смотрового окна и отрыв нижней крышки бомбы – свидетельствовало о разгерметизации бомбы, вследствие превышения давления, выдерживающего прочность ее конструкции, и отсутствии детонационных режимов в ВВ, назовём его – состояние I;

2) разрушение бомбы на крупные куски (площадь поверхности куска $S > 20 \text{ см}^2$) указывало на наличие перехода конвективного горения в низкоскоростное взрывчатое превращение (низкоскоростную детонацию) – состояние II;

3) разрушение бомбы на мелкие куски (площадь поверхности куска $S < 20 \text{ см}^2$), наличие бризантного следа на внутренних вкладышах манометрической бомбы свидетельствовало о наличии перехода конвективного горения в стационарную детонацию – состояние III.

2 Изучение возможности снижения интенсивности развития процесса горения ВВ на основе октогена

2.1 Исследование развития процесса горения зарядов из октогена различной дисперсности

Целью данного исследования являлось определение влияния дисперсности октогена без добавления в его состав флегматизаторов. В качестве объекта исследования выбран низкодисперсный октоген (нд) с удельной поверхностью $S_{уд} = 300 - 400 \text{ см}^2/\text{г}$ и высокодисперсный октоген (вд) с $S_{уд} = 1400 - 1900 \text{ см}^2/\text{г}$. Для увеличения прочности деталей из ВВ в октоген с различной дисперсностью было добавлено 1,5 % фторопласта.

В соответствии со схемой опытов (см. рисунок 1) проведено исследование горения зарядов из октогена различной дисперсности. Исследование горения зарядов из октогена проводили с использованием деталей, отпрессованных по технологии, обеспечивающей минимальную пористость – не более 1 %. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из октогена различной дисперсности представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из ВВ октогена различной дисперсности

Δ , мм	ВВ	ρ , г/см ³	Параметры горения			Результаты опытов	
			$P_{кр}$, МПа	B	Остаток ВВ, %	Состояние бомбы	Процесс горения
0,5	Октоген нд	1,87	0,4	515	нет	II	переход ПГ в КГ, взрыв
	Октоген вд	1,86	0,5	210	5	I	переход ПГ в КГ, взрыва нет

Примечание: Δ - величина зазора в заряде ВВ; ρ – плотность деталей из ВВ; $P_{кр}$ – критическое давление; B – показатель скорости нарастания давления; II - разрушение бомбы на крупные куски (низкоскоростное взрывчатое превращение); I – без разрушения корпуса бомбы (отсутствие взрыва)

На рисунках 3 и 4 представлены графики изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из октогена различной дисперсности в манометрической бомбе с аппроксимирующими выражениями.

