

На правах рукописи.

Клюстер Иван Александрович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВЗРЫВЧАТОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ И ГАЗООБРАЗНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ СИСТЕМ С ЦЕЛЬЮ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ТРАНСПОРТНЫХ ОПЕРАЦИЙ И ИХ ХРАНЕНИЯ**

01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Самарский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент **Кривченко Александр Львович**.

Официальные оппоненты:

Смирнов Александр Сергеевич доктор технических наук, АО «Государственный научно – исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева, начальник отдела экспериментальной физики.

Уткин Александр Васильевич кандидат физико-математических наук, Институт проблем химической физики РАН, заведующий лабораторией.

Ведущая организация **ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»**.

Защита диссертации состоится «28 сентября» 2018 г. в 12 часов 30 мин. на заседании диссертационного совета Д212.217.01 в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» по адресу: 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, аудитория 200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д 212.217.01 по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, главный корпус, тел. (846) 242-27-76, e-mail: mtm.samgtu@mail.ru.

Автореферат разослан «__» ____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.217.01,
кандидат технических наук

Майдан Д.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Исследование кинетики разложения взрывоопасных продуктов является важной составляющей обеспечения безопасности при транспортных операциях со взрывчатыми веществами (ВВ) и их хранением. Для корректного расчета безопасных расстояний между местами хранения взрывчатых материалов (ВМ) одним из актуальных вопросов является определение тротилового эквивалента потенциально опасных продуктов. Согласно официальных данных за последние 5 лет при транспортировке опасных грузов железнодорожным транспортом и осуществлении погрузо-разгрузочных операций, а также вследствие сходов и опрокидывания вагонов с опасными грузами произошло 9 аварий, в том числе 9 несчастных случаев со смертельным исходом и свыше 450 инцидентов. Общий ущерб от аварий подобного рода только в 2013 г. превысил 16 млн.р. Поэтому вопросы, связанные с исследованием процессов инициирования опасных продуктов, таких как взрывчатые вещества и сжиженные углеводородные газы чрезвычайно актуальны. Для обеспечения безопасности перевозок взрывчатых материалов ООН рекомендуется перевозить их во флегматизированном состоянии. В частности, наиболее распространенное взрывчатое вещество гексоген (RDX) по международной классификации перевозить рекомендуется в водонаполненном состоянии с добавлением не менее 15 % воды. Это приводит с одной стороны к уменьшению пыления, а с другой к снижению чувствительности взрывчатого материала к механическим и ударно-волновым воздействиям. Другие опасные транспортные операции, связанные со сжиженными газами в основном с пропан-бутаном, особенно при погрузо-разгрузочных работах и транспортировке порожних цистерн со следами оставшихся продуктов, являются наиболее опасными операциями и требуют принятия определенных мер безопасности. Поэтому проблема обеспечения безопасности при транспортировке опасного груза является весьма актуальной.

Цель работы.

Исследование процессов взрывчатого превращения наполненных систем гексогена и газообразных взрывчатых систем для обеспечения безопасности операций их транспортировки и хранения.

Задачи исследования.

1. Определение чувствительности водонаполненного гексогена к механическим воздействиям.
2. Определение детонационной способности критического диаметра водонаполненного гексогена и критическое давление инициирования зарядов водонаполненного гексогена.
3. Определение тротилового эквивалента взрыва водонаполненного гексогена и паровоздушной смеси.
4. Разработка теоретического метода определения скорости детонации наполненных систем гексогена;
5. Разработка теоретического метода определения тротилового эквивалента водонаполненного гексогена и паровоздушной смеси.
6. Анализ и повышение безопасности транспортных операций с паровоздушными смесями.

Объекты исследования.

Наполненные системы гексоген – наполнитель, пропанобутановые смеси.

Научная новизна.

1. Разработана новая методика определения скорости детонации наполненных систем гексогена;
2. Разработана новая методика определения тротилового эквивалента ВВ.
3. Впервые обнаружено аномальное энерговыделение в зоне расширения продуктов детонации при соотношении конечной и начальной плотностей $\rho_2/\rho_1 = 0,9$.
4. Показано, что флегматизация паровоздушной смеси инертным газом (CO_2) осуществляет не только разбавление горючей смеси, но и в случае возникновения процесса воспламенения, он по принципу Ле Шателье, усиливает процесс, направленный на компенсацию

внешнего воздействия. Именно этот процесс позволяет даже при незначительном разбавлении паровоздушной смеси значительно снизить риск взрывного превращения.

Практическая значимость работы.

- Теоретический метод определения скорости детонации наполненных систем гексогена с использованием скорости звука;
- Теоретический метод расчета тротилового эквивалента ВВ основанный на параметрах детонации;
- Результаты теоретического расчета параметров детонации систем гексоген – наполнитель и паровоздушных смесей;
- Новые методы расчета параметров детонации и тротилового эквивалента ВВ и паровоздушных смесей могут быть использованы при анализе степени их безопасности в различных условиях;
- Разработан способ повышение безопасности транспортных операций с паровоздушными смесями;
- Полученные результаты по исследованию процессов взрывчатого превращения конденсированных и газообразных взрывчатых систем позволяют повысить безопасность транспортировки и хранения ВВ;
- Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс и используются при подготовке и повышении квалификации работников в эксплуатационном вагонном депо Дема (ОАО «РЖД») г. Уфа, а также внедрены в учебный процесс на кафедре «Техносферная безопасность и сертификация производств» при выполнении курсовых и выпускных квалификационных работ бакалавров по направлению 20.03.01 – Техносферная безопасность в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» г. Самара.

Научные положения и результаты исследования, выносимые на защиту:

- Разработка теоретического метода определения скорости детонации наполненных систем гексогена;
- Разработка теоретического метода расчета тротилового эквивалента ВВ;
- Результаты теоретического расчета параметров детонации систем гексоген – наполнитель и паровоздушных смесей;
- Способ повышение безопасности транспортных операций с паровоздушными смесями.

Достоверность научных результатов работы подтверждается использованием современных методик исследования ударно-волновых процессов и рекомендованных методик по определению чувствительности материалов к механическим воздействиям и современным представлениям по физике взрыва.

Апробация работы.

Научные результаты работы апробированы на международных и межвузовских научно-технических конференциях и симпозиумах: Московский семинар по физике взрыва при институте химической физике РАН (2011 г.), г. Дзержинск; Московский семинар по физике взрыва (2013 г.), г. Самара; доклад по теме диссертации (2014 г.), г. Самара; доклад по теме диссертации (2015 г.) г. Оренбург; XVII Харитоновские тематические научные чтения – Международная конференция «Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны» (2015 г.), г. Саров.

Публикации.

По результатам диссертации опубликовано 7 работ, из них 5 статей, 1 доклад, и 1 патент. В том числе 5 работ из перечня рекомендованного Высшей аттестационной комиссией РФ.

Личный вклад автора.

В выборе направления исследований; в постановке целей и задач диссертации; в личном проведении экспериментов; в обработке полученных экспериментальных данных; в формулировках выводов, выносимых на защиту, а также в подготовке публикаций в печать.

Структура и объем работы.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы. Общий объем работы составляет 111 страниц, включая 32 рисунков, 14 таблиц и списка литературы включающего 115 источника.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цели работы и основные положения, выносимые на защиту, отражены научная новизна и практическая полезность. Представлены сведения об апробации и достоверности научных результатов работы.

В первой главе анализируется современное состояние проблемы. Приведены общие сведения при перевозке опасных грузов. Представлен анализ существующих методов определения чувствительности взрывчатых веществ к удару, используемых в различных странах. Изложены методы определения детонационных и ударно-волновых характеристик. Показано, что наиболее простым и удобным методом является электромагнитный, позволяющий одновременно определять скорость детонации и массовую скорость. Рассмотрены методики расчета параметров детонации в паровоздушных смесях. Классический гидродинамический метод, а также динамический метод с использованием местной скорости звука в исходном газе.

