

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Самарский государственный технический университет»

На правах рукописи

Клюстер Иван Александрович

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

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

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Кривченко А. Л.

Самара 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Литературный обзор.....	7
1.1. Общие сведения при перевозке опасных грузов.....	7
1.2. Существующие методы определения чувствительности взрывчатых веществ к удару.....	9
1.3. Методы определения детонационных и ударно-волновых характеристик.....	19
1.4. Расчет детонационных параметров в паровоздушных смесях.....	23
Глава 2. Чувствительность водонаполненного гексогена к удару	27
Глава 3. Детонация и детонационные способности наполненных систем гексогена	32
3.1. Зависимость параметров детонации от диаметра заряда наполненных систем	34
3.2. Определение детонационных характеристик систем гексоген-наполнитель.....	41
3.3. Определение критического диаметра водонаполненного гексогена и критического давления инициирования зарядов насыпного и водонаполненного гексогена.....	51
3.4. Определение значения давлений устойчивого инициирования наполненных систем гексогена методом торможение границы раздела.....	57
Глава 4. Определение тротилового эквивалента водонаполненного гексогена.....	75
Глава 5. Детонация, условия возбуждения и тротильный эквивалент паровоздушных смесей и условия безопасности при перевозке и наливе.....	81
Выводы.....	99
Список литературы	101

Введение

Исследование кинетики разложения взрывоопасных продуктов является важной составляющей обеспечения безопасности транспортных операций взрывчатых веществ (ВВ) и их хранения. Трагические события в Тяньцзине (КНР) в 2015 г. доказывают необходимость изучения данных процессов. Одним из важных вопросов в этом плане является определение тротилового эквивалента потенциально опасных продуктов, что чрезвычайно важно для обеспечения правильности расчетов безопасных расстояний между местами хранения. Согласно официальных данных за последние 5 лет при транспортировке опасных грузов железнодорожным транспортом и осуществления 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. Согласно реестру при транспортировке опасные грузы делятся на классы опасности: взрывчатые материалы - первого класса, сжиженные газы - второго. 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 (ВМ) к механическим и ударно-волновым воздействиям. Другие опасные транспортные операции, связанные с 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.

Данная работа посвящена рассмотрению вопросов, связанных с особенностями кинетики взрывчатого превращения данных продуктов и определению тротилового эквивалента.

Актуальность работы. Для обеспечения безопасности при транспортировке и хранении взрывчатых материалов, исследуется детонационная способность водонаполненного гексогена и паровоздушных взрывчатых смесей, что является важной задачей для повышения уровня безопасности объектов, а также снижения вероятности схода состава и возникновения аварийных ситуаций, что приведет к минимизации угрозы жизни и здоровья персонала объектов и третьих лиц.

Цели и задачи работы.

1. Комплексное исследование детонационных характеристик наполненных систем гексогена с водой и другими наполнителями.
2. Определение критического диаметра водонаполненного гексогена и критическое давление инициирования зарядов водонаполненного гексогена.
3. Разработка метода определения тротилового эквивалента водонаполненного гексогена.
4. Прогнозирование параметров детонации паровоздушной смеси и разработки метода флегматизации свободного пространства цистерны вагона.
5. Определение тротилового эквивалента взрыва паровоздушной 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 (ПД) 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.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Результаты исследований могут быть использованы для определения безопасных расстояний между хранилищами при хранении ВВ.

2. Разработан теоретический метод определения скорости детонации наполненных систем гексогена.

3. Разработан теоретический метод определения тротилового эквивалента ВВ.

4. Предложен безопасный способ транспортных операций с паровоздушными смесями путем их флегматизации инертным газом CO_2 .

Научные положения и результаты исследования, выносимые на защиту:

- 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;

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.

Глава 1. Литературный обзор

1.1. Общие сведения при перевозке опасных грузов.

Вопросы, связанные с безопасностью обращения с опасными грузами, в том числе их транспортировка, хранение и дальнейшие погрузо-разгрузочные операции, исследованы довольно подробно. Первостепенные требования к транспортировке и хранению опасных грузов изложены в работах [1-7]. Известен порядок классификации и идентификации опасных грузов, их маркировка и подвижной состав для их транспортировки [5, 8]. Порядок действий при возникновении аварийных ситуаций с вагонами, загруженными опасными грузами подробно описан в работах [9-10]. Известно, что большая доля перевозимых опасных грузов приходится на взрывчатые материалы первого класса опасности и газы принадлежащие второму классу.