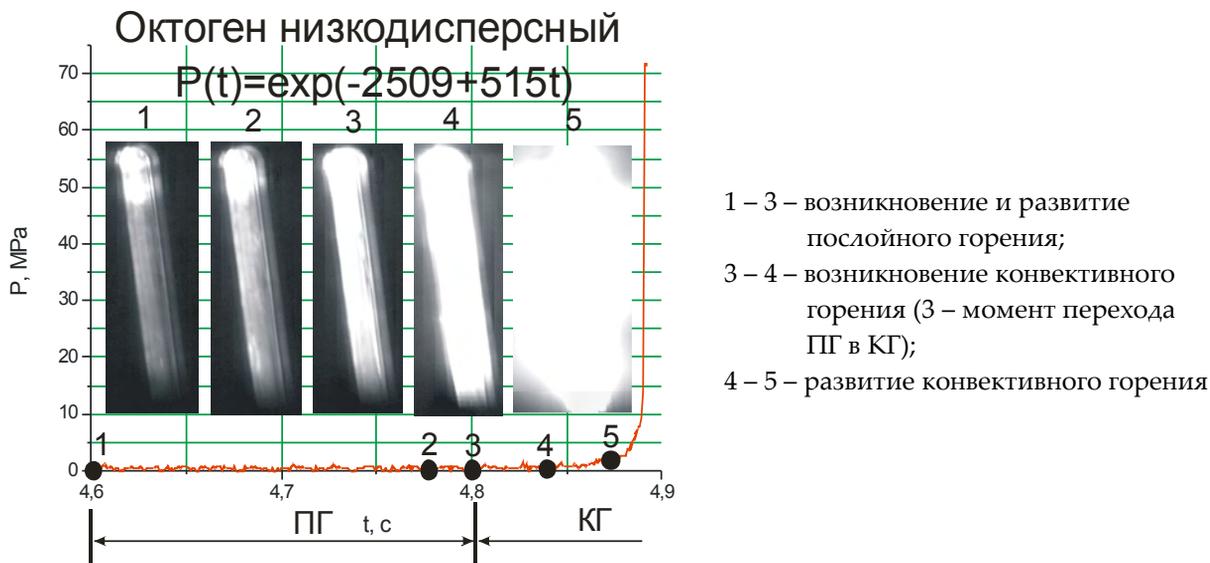


Рисунок 3. График изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена

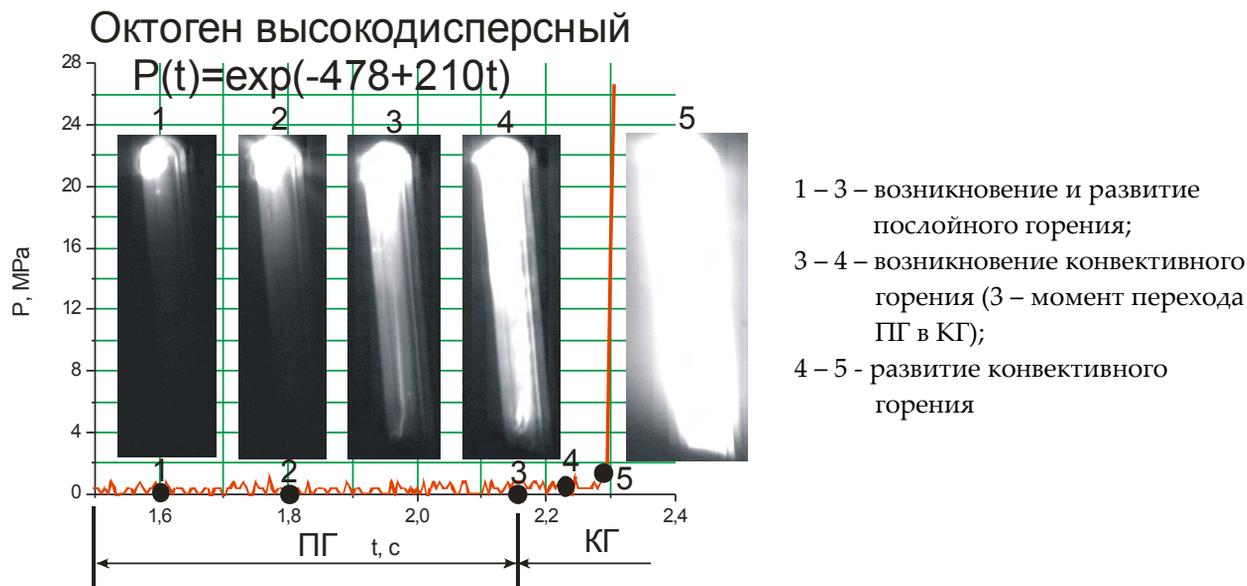


Рисунок 4. График изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из высокодисперсного октогена

Из результатов, представленных в таблице 1 и на графиках, изображенных на рисунках 3 и 4, видно, что процесс горения зарядов из октогена различной дисперсности значительно различается. При практически одинаковой плотности (пористости) зарядов и критическом давлении показатель скорости нарастания давления отличается в $\sim 2,5$ раза. Однако, наиболее важным фактом является отсутствие взрыва при горении заряда из высокодисперсного октогена, тогда как процесс развития горения заряда из низкодисперсного октогена завершился низкоскоростным взрывчатым превращением с разрушением бомбы на крупные куски. Данный факт может объясняться тем, что детали из высокодисперсного октогена обладают лучшими прочностными характеристиками по

сравнению с деталями из низкодисперсного октогена (значения прочности деталей из высокодисперсного октогена при всех видах нагружения превышают аналогичные характеристики детали из низкодисперсного октогена на 10 – 30 %). Повышение прочностных характеристик, по всей видимости, препятствует трещинообразованию в заряде ВВ при горении и тем самым не создает условий перехода КГ во взрыв. Кроме того, в крупных кристаллитах низкодисперсного октогена присутствует большее количество дефектов в виде пор и трещин, чем в мелких кристаллитах высокодисперсного октогена. Размеры пор и трещин в кристаллитах низкодисперсного октогена значительно превышают размеры пор и трещин в кристаллитах высокодисперсного октогена, что несомненно сказывается на более интенсивном характере процесса горения за счет повышения площади горения в данных дефектах.