Во второй главе рассмотрены параметры чувствительности водонаполненного гексогена к удару с пропорциональным соотношением 75/25. Данное соотношение компонентов было взято с учетом полного заполнения объема промышленного гексогена водой, имеющего дефекты и внутренние неоднородности. Целесообразность такого соотношения рассмотрено в главе 3.

Соотношение компонентов 75/25 было гарантировано следующим: перед каждым отбором навески проба ВВ была взвешена и перемешана, что исключало стекание воды с зерен гексогена, а постоянство веса всей пробы на протяжении всего испытания исключали потери воды вследствие ее испарения. Анализ шести методов определения чувствительности ВВ к удару показал, что для проведения испытаний оптимально воспользоваться установкой для ударных испытаний предусмотренной ГОСТ 4545-88.

Для достижения цели были проведены две серии по 25 опытов с зарядами наполненного гексогена, масса которых составляла $0,050 \pm 0,005$ г. При этом в соответствии с ГОСТ 4545-88 использовались прибор №1 рис. 1 и прибор №2 рис. 2.

Частоту взрывов определяли в процентном соотношении, используя следующее выражение:

$$X_1 = \frac{n_i * 100}{25} \quad (1)$$

где n_i - количество взрывов из проведенных 25 испытаний.

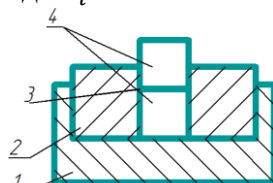


Рис. 1. Прибор 1.

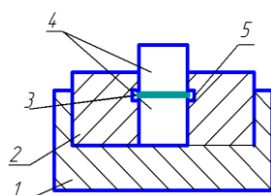


Рис. 2. Прибор 2.

Результаты испытаний представлены в таблице 1. Из проведенных 25 испытаний водонаполненной системы не последовало ни одного взрыва, что позволяет судить о значительном снижении чувствительности данного продукта к удару.

Для окончательного исследования чувствительности водонаполненного гексогена к удару необходимо было определить нижний предел чувствительности. Для этого был использован прибор 2 рис. 2.

В целях установления первоначальной высоты сбрасывания груза при определении нижнего предела чувствительности к удару водонаполненного гексогена в приборе 2 была определена частота (вероятность) взрывов в этом приборе. Использовалась навеска водонаполненного гексогена массой 0,05 г. Далее была определена максимальная высота сбрасывания груза, при которой не происходило ни одного взрыва из 25 испытаний. Результаты испытаний представлены в таблице 2.

Таблица 1.

Частота взрывов исследуемых ВВ.

ВВ, взрывчатая система	Масса, г.	с, вес наполнителя, %	ρ_n , г/см ³	ρ_0 , г/см ³	Частота взрывов, %
Гексоген	0,05	-	-	1,03	72
Гексоген - вода	0,05	25	1,0	-	0

Таблица 2.

Значения минимальной высоты сбрасывания груза.

Испытуемое ВВ	Масса, г.	Высота сбрасывания груза, мм	Количество отказов/взрывов
Гексоген – вода 75/25	0,05	500	4/2
		400	25/0

Как видно из таблицы 2 нижний предел чувствительности или максимальная высота сбрасывания груза массой 10 кг на навеску исследуемого ВВ, при которой не произошло ни одного взрыва составила 400 мм. Таким образом, зафиксировано, что водонаполнение гексогена приводит к значительному снижению чувствительности исследуемого продукта.

В третьей главе приводятся уже известные данные исследования детонационных характеристик наполненных систем гексогена, которые сводятся к исследованию перекристаллизованного монокристаллического гексогена с минимальным количеством дефектов и плотностью зерен 1,80 г/см³. Данные исследования были приведены в работах А. Я. Апина с позиции предложенного им механизма разложения ВВ как взрывного горения. Исследование влияния флегматизатора на параметры детонации промышленного гексогена, имеющего дефекты и внутренние неоднородности ранее не исследовались. Показано, что для полного заполнения объема промышленного гексогена водой требуется $\approx 25\%$ воды по массе. В данной главе исследуется влияние не только воды на параметры детонации промышленного гексогена, но и различных по физическим и химическим свойствам наполнителей. Соотношение наполнителя и гексогена было выбрано с учетом полного заполнения объема заряда, занимаемого воздухом. Таким образом, объемное соотношение наполнителя не изменялось, а изменялось только его весовое соотношение, которое зависит от плотности.

В данной главе проводится экспериментальное определение зависимости параметров детонации системы гексоген-наполнитель от диаметра зарядов.

Для определения зависимости параметров детонации от диаметра зарядов в эксперименте использовался крупнокристаллический гексоген с размером частиц 0,3–0,5 мм и плотностью 1,8 г/см³. В качестве наполнителей применялись вода, ацетон и четыреххлористый углерод. Параметры детонации во взрывчатых системах определялись электромагнитным методом. Результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Пределные параметры детонации наполненных систем были получены при диаметре заряда равным 60 мм. На одном заряде системы гексоген-ацетон были проведены испытания при диаметре заряда 80 мм. Существенного отличия параметров детонации при увеличении диаметра заряда более 60 мм не наблюдалось. Поэтому все остальные испытания проводились именно при диаметре заряда равным 60 мм.

На рис. 3, 4 приведены зависимости скорости и давления детонации от диаметра заряда для гексогена с ацетоном, водой и четыреххлористым углеродом.

Таблица 3.

Параметры детонации взрывчатых систем.

Взрывчатая система	ρ_0 , г/см ³ , Плотность заряда	d мм, Диаметр заряда	D, км/с, Скорость детонации	u, км/с, Массовая скорость	P, ГПа, Давление детонации	k, Показатель политропы	τ , мкс, Время химической реакции
1	2	3	4	5	6	7	8
Гексоген - ацетон	1,35	19	6,01	-	-	-	-
		35	6,43	1,25	10,9	4,15	0,42
		40	6,43	1,25	10,9	4,15	0,44
		45	6,80	1,60	14,7	3,25	0,44
		60	6,92	1,62	15,3	3,30	0,48
		80	6,96	1,62	15,3	3,30	0,48
Гексоген - вода	1,43	19	5,1	-	-	-	-
		25	5,9	1,17	10,0	4,05	0,50
		30	6,58	1,17	11,4	4,65	0,56
		35	6,58	1,17	11,4	4,65	0,56
		40	6,96	1,30	12,9	4,35	0,48
		45	7,58	1,54	16,7	3,95	0,5
		60	7,60	1,60	17,7	3,75	0,45
Гексоген – четыреххлористый углерод	1,70	19	5,1	-	-	-	-
		25	5,8	1,17	11,5	3,95	0,52
		30	6,37	1,17	12,6	4,45	0,51
		35	6,44	1,17	12,8	4,50	0,6
		40	6,58	1,52	17,0	3,33	0,52
		45	7,02	1,62	19,3	3,33	0,5
		60	7,05	1,75	21,0	3,0	0,72

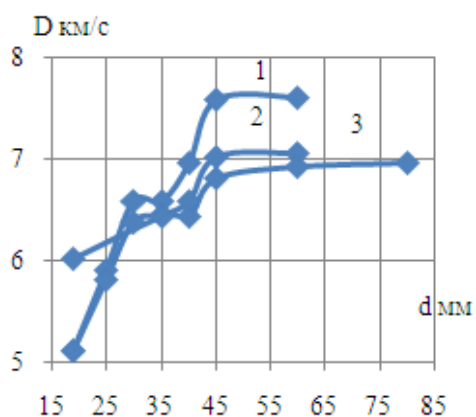


Рис. 3. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в наполненных системах гексогена с водой (1), четыреххлористым углеродом (2) и ацетоном (3).