Источниками непроизвольного инициирования взрывчатых веществ могут быть как механические, так и в некоторых случаях возможны диверсионные, включающие ударно – волновые воздействия. Возбуждение взрывчатого превращения при механическом воздействии происходит за счет диссипации энергии, вследствие чего, происходит локальный разогрев вещества, который приводит к самовоспламенению в некотором объеме, если выполняются условия теплового взрыва [11-16]. В дальнейшем образуется фронт химической реакции, который может распространяться из центра инициирования по заряду [17]. Таким образом, возбуждение и распространение взрыва носят макроскопический характер описываемый методами механики сплошной среды и теории теплового взрыва [18]. Экспериментальные исследования распространения взрывных ударных волн были рассмотрены в работах [19-25].

Для определения чувствительности взрывчатых материалов к механическим воздействиям и возможности их транспортировки в разных странах используются некоторые методики.

1.2. Существующие методы определения чувствительности взрывчатых веществ к удару

Наиболее важную роль при транспортировке взрывчатых веществ первого класса играет их чувствительность к механическим воздействиям. Определение чувствительности ВВ к механическим воздействиям насчитывает несколько десятков методов, разработанных в различных странах, значительная часть которых предусматривает измерение чувствительности твердых и жидких ВВ к удару падающим грузом. Данные методы разработаны для определения опасности взрывчатого вещества при транспортировке и хранении. В зарубежных странах существуют различные методики определения чувствительности ВВ [26].

В Канаде для определения чувствительности твердых и жидких ВВ к удару используют «модифицированный прибор типа 1,2» [26], представленный на рис. 1.1.

Сбрасыватель данного прибора способен вертикально сбрасывать по трем направляющим груз массой от 1,0 до 5,0 кг с высоты до 3 метров на промежуточную гирю, уложенную поверх помещенного на наковальню образца. Испытание оценивается как положительное, если образец реагирует со звуком, происходит выделение дыма или запаха и если имеется видимое свидетельство воспламенения. Результат испытания рассматривается как «+», если медианная высота падения равняется или составляет менее медианной высоты падения, установленной для сухого гексогена, и вещество считается слишком опасным в том виде, в каком оно испытывалось. Результат испытания рассматривается как «-», если медианная высота падения превышает медианную высоту падения, установленную для сухого гексогена.