Таким образом, вследствие высокой дисперсности и отсутствия значительного числа крупных пор и трещин в высокодисперсном октогене по сравнению с низкодисперсным октогеном процесс развития горения в заряде из высокодисперсного октогена протекает менее интенсивно и не приводит к возникновению взрыва.

2.2 Исследование развития процесса горения зарядов из октогена различной дисперсности с добавлением связующего «полиметилакрилат – оксизин»

Целью данного исследования являлось сравнение параметров горения ВВ из октогена различной дисперсности в сочетании со связующими из полиметилакрилата (ПМА) и оксизина. В качестве объекта исследования выбран низкодисперсный октоген (нд) с удельной поверхностью $S_{уд}=300 - 400 \text{ см}^2/\text{г}$ и высокодисперсный октоген (вд) с $S_{уд}=1400 - 1900 \text{ см}^2/\text{г}$ с добавлением 1,2% полиметилакрилата и 0,8% оксизина в каждый из составов.

В соответствии со схемой опытов (см. рисунок 1) было проведено исследование горения зарядов из октогена с добавлением связующих из полиметилакрилата и оксизина. Исследование горения зарядов из ВВ проводили с использованием деталей, отпрессованных по технологии, обеспечивающей минимальную пористость – не более 1 %. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из октогена с добавлением связующих из полиметилакрилата и оксизина представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из октогена различной дисперсности с полиметилакрилатом и оксизином

Δ , мм	ВВ с ПМА и оксизином	ρ , г/см ³	Параметры горения			Результаты опытов	
			$P_{кр}$, МПа	V	Остаток ВВ, %	Состояние бомбы	Процесс горения
0,5	октоген нд	1,85	0,5	115	20	I	переход ПГ в КГ, взрыва нет
	октоген вд		0,4	120	50		

Примечание: Δ - величина зазора в заряде ВВ; ρ – плотность деталей из ВВ; $P_{кр}$ – критическое давление; V – показатель скорости нарастания давления; I – без разрушения корпуса бомбы (отсутствие взрыва)

На рисунке 5 представлен график изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином, на рисунке 6 – графики изменения давления $f=P(t)$ октогена различной дисперсности с полиметилакрилатом и оксизином в манометрической бомбе с аппроксимирующими выражениями.