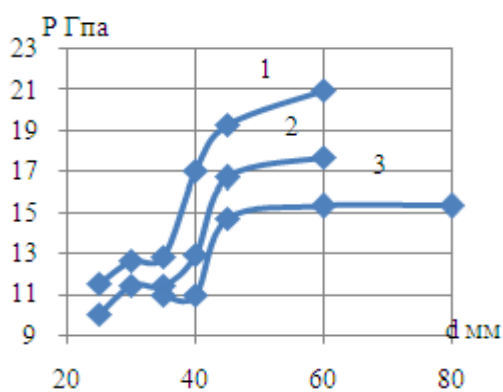


Рис. 4. Зависимость давления детонации от диаметра заряда в наполненных системах гексогена с четыреххлористым углеродом (1), водой (2) и ацетоном (3).

В диапазоне от критического диаметра до диаметров, отвечающих участку постоянства параметров, параметры детонации всех трех систем гексогена близки между собой. Так, давле-

ние и скорость детонации в зарядах диаметром равным 35 мм имеют значения для гексогена с ацетоном 10,9 ГПа и 6,43 км/с, для гексогена с водой 11,4 ГПа и 6,58 км/с и гексогена с четыреххлористым углеродом 12,8 ГПа и 6,44 км/с. Дальнейшее увеличение диаметра заряда приводит к существенному отличию в параметрах детонации.

Интересной особенностью детонации наполненных систем гексогена является резкое ускорение и прирост параметров детонации при переходе диаметра заряда от 35 до 45 мм. Впервые аналогичное явление было обнаружено А. Я. Апиным на системах гексоген – парафин. Это может быть связано с изменением механизма разложения ВВ, в частности с переходом взрывного горения в тепловой взрыв по механизму Я. Б. Зельдовича.

В третьей главе также исследуются детонационные характеристики наполненных систем гексогена. В этом плане исследовалось влияние различных по физическим и химическим свойствам наполнителей непосредственно на параметры детонации и время химической реакции в режимах близких к идеальным. Были исследованы несколько взрывчатых систем гексоген – наполнитель. Схема эксперимента приведена на рис. 5. Давления определялось исходя из закона сохранения импульса:

$$P = \rho_0 D U, \quad (2)$$

где ρ_0 - плотность заряда, D – скорость фронта, U - массовая скорость на фронте.

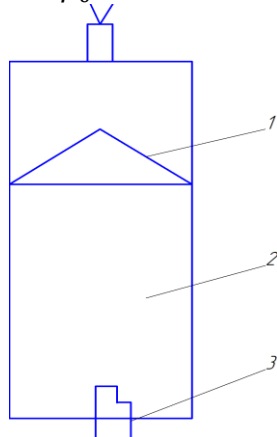


Рис. 5. Схема эксперимента. 1 – взрывная линза; 2 – исследуемое ВВ; 3 – электромагнитный датчик.

Время химической реакции определялось по излому профиля τ . Ширина зоны химической реакции определялась по формуле $a = (D - 1,25u) \tau$. В опытах исследовались насыпные крупнокристаллический и полидисперсный гексоген и наполненные заряды из кристаллических частиц промышленного гексогена, с размером частиц 0,3 – 0,5 мм. Парциальная плотность крупнокристаллического гексогена в наполненных системах составляла $1,04 \pm 0,02 \text{ г/см}^3$.

Заполнение пор между частицами ВВ производилось через специальные окна в пресшпановой оболочке зарядов, покрытой тонким слоем церезиновой мастики.

В таблице 4 приведены параметры детонации различных взрывчатых систем и параметры детонации насыпного крупнокристаллического гексогена плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$ и прессованного гексогена плотностью $1,44 \text{ г/см}^3$ (эта плотность близка к средней плотности наполненных систем).

Таблица 4.

Параметры детонации взрывчатых систем.

ВВ, взрывчатая система	с, вес, % Содержание наполнителя	$\rho_n, \text{ г/см}^3$, Плотность наполнителя	$\rho_0, \text{ г/см}^3$, Плотность заряда	$D, \text{ км/с}$, Скорость детонации	$u, \text{ км/с}$, Массовая скорость	$P, \text{ ГПа}$, Давление детонации	$\tau, \text{ мкс}$, Время химической реакции	$a, \text{ мм}$, ширина ЗХР, мм	$k, \text{ Показатель политропы}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гексоген	-	-	1,03	6,0	1,56	9,64	0,67	2,5	2,8
Гексоген	-	-	1,44	7,53	1,8	19,6	0,24	1,12	3,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Гексоген - бро- моформ	51	2,81	2,28	6,32	1,47	21,2	0,95	4,23	3,3
Гексоген - аце- тон	24	0,79	1,35	6,94	1,62	15,2	0,48	2,37	3,3
Гексоген - спирт	25	0,81	1,36	7,05	1,81	17,3	0,48	2,34	3,0
Гексоген - фор- мамид	32	1,13	1,52	7,40	1,80	20,1	0,43	2,21	3,1
Гексоген (поли- дисперсный) - вода	26	1,0	1,43	7,56	1,58	17,1	0,51	2,61	3,78
Гексоген - эта- ноламин	30	1,01	1,47	7,62	1,80	19,9	0,40	2,14	3,2
Гексоген (круп- нокристалличе- ский) – вода	27	1,0	1,48	7,63	1,61	18,2	0,45	2,52	3,74
Гексоген - аце- тамид	32	1,16	1,52	7,85	1,71	20,4	0,52	2,97	3,6
Гексоген - Гид- разингидрат	30	1,03	1,47	8,11	1,73	20,7	0,35		3,8

Как видно из таблицы 4 параметры детонации наполненных систем (скорость детонации, массовая скорость, давление и показатель политропы) превышают параметры насыпных зарядов, а иногда и превышают по одному или всем значениям параметры детонации чистого гексогена с плотностью 1,44 г/см³.

На основании полученных результатов было сделано предположение, что именно с физическими свойствами наполнителя и в целом системы может быть связан рост параметров взрывчатых систем, а именно с распространением по наполненной взрывчатой системе детонационного фронта. В первую очередь влияние может оказывать волноводные свойства системы, например скорость распространения звука. В этом плане была проведена оценка параметров детонации через данную характеристику. Для этого были получены значения скорости звука во взрывчатых системах по следующему выражению:

$$c_{1,2} = c_1 c_2 \frac{\beta \rho_1 + (1-\beta)\rho_2}{\beta \rho_1 c_1 + (1-\beta)\rho_2 c_2} \quad (3)$$

где c_1 , c_2 , $c_{1,2}$ - скорости звука в монокристаллическом гексогене, наполнителе и системе соответственно; β – массовая доля наполнителя; ρ_1 и ρ_2 – плотность монокристаллического гексогена и наполнителя соответственно.

На рис. 6 представлен график зависимости скорости детонации в системах гексогена с различными наполнителями от скорости звука, а в таблице 5 представлены расчетные значения скоростей распространения звука в системах гексогена с наполнителями, имеющие различные физические свойства.