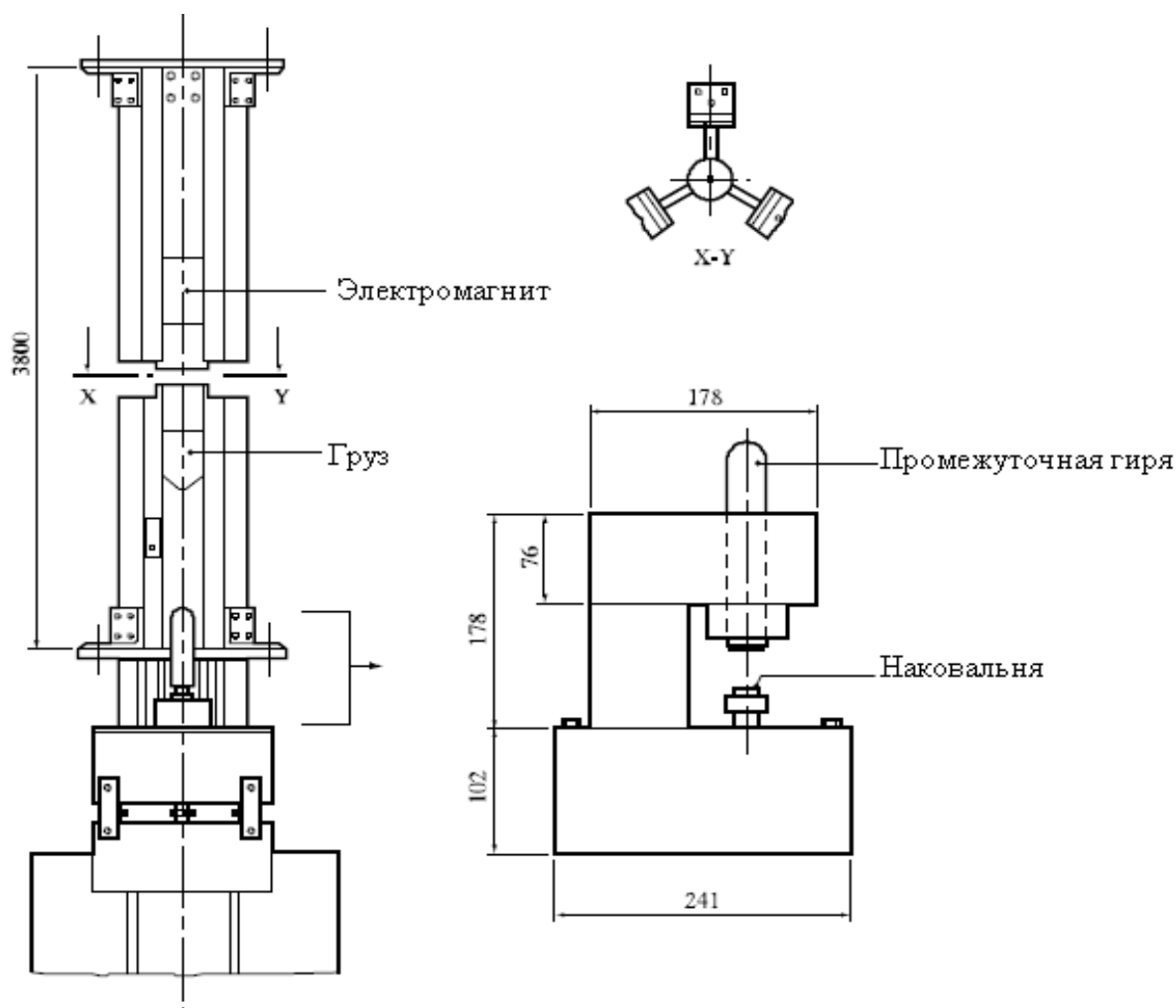


Рис. 1.1. Модифицированный ударный прибор типа 1,2. Общий вид, вид сверху и увеличенный вид сбоку.

В США для измерения чувствительности твердых и жидких ВВ используют «установку для ударных испытаний бюро взрывчатых веществ» [26], представленную на рис. 1.2.

Данный прибор устроен так, что груз весом 3,63 кг свободно падает между двумя параллельными цилиндрическими направляющими штангами с предварительно установленной высотой на блок «плунжер – пробка». Этот блок находится в контакте с опытным образцом, который в свою очередь помещен на блок «штамп – наковальня» и накрыт цилиндрическим кожухом, внутренний диаметр которого позволяет лишь обеспечить свободное движение плунжера и

пробки. Плунжер, пробка, штамп, кожух и наковальня изготовлены из закаленной инструментальной стали, а сопряженные поверхности и поверхности, контактирующие с образцом вещества, имеют покрытие толщиной 0,8 микрона.