Октоген нд с полиметилакрилатом и оксизином

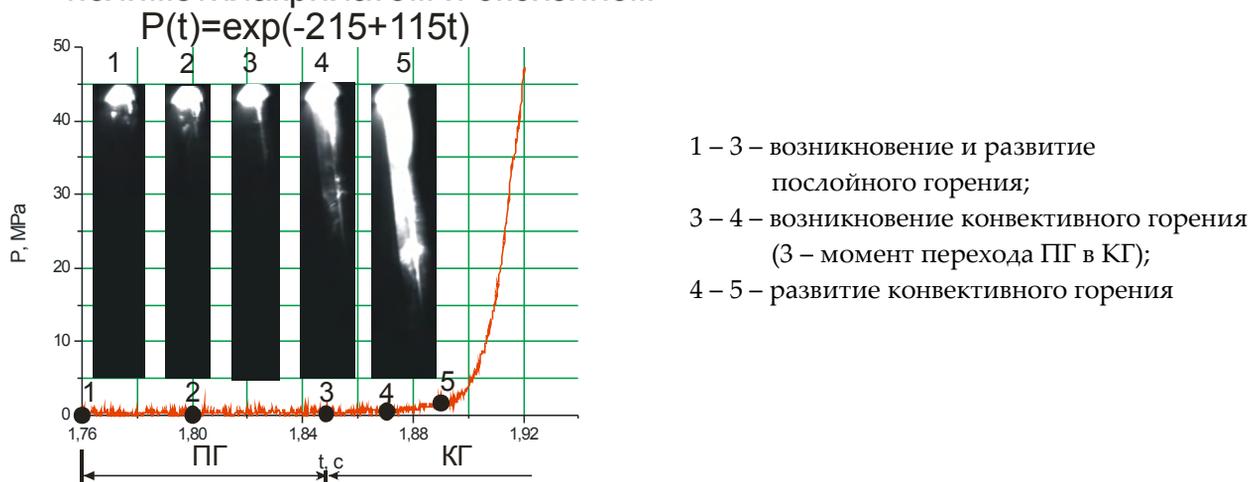


Рисунок 5. График изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином

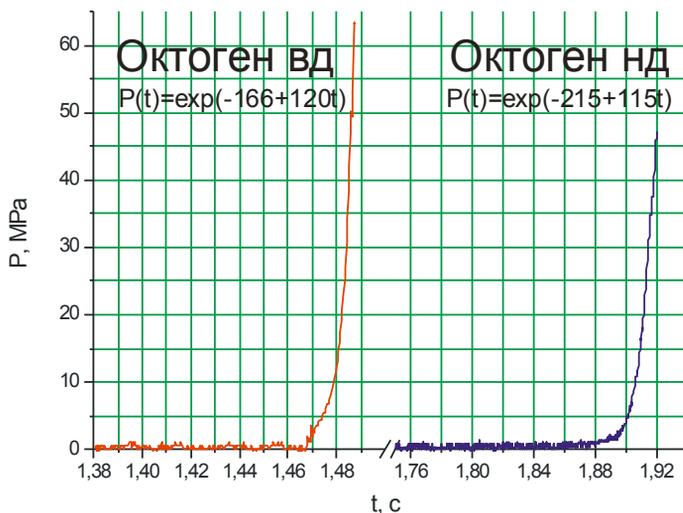


Рисунок 6. Графики изменения давления $f=P(t)$ при процессе горения зарядов из октогена различной дисперсности с полиметилакрилатом и оксизином

Из результатов, представленных в таблице 2 и на графиках, изображенных на рисунке 6, видно, что процесс развития горения зарядов из октогена различной дисперсности с полиметилакрилатом и оксизином происходит практически одинаково: при одной и той же плотности зарядов показатели скорости нарастания давления и значения критического давления для этих ВВ практически совпадают. Процесс горения зарядов из октогена различной дисперсности с полиметилакрилатом и оксизином характеризуется отсутствием перехода ПГ во взрыв.

Таким образом, добавление в октоген различной дисперсности связующих из полиметилакрилата и оксизина с одинаковым процентным содержанием оказывает заметное влияние на процесс развития его горения: процесс развития горения зарядов из данных ВВ менее интенсивный, чем в ВВ на основе октогена без добавления полиметилакрилата и оксизина, и характеризуется отсутствием перехода ПГ во взрыв.

2.3 Исследование развития процесса горения зарядов из низкодисперсного октогена со связующим из полиметилакрилата или оксизина

При сравнении результатов экспериментов по исследованию развития процесса горения ВВ, представленных в п.2.1 и 2.2 видно, что добавление к октогену полиметилакрилата и оксизина существенно снижает показатель скорости нарастания давления: для октогена без инертных добавок $V=210 - 515$, для октогена с добавлением полиметилакрилата и оксизина $V=115 - 120$. Для исследования развития процесса горения октогена с вышеуказанными инертными веществами выбран низкодисперсный октоген вследствие высокой интенсивности процесса горения и перехода его горения во взрыв. Целью данного исследования являлось определение влияния полиметилакрилата и оксизина на процесс развития горения низкодисперсного октогена. Для формирования зарядов из ВВ были изготовлены по четыре детали из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином соответственно. Процент содержания как полиметилакрилата, так и оксизина был одинаковый – 2 %. Для увеличения прочности деталей из ВВ в октоген с вышеуказанными флегматизаторами было добавлено 1,5% фторопласта.

В соответствии со схемой опытов (см. рисунок 1) проведено исследование горения зарядов из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином. Исследование горения заряда из октогена проводили с использованием деталей, отпрессованных по технологии, обеспечивающей минимальную пористость – не более 1 %. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты опытов по исследованию горения зарядов из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином

Δ , мм	ВВ	ρ , г/см ³	Параметры горения			Результаты опытов	
			$P_{кр}$, МПа	V	Остаток ВВ, %	Состояние бомбы	Процесс горения
0,5	Октоген нд с ПМА	1,86	0,5	47	5	I	переход ПГ в КГ, взрыва нет
	Октоген нд с оксизином	1,84	0,6	110	60		

Примечание: Δ - величина зазора в заряде ВВ; ρ – плотность деталей из ВВ; $P_{кр}$ – критическое давление; V – показатель скорости нарастания давления; I – без разрушения корпуса бомбы (отсутствие взрыва)

На рисунках 7 и 8 представлены графики изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом и оксизином соответственно в манометрической бомбе с аппроксимирующими выражениями.