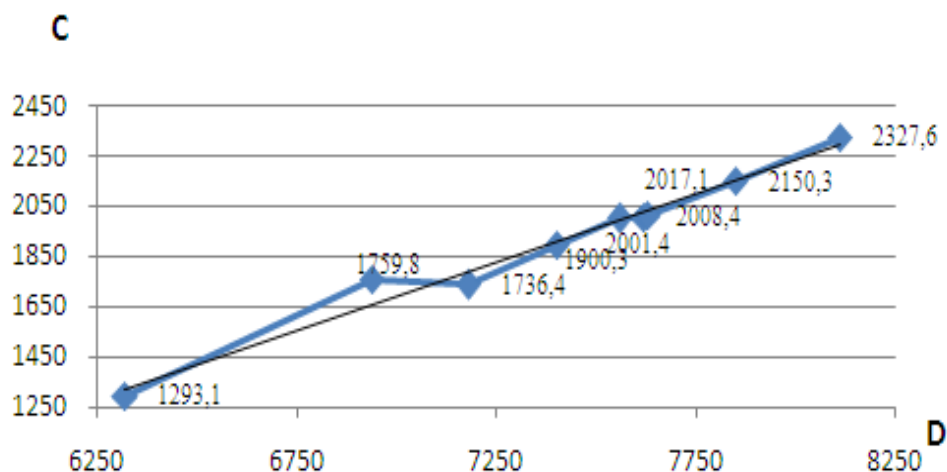


Рис. 6. Зависимость скорости детонации в системах гексоген – наполнитель от скорости звука.

Анализ скорости звука и скорости детонации наполненных систем позволяет установить некоторые закономерности их взаимосвязи. А в случае аппроксимации данных значений была установлена линейная зависимость скорости детонации от скорости звука. Полученная зависимость скорости детонации от скорости звука представлена следующим выражением:

$$D_{расч} = 5400 + c_{1,2} \quad (4)$$

Расчетные и экспериментальные значения представлены в таблице 5.

Предложенная методика расчета скорости детонации, на базе легко прогнозируемой характеристики позволяет с хорошей степенью точности определить параметры детонации. Некоторое расхождение расчетной и экспериментальной скорости детонации достигало ~ 3%.

Таблица 5.

Расчетные и экспериментальные значения скорости детонации.

ВВ, взрывчатая система	c, вес, % Содержание наполнителя	ρ_n , г/см ³ , Плотность наполнителя	ρ_0 , г/см ³ , Плотность заряда	D (эксп), м/с, Экспериментальная скорость детонации	D (расч), м/с (3), Расчетная скорость детонации	D (расч), м/с (4), Расчетная скорость детонации	c_1 Скорость звука наполнителя м/с	$c_{1,2}$ Скорость звука системы м/с
Гексоген - бромформ	51,0	2,81	2,28	6 320	6693,1	7892,00	728	1293,1
Гексоген - ацетон	24,0	0,79	1,35	6 940	7159,8	6907,37	1192	1759,8
Гексоген - спирт	25,0	0,81	1,36	7 050	7136,4	6910,84	1177	1736,4
Гексоген - формамид	32	1,13	1,52	7 400	7 300,3	7424,14	1279,28	1900,3
Гексоген (полидисперсный) - вода	26	1,0	1,43	7 560	7 417,1	7 301,8	1450	2017,1
Гексоген - этаноламин	30	1,01	1,47	7 620	7408,4	7 478,09	1424,26	2008,4
Гексоген (крупнокристаллический) – вода	27	1,0	1,48	7 630	7 401,4	7 466,4	1450	2001,4
Гексоген - ацетамид	32	1,16	1,52	7 850	7 550,3	7696,81	1606,68	2150,3
Гексоген - Гидразингидрат	30	1,03	1,47	8 110	7727,6	7840,63	1980	2327,6

В качестве сравнительного анализа был произведен расчет скорости детонации по следующему выражению:

$$D = 1,2 c_0 \frac{\rho_0}{\rho} + 2,55 \sqrt{\frac{\alpha+1.65}{5.5} \rho_0 Q_m} \quad (5)$$

где ρ – предельное значение плотности системы; α – кислородный коэффициент; Q_m – максимальная теплота взрыва.

Результаты расчета представлены в таблице 5.

В данной главе также рассматривается чувствительность ВВ к ударно-волновому воздействию. Для этого используются два метода, одним из которых является метод определения давления входящей ударной волны, при котором не происходит развитие процесса взрывчатого превращения, и давление, при котором происходит постепенное возрастание параметров вплоть до развития установившейся детонации. Показано, что развитие процесса для насыпного гексогена происходит при давлении 0,2 ГПа, а водонаполненного при 3,4 ГПа. При этом установившаяся детонация происходит в насыпном гексогене при положении датчика на 12 мм, а водонаполненного гексогена на 30 мм. Однако, данные исследования не позволяют точно определить механизм развития взрывчатого превращения. В связи с этим была использована методика торможения границы раздела инерт – ВВ, предложенная К.К. Шведовым.

В данном эксперименте датчик во всех случаях устанавливается на границу раздела парафиновая прослойка – ВВ.

В опытах использовались следующие взрывчатые системы: гексоген – вода, гексоген – бромформ и для сравнения гексоген – четыреххлористый углерод. Характерные профили массовой скорости для различных взрывчатых систем приведены на рис. 7. Усредненные профили массовой скорости получались обработкой данных 3 – 6 осциллограмм.

В некоторых случаях для увеличения интенсивности входящей ударной волны применялся генератор ударной волны треугольного профиля, отличающийся от генератора волны прямоугольного профиля лишь отсутствием воздушного зазора. На рис. 8 приведены примеры записи профиля массовой скорости в некоторых взрывчатых системах от таких генераторов.

Полученные результаты по торможению границы раздела при различных давлениях представлены на рис. 9 – 11. Приведенные графики являются усредненными профилями массовой скорости, цифрами на кривых указаны давления ударной волны на границе раздела инерт – ВВ.

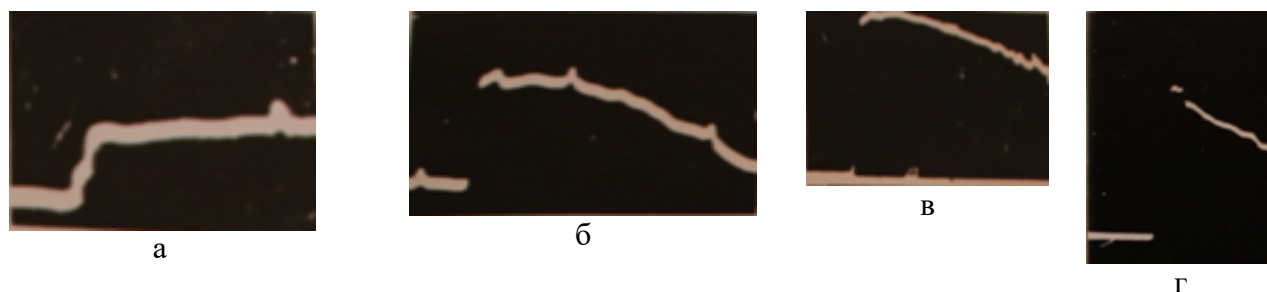


Рис. 7 Примеры осциллограмм массовой скорости на границе раздела взрывчатых системах. во

а – гексоген – четыреххлористый углерод, $P = 2,2$ ГПа; б - гексоген – четыреххлористый углерод, $P = 4,8$ ГПа; в – гексоген – бромформ, $P = 9$ ГПа; г - гексоген – четыреххлористый углерод, $P = 6,7$ ГПа;