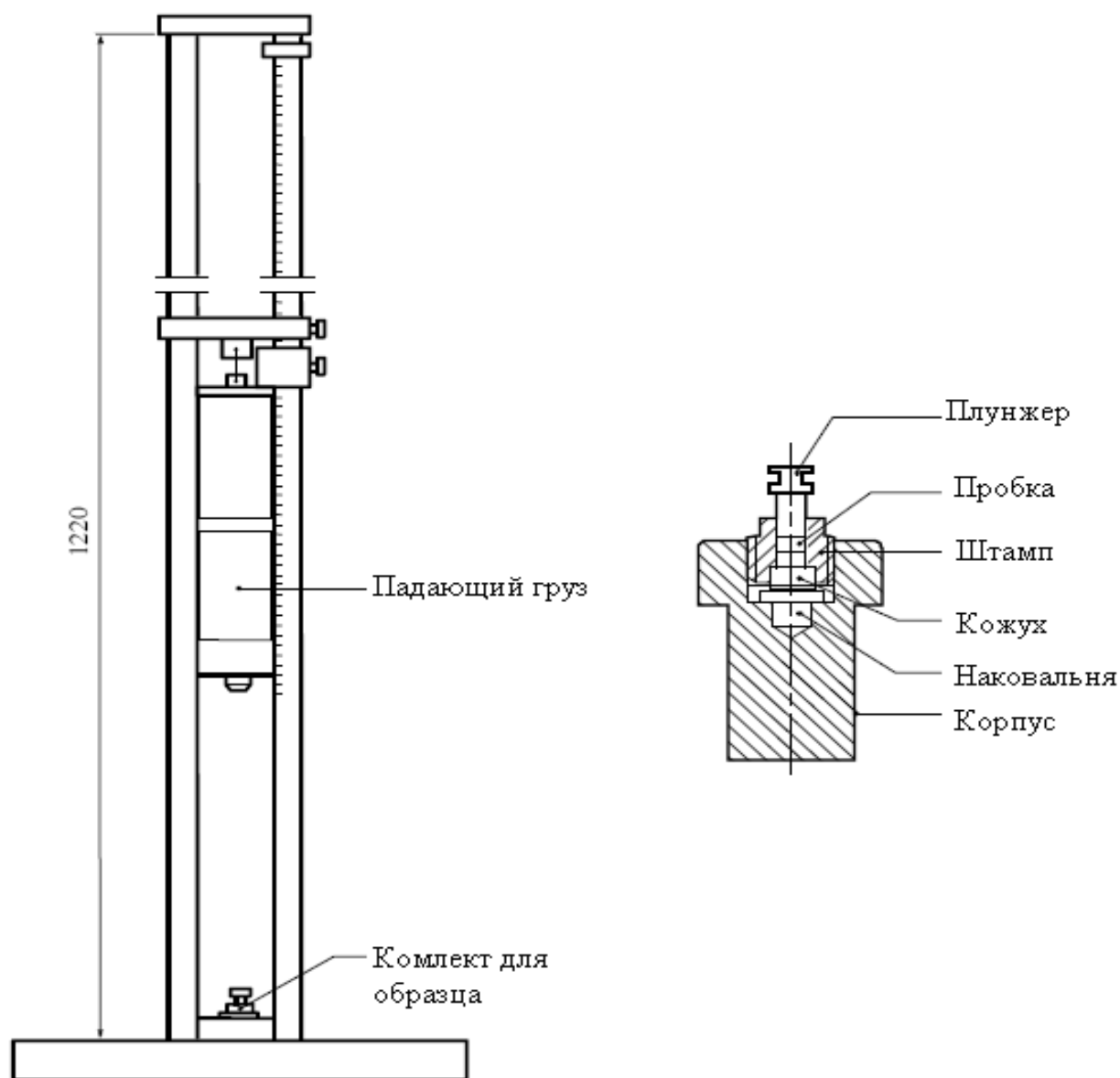


Рис. 1.2. Схема установки для ударных испытаний бюро взрывчатых веществ, вместе с комплектом для опытного образца.

Результат испытания считается положительным «+», если в ходе, по меньшей мере, пяти испытаний из десяти, проведенных при высоте 10 см, был слышен звук взрыва или было видно пламя, и вещество считается слишком

опасным для перевозки в том виде, в каком оно испытывалось и должно перевозиться в флегматизированном состоянии. В противном случае результат считается отрицательным «-».

В Германии для определения чувствительности твердых и жидких ВВ к удару падающим грузом используют «копер БИМ» [26], представленный на рис. 1.3.

Основными элементами копра являются: блок из литой стали с основанием, наковальня, стойка, направляющие рейки, падающие грузы с пусковым устройством и ударное приспособление. Каждый груз имеет два направляющих паза, удерживающих его на направляющих рейках при падении, стержень подвески, съемную цилиндрическую ударную головку и стопор отскока, которые привинчиваются к корпусу груза. Ударная головка изготавливается из закаленной стали. Ее минимальный диаметр составляет 25 мм. Предусмотрены три груза – массой 1 кг, 5 кг и 10 кг. При испытании опытный образец помещается в ударное устройство, состоящее из двух коаксиальных стальных цилиндров, расположенных один над другим в пустотелом цилиндрическом стальном направляющем кольце. Ударное устройство устанавливается на промежуточную наковальню и фиксируется по центру с помощью центрирующего кольца с кольцом вентиляционных отверстий для выпуска газов.

Предельная энергия удара, характеризующая чувствительность веществ к удару, определяется как самая низкая энергия удара, при которой результат «взрыв» получен, по крайней мере, в одном из не менее шести испытаний. Энергия удара рассчитывается исходя из массы падающего груза и высоты падения. Например, $1 \text{ кг} \times 0,5 \text{ м} \approx 5 \text{ Дж}$.