Из результатов, представленных в таблице 3 и на графиках, изображенных на рисунках 7 и 8, видно, что показатель скорости нарастания давления при процессе горения зарядов из октогена (в связке с фторопластом) с полиметилакрилатом и оксизином отличается более чем в два раза – $V=47$ и $V=110$ соответственно. Значения данных показателей значительно меньше, чем в низкодисперсном октогене без соответствующих флегматизаторов ($V=515$). Процесс горения заряда из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом или оксизином характеризуется отсутствием перехода ПГ во взрыв.

Таким образом, добавление флегматизаторов - полиметилакрилата или оксизина снижает интенсивность процесса развития горения в зарядах из низкодисперсного октогена. При двухпроцентном содержании данных флегматизаторов в низкодисперсном октогене процесс развития горения менее интенсивный, чем в низкодисперсном октогене без полиметилакрилата или оксизина и не приводит к возникновению взрыва.

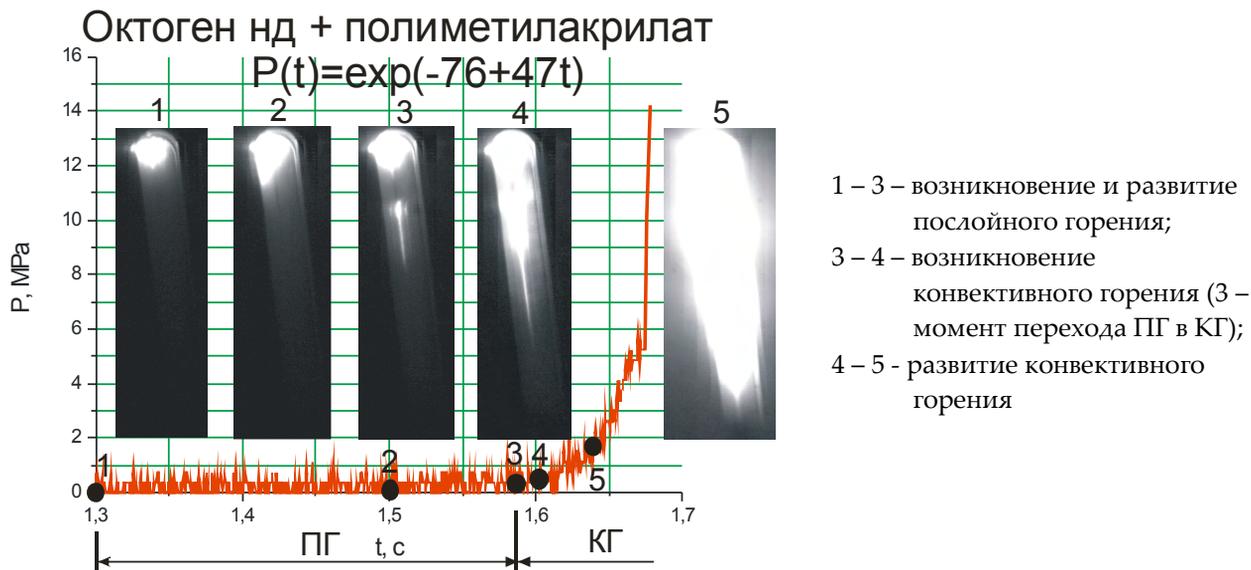


Рисунок 7. График изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена с полиметилакрилатом