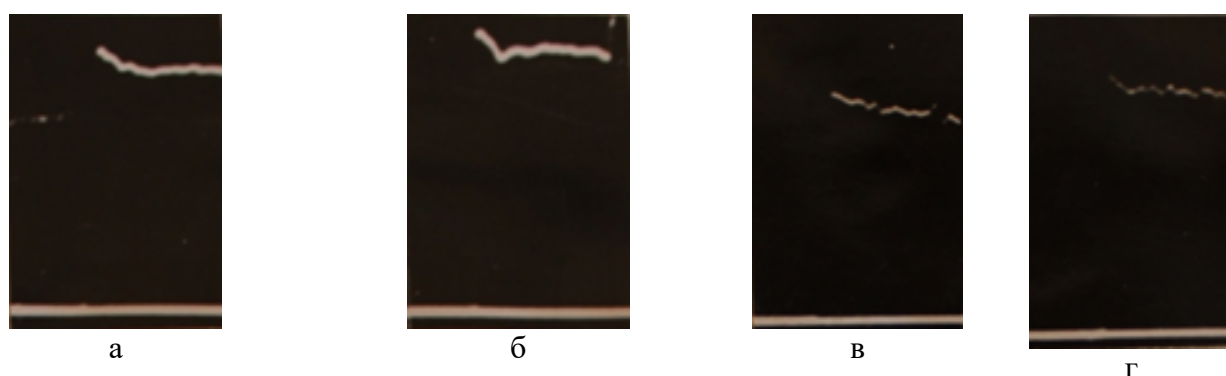


Рис. 8 Примеры осциллограмм массовой скорости на границе раздела во взрывчатых системах. а – гексоген – вода $P = 19,6$ ГПа; б – гексоген – вода $P = 22,6$ ГПа; в – гексоген – четыреххлористый углерод $P = 20,5$ ГПа; г – гексоген – четыреххлористый углерод $P = 23,0$ ГПа.

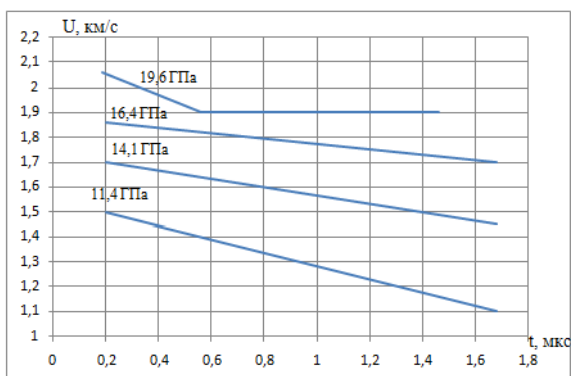


Рис. 9. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – водонаполненный гексоген (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

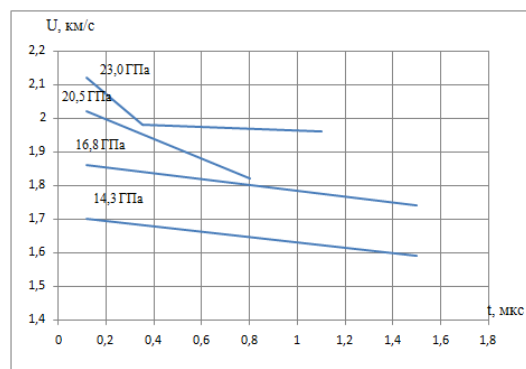


Рис. 10. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – система гексоген – четыреххлористый углерод (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

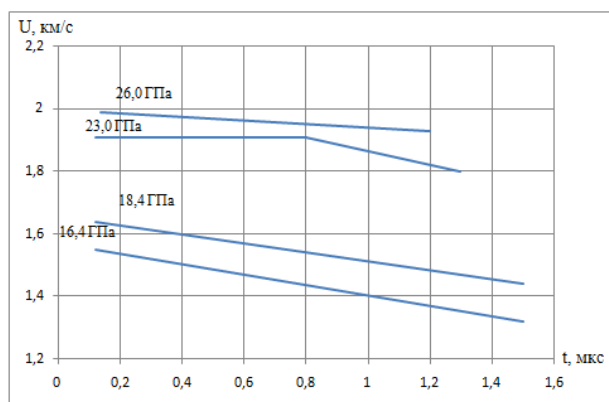


Рис. 11. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – система гексоген – бромформ (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

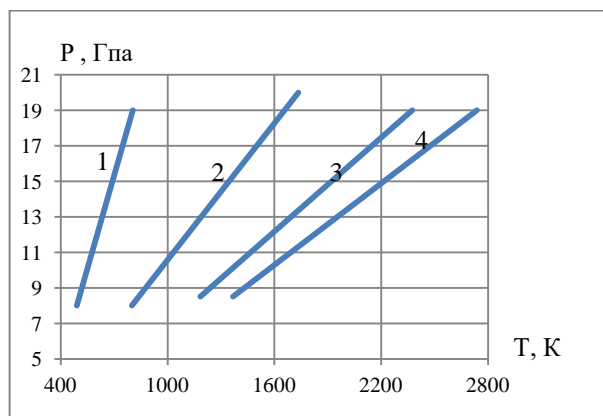


Рис. 12. Зависимость давления от температуры ударного разогрева. 1 - монокристаллический гексоген; 2 – вода; 3 – бромформ; 4 – четыреххлористый углерод.

Постепенно, увеличивая амплитуду входящей ударной волны, профиль с химпиком для водонаполненного крупнокристаллического гексогена был зарегистрирован при давлении 19,6 ГПа, время разложения составило 0,56 мкс. Для полидисперсного водонаполненного гексогена профиль с химпиком был зарегистрирован при давлении 17,8 ГПа, а время разложения составило 0,48 мкс, что вероятно связано с наличием воздушных включений. Для системы гексоген – четыреххлористый углерод профиль с химпиком наблюдался при давлении 23 ГПа. Для системы гексоген – бромформ в измеряемых диапазонах давлений профиля с химпиком не было зафиксировано. До появления химпика профили массовой скорости для всех взрывчатых систем имеют линейный спад (рис. 9 – 11), что свидетельствует о протекании разложения ВВ в волне за наблюдаемые времена без заметного ускорения.

Следует отметить, что значение давлений инициирования детонации во всех случаях превышает давление инициирования монокристаллического гексогена, которое составляет 16,4 ГПа. Возможно, это связано с энергетической аномалией. На рис 12. приведены зависимости давления от температуры ударного разогрева монокристаллического гексогена и наполни-

телей. Как видно при определенных давлениях температура значительно превышает температуру зажигания частиц гексогена, но этот процесс не происходит. Таким образом, основным механизмом разложения гексогена в наполненных системах является механизм взрывного горения с переходом в тепловой взрыв.

В четвёртой главе разрабатывается способ теоретического определения тротилового эквивалента конденсированного ВВ. Показано, что для определения тротилового эквивалента необходимо знать значение максимальной работы, которую совершают продукты взрыва (ПВ) при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды. Для вычисления работы была применена следующая формула, которую предложил К.К. Шведов:

$$A = u_1^2 \frac{k}{k-1} [1 - (\rho_2/\rho_1)^{k-1}] \quad (6)$$

где u_1 , u_1^2 , ρ_1 – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ, плотность ПВ в точке Жуге; ρ_2 – плотность ПВ к концу расширения.

Рассматривалось изменение работы взрыва ПД взрывчатого вещества из точки Жуге до степени расширения ρ_2/ρ_1 и прослеживалось изменение тротилового эквивалента исследуемых ВВ в разных точках расширения ПД. Для этого было необходимо получить значения работы взрыва на всем участке расширения ПД, из точек Жуге до степени расширения ρ_2/ρ_1 .

На рис. 13 приведены графики зависимости работы взрыва ПД гексогена плотностью заряда 1,44 г/см³ (1), системы гексоген – вода 75/25 плотностью заряда 1,43 г/см³ (2), насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см³ (3) и тротила плотностью 1,0 г/см³ (4) от степени расширения ρ_2/ρ_1 рассчитанные по формуле (6). Видно, что все кривые сухих конденсированных ВВ подобны. Кривыми (5) и (6) показаны значения отношений работоспособности водонаполненного гексогена плотностью 1,43 г/см³ и насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см³ соответственно к работоспособности тротила.

Для вычисления тротилового эквивалента проведен анализ полученных результатов расчетов изменения работы на всем участке расширения ПД. Следует отметить, что мера максимального роста работоспособности исследуемых ВВ приходится на начало адиабатического расширения, а именно на первые 10% расширения ПД, далее идет плавное снижение роста работоспособности.

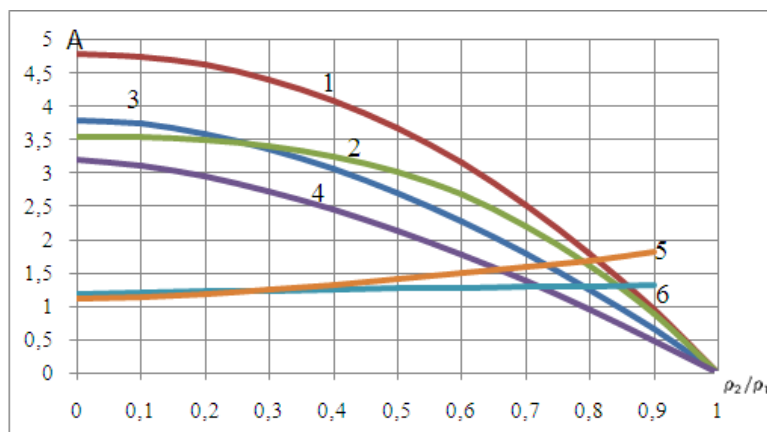


Рис. 13. Зависимость работы взрыва ПД исследуемых ВВ от степени расширения ρ_2/ρ_1 .

При разработке теоретического способа определения тротилового эквивалента конденсированного ВВ предполагалось, что наиболее точным расчетом будет отношение значений работы ПД исследуемого ВВ к значению работы ПД тротила в точке $\rho_2/\rho_1 = 0,9$. Ниже приведена формула (7) для теоретического определения тротилового эквивалента конденсированного ВВ, а в таблице 6 приведены расчетные значения тротилового эквивалента насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см³, водонаполненного гексогена плотностью 1,43 г/см³ и расчетные значения тротилового эквивалента исследуемых продуктов классическими методами по (8) и (9):

$$a_T = \frac{u_1^2 \frac{k}{k-1} (1 - 0,9^{k-1})}{0,49} \quad (7)$$

где a_m – тротильный эквивалент; u_1, u_1^2 – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ; 0,49 кДж/г – работа ПД тротила при $\rho_2/\rho_1 = 0,9$.

$$a_{T1} = \frac{A_{ВВ}}{A_T} \quad (8)$$

$$a_{T2} = \frac{(\eta_{и} * Q_{взр})}{4186 \eta_T} \quad (9)$$

где $a_{T1,2}$ – тротильный эквивалент; $A_{ВВ}$ – работа взрыва ПД исследуемого ВВ; A_T – работа взрыва ПД тротила; Q – удельная теплота взрыва исследуемого ВВ; $\eta_{и}, \eta_T$ – термодинамические коэффициенты взрыва исследуемого ВВ и тротила соответственно.

Таблица 6.

Расчетные значения тротильного эквивалента.

ВВ/система	$\rho, \text{г/см}^3$	$Q, \text{Дж/г}$	$a_{T1} \text{ (8)}$	$a_{T2} \text{ (9)}$	$a_T \text{ (7)}$
гексоген	1,03	5 422	1,33	1,33	1,33
гексоген – вода 0,75/0,25	1,43	6 552	1,82	1,76	1,82

Максимальное значение тротильного эквивалента в точке $\rho_2/\rho_1 = 0,9$ подтверждает максимальный рост работоспособности ВВ на данном участке и может служить в качестве критерия работоспособности исследуемого ВВ.

Предложенная методика расчета тротильного эквивалента конденсированных ВВ, на базе справочных данных, позволяет с хорошей степенью точности определить значения тротильного эквивалента.

В пятой главе исследовались паровоздушные смеси насыщенных углеводородов. Были определены средние концентрации паровоздушной смеси в порожней железнодорожной цистерне из под следующих взрывоопасных грузов: метана (CH_4), этана (C_2H_6) и пропана (C_3H_8). Также теоретически были рассмотрены бутан (C_4H_{10}), ацетилен (C_2H_2), бензин (C_7H_{14}) и ацетон (C_3H_6O), которые также перевозятся в цистернах железнодорожным транспортом. В соответствии с полученными данными изучались изменение работы взрыва ПД рассматриваемых веществ из точек Жуге до степени расширения ρ_2/ρ_1 и изменение тротильного эквивалента исследуемых веществ в разных точках расширения ПД.

В таблице 7 приведены округленные значения концентрации паров метана, этана и пропана, полученные экспериментальным методом. Значения концентраций остальных исследуемых газов были взяты стехиометрическими.

Таблица 7.

Параметры детонации паровоздушных смесей.

Горючее	% горючего	Удельная теплота сгорания Q , кДж/кг	Скорость детонации D , м/с (10)	Массовая скорость U м/с	$a_T(0,9)$ (8)	a_T (9) Классический метод	$a_T(0,9)$ (7)
1	2	3	4	5	6	7	8
метан (CH_4)	5	2799,46	2250,26	945,49	0,27	0,26	0,27
этан (C_2H_6)	5	2839,45	2266,28	952,22	0,27	0,27	0,27
пропан (C_3H_8)	6	2841,61	2267,14	952,58	0,24	0,27	0,24
бутан (C_4H_{10})	6,2	2839,82	2266,42	952,28	0,27	0,27	0,27

1	2	3	4	5	6	7	8
ацетилен (C_2H_2)	7,16	3456,40	2500,39	1050,58	0,33	0,32	0,33
бензин (C_7H_{14})	6,5	2822,11	2259,34	949,30	0,27	0,26	0,27
ацетон (C_3H_6O)	9,7	2996,19	2327,98	978,14	0,29	0,28	0,29

Для прогнозирования параметров процесса детонации необходимо было определить следующие параметры: скорость детонации, детонационную теплоту взрыва и давление ударной волны.

Скорость детонации была рассчитана по следующему выражению:

$$D = \sqrt{2Q(k^2 - 1)} \quad (10)$$

где k – показатель адиабаты продуктов взрыва; Q – детонационная теплота взрыва.

Следует отметить, что показатель адиабаты в газовых смесях во всем диапазоне превращения примерно остается одинаковым и равным $\approx 1,25$.

Результаты расчета скоростей детонации паровоздушных смесей представлены в Таблице 7.

Для нахождения работы, совершаемой продуктами детонации исследуемых паровоздушных смесей, было использовано выражение, предложенное Шведовым К.К. (6).

На рис. 14 приведены зависимости работы взрыва ПД исследуемых паровоздушных смесей и тротила плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ от степени расширения ρ_2/ρ_1 рассчитанные по (6).

Видно, что все кривые паровоздушных смесей подобны. На всем участке расширения паровоздушных взрывчатых смесей наблюдается постоянный рост значений работы взрыва. Монотонный рост наблюдается при 85% расширении ПД всех исследуемых взрывчатых смесей и имеет значения от 1,5 до 2 кДж/г, затем значения работы ПД паровоздушных смесей резко возрастают и при расширении до исходной плотности достигают максимального значения и находятся в пределах от 2,89 до 4,01 кДж/г. Следует отметить, что максимальное значение из всех исследуемых газов имеет ацетилен (C_2H_2), минимальное - пропан (C_3H_8).