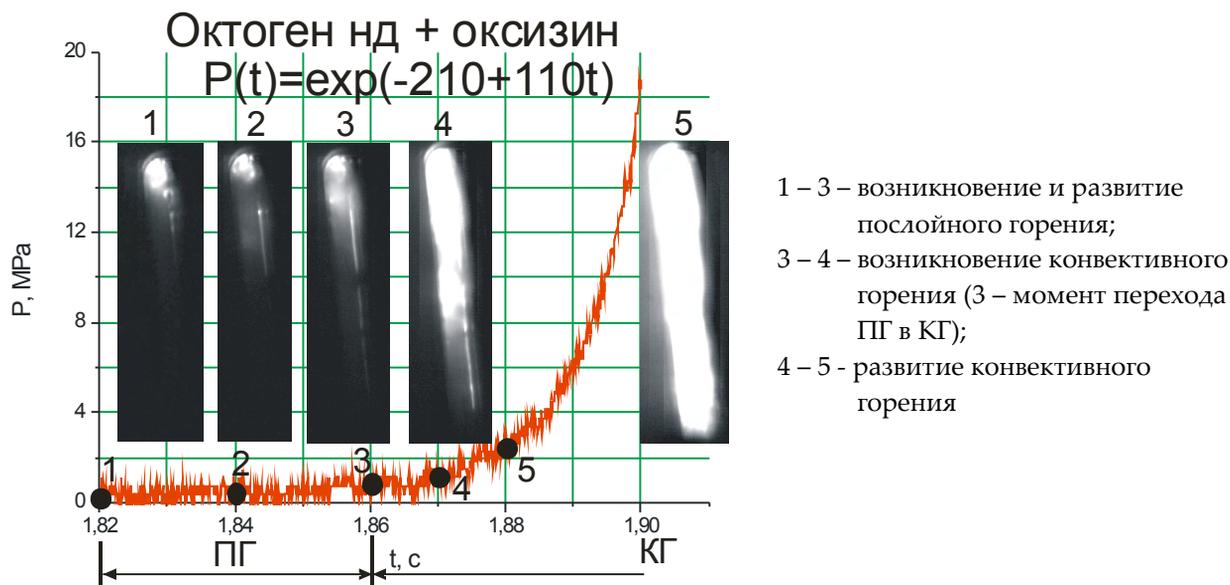


Рисунок 8. График изменения давления $f=P(t)$ с отдельными видеокадрами записи процесса горения заряда из низкодисперсного октогена с оксизинном

2.4 Обсуждение полученных результатов

Сравним основные характеристики горения (параметры горения, состояние бомбы, наличие перехода во взрыв), которые приведены в таблицах 1 – 3 и рисунках 2 - 7, и на их основе представим полученные данные в таблице 4.

Из графиков, изображенных на рисунках 3 - 8, и данных, представленных в таблице 4, следует, что наименьшая интенсивность развития процесса горения в зарядах ВВ со щелевым зазором 0,5 мм наблюдается в заряде из низкодисперсного октогена с добавлением 2 % полиметилакрилата. Показатель скорости нарастания давления при горении зарядов из низкодисперсного октогена с добавлением 2 % флегматизатора оксизина, ВВ октогена с полиметилакрилатом и оксизинном

примерно одинаковый и составляет $V = 110 - 120$. Далее по возрастанию интенсивности развития процесса горения располагаются заряды из ВВ высокодисперсного октогена и низкодисперсного октогена. Процесс горения всех исследованных ВВ, кроме низкодисперсного октогена, характеризуется отсутствием перехода ПГ во взрыв.

Таблица 4. Основные характеристики горения ВВ на основе октогена

№	ВВ	Параметры горения				Состояние бомбы	Процесс горения
		ρ , г/см ³	$P_{кр}$, МПа	V	Остаток ВВ, %		
1	Октоген нд с полиметилакрилатом	1,86	0,5	47	5	I	Переход ПГ в КГ, взрыва нет
2	Октоген нд с оксизином	1,84	0,6	110	60	I	то же
3	Октоген нд с полиметилакрилатом и оксизином	1,85	0,5	115	20	I	то же
4	Октоген вд с полиметилакрилатом и оксизином	1,85	0,4	120	50	I	то же
5	Октоген вд	1,86	0,5	210	5	I	то же
6	Октоген нд	1,87	0,4	515	нет	II	Переход ПГ в КГ, взрыв

Примечание: ρ – плотность деталей из ВВ; $P_{кр}$ – критическое давление; V – показатель скорости нарастания давления; II - разрушение бомбы на крупные куски (низкоскоростное взрывчатое превращение); I – без разрушения корпуса бомбы (отсутствие взрыва)

Из представленных данных следует, что наибольшее влияние на снижение интенсивности процесса горения зарядов из низкодисперсного октогена оказывает полимерное связующее – полиметилакрилат (ПМА). Эффективность ПМА как ингибитора горения можно объяснить его теплофизическими и термическими свойствами. В отличие от октогена, фторопласта и оксизина ПМА имеет более высокую удельную теплоемкость. Это сказывается на отводе тепла из системы «ВВ - полимер» на акрилат, что в свою очередь препятствует быстрому притоку тепла к взрывчатому наполнителю (Стоит отметить, что при $T \sim 20$ °С $C_p(\text{октоген}) = 0,9$ кДж/кг·К, $C_p(\text{ПМА}) = 1,8$ кДж/кг·К) [3]. Термическая стойкость ПМА в отличие от температуры разложения оксизина (> 400 °С) и фторопласта (~500 °С) значительно ниже [4]. Так, температура плавления полиметилакрилата составляет 160 °С, а температура его разложения - ~ 250 – 300 °С. Термическая деструкция акрилатного полимера представляет собой эндотермическую реакцию и поэтому в процессе термического разложения происходит поглощение тепла за счет превращения тепловой энергии в химическую [5]. Поскольку октоген претерпевает термическое разложение при температуре ~ 280 °С, можно предположить, что теплота, выделяющаяся при термораспаде октогена поглощается ПМА на деструкцию полимера.

Не исключено также, что введение 2 % ПМА к низкодисперсному октогену способствует увеличению прочности деталей из ВВ по сравнению с деталями из низкодисперсного октогена с добавлением 2 % оксизина и деталями из октогена с полиметилакрилатом и оксизином в результате показатель скорости нарастания давления для деталей «ВВ октоген + 2 % ПМА» оказался значительно ниже.

Использование высокодисперсного октогена также снижает интенсивность процесса развития горения и возможность возникновения взрыва при горении заряда из ВВ на основе октогена.

Таким образом, одним из способов снижения интенсивности процесса горения ВВ на основе октогена является использование высокодисперсного октогена с добавкой (~ 2 %) полиметилакрилата и (или) оксизина.

Список литературы

1. А.Ф. Беляев, В.К. Боболев, А.И. Коротков, А.А. Сулимов, С.В. Чуйко Переход горения конденсированных систем во взрыв. М., «Наука» 1973.
2. Л.А. Андреевских, С.А. Вахмистров, Д.А.Пронин, Е.В. Халдеев, Ю.В. Шейков Исследование развития конвективного горения в щели зарядов ВВ Физика горения и взрыва. 2015 т.51 № 6 стр.42 – 46
3. В.П. Привалко. Справочник по физической химии полимеров. Том 2. Свойства полимеров в блочном состоянии. Киев. Наукова думка. 1984 г.
4. Д.Д. Чегодаев. Фторопласты. Государственное научно-техническое издательство химической литературы. Ленинград. 1956 г.
5. С.П. Мадорский. Термическое разложение органических полимеров. Издательство «Мир». Москва. 1967 г.

КИНЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ УДАРНОВОЛНОВОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ДЕТОНАЦИИ ГЕТЕРОГЕННЫХ ВВ С УЧЁТОМ РАЗОГРЕВА ОЧАГОВ

В.Н. Князев, Р.А. Воронков, Е.Н. Богданов, Е.В. Рычагов, А.В. Родионов

РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров, Россия

В большинстве современных кинетических моделей детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ) полагается, что развитие реакции химического разложения происходит в форме послыонного горения из сформированных на фронте ударной волны (УВ) очагов.

Однако данные экспериментальных и теоретических исследований преддетонационных процессов в твёрдых взрывчатых веществах при механических воздействиях невысокой интенсивности указывают на существование индукционного периода. Этот интервал времени обусловлен разогревом вещества в очаге и предшествует самоускорению реакции вследствие увеличения площади реакционной поверхности и переходу её в детонационный режим.

В данной работе предпринята попытка учёта индукционного периода с помощью новой двухстадийной кинетической модели детонации «ОЧАГ». Основные положения предложенной кинетической модели детонации сформулированы следующим образом:

1. На фронте ударной волны, распространяющейся по ВВ, формируются зоны локального разогрева, будем называть их горячими точками, температура в которых недостаточна для выполнения критерия Зельдовича [1] и образования волны стационарного горения. В горячих точках протекает гомогенная экзотермическая реакция в условиях теплообмена с окружающим материалом. Это положение принципиально отличает модель «ОЧАГ» от других современных кинетических моделей.

2. При выполнении критерия существования стационарной волны горения, то есть достижения определённой температуры, горячая точка становится очагом (зародышем). Гомогенная реакция разложения сменяется гетерогенной реакцией, которая происходит в форме послыонного горения из образовавшихся очагов.

В модели полагается, что на фронте ударной волны, в зависимости от её интенсивности, формируются горячие точки с характерными температурой T_{spot} и радиусом r_{spot} , распределённые в объёме материала с характерным расстоянием h_{spot} между ближайшими соседями. Расчётная оценка