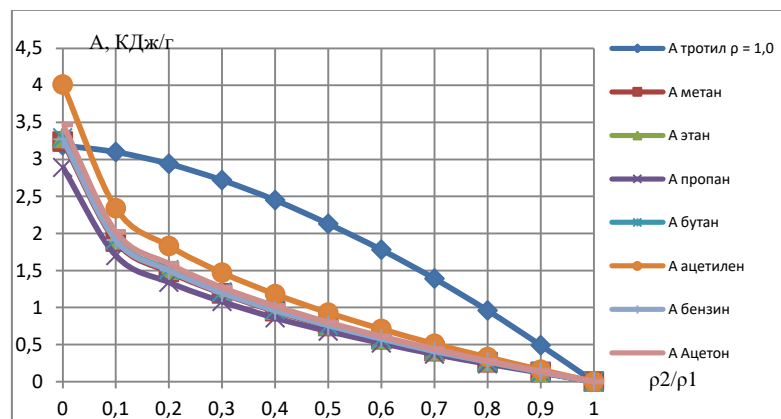


Рис. 14. Зависимость работы взрыва ПД исследуемых веществ от степени расширения ρ_2/ρ_1 .

Кривая конденсированного ВВ отличается от исследуемых паровоздушных смесей. На всем участке расширения ПД тротила плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ наблюдается постоянный рост значений работы взрыва и достигает значения 3,19 кДж/г.

Были определены значения тротилового эквивалента по выражениям (8), (9).

На рис. 15 приведены значения отношений работоспособности исследуемых взрывчатых смесей к работоспособности тротила. Как видно на рис. 15 максимальное значение тротилового эквивалента приходится к концу расширения ПД и лежит в пределах от 0,9 до 1,25 в зависимо-

сти от исследуемой смеси. Однако при степени расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$ наблюдается скачок, что говорит об аномальном энерговыделении, затем небольшое снижения работоспособности и плавный рост. Значения тротилового эквивалента в этой точке колеблются от 0,24 до 0,33, в зависимости от паровоздушной смеси.

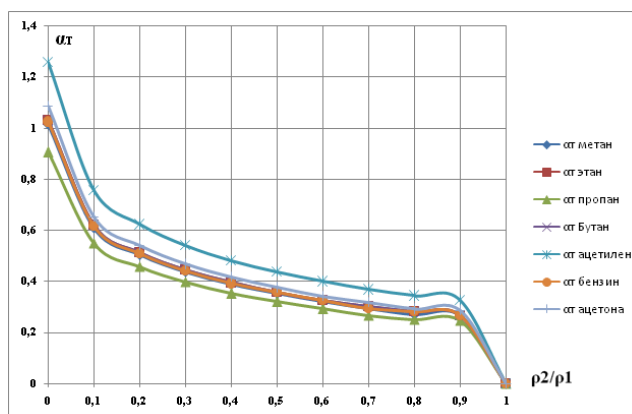


Рис. 15. Зависимость значения отношений работоспособности исследуемых взрывчатых смесей к работоспособности тротила.

Также был проведен расчет тротилового эквивалента по ранее предложенному методу (7), результаты которого представлены в таблице 7.

В таблице 7 приведены значения тротилового эквивалента исследуемых взрывчатых смесей, рассчитанных по (7) и (9). Видно неплохое совпадение полученных результатов.

В пятой главе также был произведен расчет параметров детонации остаточного продукта в конкретной железнодорожной цистерне. Анализ остатков продукта проводился в четырехосной цистерне для сжиженных углеводородных газов и легкого углеводородного сырья, модели 15-1519-01 грузоподъемностью 43 000 кг и объемов котла $75,7 \text{ м}^3$. Данная железнодорожная цистерна оборудована верхними сливо-наливными вентилями, имеет предохранительный клапан. Внутренний диаметр котла равен 3000 мм, наружная длина котла равна 11 260 мм. Рабочее давление в котле 2,08 МПа. Пробное давление в котле при гидравлическом испытании 3 МПа. Средняя концентрация паров углеводородов (газ пропан) составила 6 % от объема котла, которая отвечает стехиометрическому соотношению компонентов.

Скорость детонации было определено по следующему выражению:

$$D = \left(\frac{P_n}{P_0}\right)^3 C_0 \quad (11)$$

где $\frac{P_n}{P_0}$ - отношение плотностей в зоне химической реакции и начальной; C_0 - скорость звука в продуктах детонации.

Результаты расчета скоростей детонации паровоздушной смеси представлены в таблице 8.

Теплота взрывчатого превращения, измеряемая в калориметре, является интегральной характеристикой взрывчатого вещества и представляет собой суммарный тепловой эффект первичных химических реакций, протекающих во фронте детонационной волны, и вторичных равновесных реакций, происходящих при адиабатическом расширении продуктов детонации после завершения детонации.

Наиболее определенной термодинамической величиной является Q_{\max} , отвечающая максимальному тепловому эффекту, возможному при взрыве паровоздушной смеси, и наибольшему значению энтропии S системы. Максимальная теплота взрыва достигается в том случае, когда образуются высшие окислы горючих элементов, содержащихся в данном продукте. Q_{\max} является константой и не зависит от начальных и конечных параметров состояния продуктов взрыва.

Экспериментальные данные теплоты взрыва были заимствованы с других работ и представлены в таблице 8.

Таблица 8.

Параметры детонации и значения тротилового эквивалента исследуемой паровоздушной смеси.

Горючее	% горючего	$Q_{\text{эксп}}$ кДж/кг	D (10) м/с	D (11) м/с	U (13) м/с	P (12) МПа	a_T (9) Клас- сический ме- тод	$a_T(0,9)$ (7)
C_3H_8	6	2801	1802,6	1957	897,7	2,23	0,27	0,24

Давление ударной волны за зоной химической реакции было рассчитано по формуле:

$$P = \rho * D * U; \quad (12)$$

где U – массовая скорость, которая может быть вычислена по следующей формуле:

$$U = \frac{D}{k+1}; \quad (13)$$

Полученные результаты массовой скорости и давления представлены в Таблице 8.

Для определения тротилового эквивалента было использовано два метода - классический (9) и предложенный выше (7).

Полученные значения приведены в таблице 8, а расчетные значения мощности взрыва всей массы паровоздушной смеси составило 5,184 кг в тротиловом эквиваленте.

При разработке способа флегматизации паровоздушной смеси теоретически были рассмотрены несколько инертных смесей. Для примера на рис. 16 приведена общая для метана и пропана зависимость изменения концентрационного предела распространения пламени от содержания разных флегматизаторов в смеси.

Смеси, находящиеся внутри кривых на рис. 16. (в «полуострове воспламенения»), относятся к взрывоопасным, а концентрация флегматизатора в пике «полуострова» соответствует минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора и позволяет рассчитать минимальное безопасное содержание кислорода.

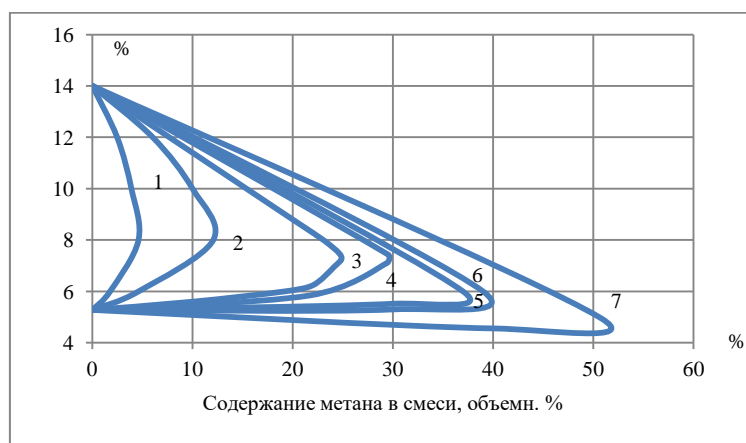


Рис. 16. Зависимость концентрационного предела распространения пламени от содержания флегматизатора в смеси. Линии: 1 – бромистый метил, 2 – тетрахлорметан, 3 – двуокись углерода, 4 – водяной пар, 5 – азот, 6 – гелий, 7 – аргон.

Самым дешевым инертным компонентом является газ азот. Однако, при применении данного газа в качестве флегматизатора он имеет существенный недостаток, который заключается в следующем: при заполнении котла цистерны, оборудованной верхними сливо-наливными вентилями данный газ, имея меньшую молярную массу по сравнению с воздухом и большинства легких углеводородов, не смещает паровоздушную смесь находящуюся в устойчивом равновесии. Данную паровоздушную смесь он лишь разбавляет до нижнего концентрационного пре-

дела распространения пламени. При нарушении герметичности цистерны (опрокидывание) во внутренней полости котла состав паров углеводородов будет смешан с кислородом окружающего воздуха, а флегматизирующий компонент выйдет в атмосферу. Тем самым паровоздушная смесь становится пожаро-взрывоопасной.

Самым легкодоступным флегматизатором является углекислый газ (CO_2), т.к. его получают на мембранных установках разделения воздуха как побочный продукт получения чистого кислорода, азота и аргона. Данный газ за счет своей массы вытесняет воздух и часть паровоздушной смеси в атмосферу. Таким образом, он осуществляет не только разбавление горючей смеси, но и в случае возникновения процесса воспламенения, он по принципу Ле Шателье, усиливает процесс, направленный на компенсацию внешнего воздействия. Данное обстоятельство позволяет даже при незначительном разбавлении паровоздушной смеси значительно снизить риск взрывного превращения.

Было предложено техническое решение, в результате которого железнодорожная цистерна оборудуется предохранительными щитами с системой вертикальных и горизонтальных усиливающих ребер, на платформе которой по обеим продольным сторонам дополнительно установлены по два съемных баллона с инертным газом (CO_2), предназначенных для заполнения объема котла цистерны. Флегматизация паровоздушной смеси в котле железнодорожной цистерны достигается тем, что заполнение инертным газом CO_2 происходит через опущенный внутрь котла на глубину $2/3$ диаметра Т-образный сифон. Таким образом, плавное заполнение внутреннего объема котла цистерны инертным газом CO_2 приводит к вытеснению взрывоопасной паровоздушной смеси через верхний сливо-наливной ventиль. После опустошения четырех баллонов данный ventиль перекрывается, а объем котла цистерны остается полностью заполненным инертным газом CO_2 . На данный способ флегматизации был получен патент на полезную модель.

ВЫВОДЫ:

1. С целью определения степени опасности водонаполненного гексогена определена чувствительность исследуемого продукта к удару. Установлено, что чувствительность водонаполненного гексогена в приборе 1 и 2 значительно ниже, чем у сухого продукта и вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ВВ при их перевозке. Из проведенных 25 испытаний водонаполненной системы в приборе 1 не последовало ни одного взрыва. Нижний предел чувствительности или максимальная высота сбрасывания груза массой 10 кг на навеску исследуемого ВВ, при которой не произошло ни одного взрыва составила 400 мм.

2. Показано, что наполнение гексогена различными по физическим и химическим свойствам исследуемыми веществами (бромформ, ацетон, спирт, формамид, вода, этаноламин, ацетамид и гидрозингидрат) приводит к увеличению параметров детонации и к увеличению детонационной теплоты взрыва.

3. На основе полученных результатов скорости детонации систем гексогена с различными наполнителями и ее зависимости от скорости звука предложен новый метод расчета скорости детонации наполненного гексогена. Показано, что данный метод определения скорости детонации с использованием данных по скорости звука является относительно точным, а максимальное расхождение расчетной и экспериментальной скорости детонации составило ~ 3%. Скорость детонации является одним из основных параметров в определении степени безопасности ВВ.

4. Для сопоставления детонационной способности водонаполненного и насыпного гексогена определены критические диаметры и критическое давление инициирования зарядов. Критический диаметр водонаполненного гексогена составил 19 мм, а критическое давление инициирования заряда водонаполненного гексогена составило 3,4 ГПа. Показано, что водонаполнение приводит к снижению детонационной чувствительности, что существенно влияет на безопасность перевозок и хранение водонаполненного продукта.

5. Методом торможения границы раздела определены значения давлений ударной волны для устойчивого инициирования наполненных систем гексогена. Давления инициирова-

ния водонаполненного крупнокристаллического гексогена составило 19,6 ГПа, гексоген – четыреххлористый углерод – 23 ГПа, гексоген – бромформ в измеряемых диапазонах зафиксировать не удалось. Давления инициирования наполненных систем гексогена превышают давление инициирования монокристаллического гексогена, которое составляет 16,4 ГПа. Полученные результаты подтверждают повышение безопасности при транспортировке и хранении наполненных ВВ.

6. Разработан теоретический способ определения тротилового эквивалента конденсированных ВВ и паровоздушных смесей. Показано, что данный метод расчета тротилового эквивалента исследуемых продуктов, на базе справочных данных, позволяет с хорошей степенью точности определить значения тротилового эквивалента, который может быть использован для корректного расчета безопасных расстояний между местами расположения ВВ при их транспортировке и хранении.

7. На конкретном примере произведен расчет тротилового эквивалента при взрыве оставшихся продуктов (метан, этан, пропан, бутан, ацетилен, бензин и ацетон) в железнодорожной цистерне.

8. Предложен и обоснован безопасный способ транспортных операций с паровоздушными смесями путем их флегматизации инертным газом CO_2 . Данный газ за счет своей массы вытесняет воздух, и часть паровоздушной смеси в атмосферу. Таким образом, он осуществляет не только разбавление горючей смеси, но и в случае возникновения процесса воспламенения, по принципу Ле Шателье, усиливает процесс, направленный на компенсацию внешнего воздействия. Данное обстоятельство позволяет даже при незначительном разбавлении паровоздушной смеси значительно снизить риск взрывного превращения. Предложенный способ флегматизации защищен патентом на полезную модель.

9. В совокупности полученные результаты по исследованию процессов взрывчатого превращения конденсированных и газообразных взрывчатых систем позволяют повысить безопасность транспортных операций при наличии взрывчатых систем и безопасность хранения ВВ.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях ВАК РФ:

1. Кривченко А.Л., Клюстер И.А. Инициирование детонации ударными волнами в насыпном и водонаполненном промышленном гексогене // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2013. №4 (40). С 202-205.

2. Кривченко А.Л., Клюстер И.А. Некоторые вопросы безопасности транспортировки и хранения водонаполненного гексогена // Вестник транспорта Поволжья. 2014. №3 (45). С 76-78.

3. Кривченко А.Л., Клюстер И.А. Расчет параметров взорвавшихся остатков пропана – воздушной смеси вагона цистерны // Вестник института проблем естественных монополий: техника железных дорог. 2014. №3 (27). С 50-52.

4. Кривченко А.Л., Клюстер И.А., Васильева О.М. О методах определения тротилового эквивалента водонаполненного гексогена по уточненным методикам // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. 2015. №2 (46). С 134-138.

Публикации в других изданиях и материалах научно-технических конференциях:

5. Кривченко А.Л., Клюстер И.А., Тютяев А.В. Критерии безопасности водосодержащих составов // Сб. тез. докл. междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения». Саров. 2015. С 65-67.

6. Кривченко А.Л., Клюстер И.А., Тютяев А.В. Критерии безопасности водосодержащих составов // Сб. трудов междунар. конф. «XVII Харитоновские тематические научные чтения». Саров. 2015. С 81-86.

Авторские свидетельства:

7. Кривченко А.Л., Клюстер И.А. Железнодорожная цистерна. Патент РФ RU №130939 U1. 2013.