Результат испытания считается «+», если наименьшая энергия удара, при которой в ходе шести испытаний произошел, по крайней мере, один «взрыв», составляет 2 Дж или менее, и вещество считается слишком опасным для

перевозки в том виде, в каком оно испытывалось. В противном случае результат рассматривается как «-».

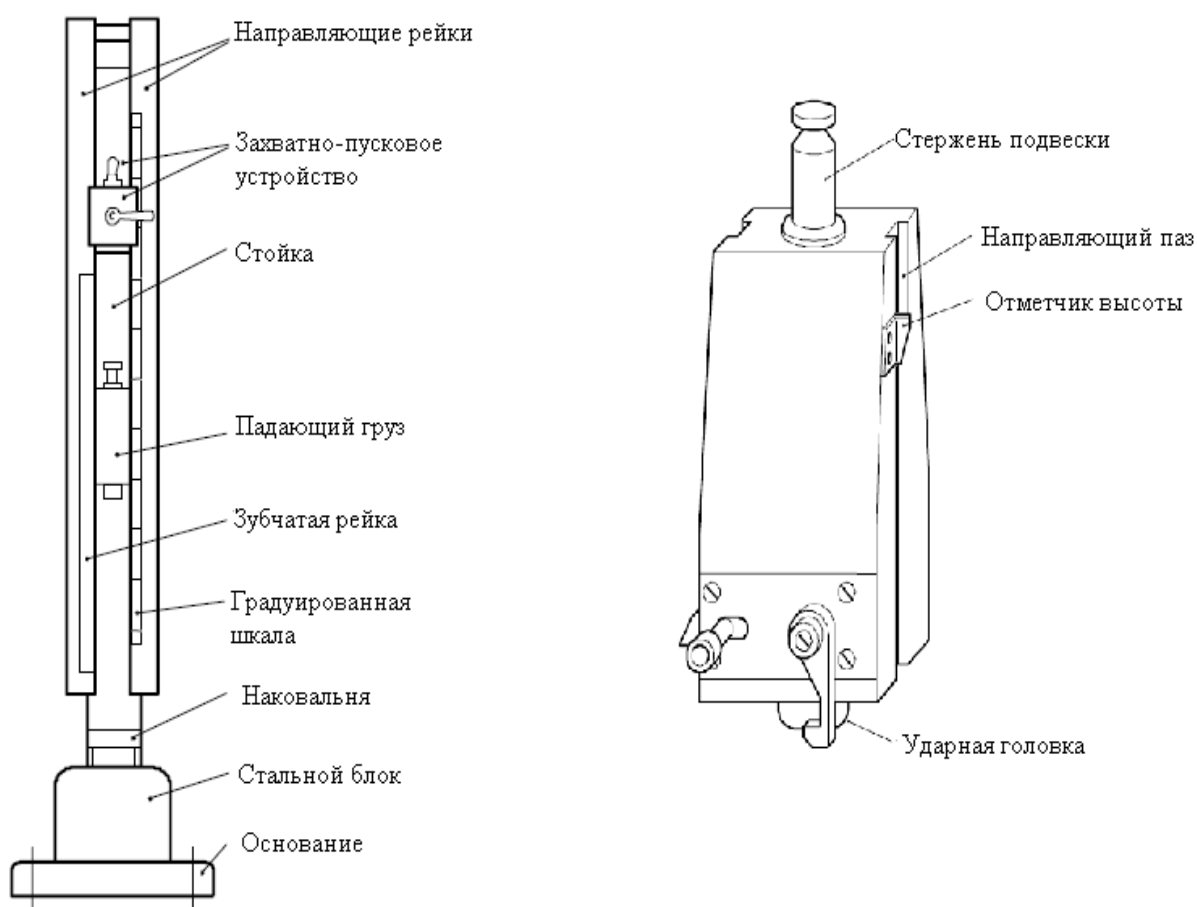


Рис 1.3. Схема копра БИМ и схема падающего груза.

Во Франции для измерения чувствительности твердых и жидких ВВ к удару падающего груза используют «30 – килограммовый копер» [26], представленный на рис. 1.4.

Стальной лоток данного устройства имеет следующие размеры: толщина стенки - 0,4 мм, глубина - 8 мм, ширина 50 мм, длина – 150 мм. Лоток равномерно наполняют опытным веществом на глубину 8 мм и устанавливают на наковальню таким образом, чтобы молот попал в точку на оси лотка, удаленную от одного конца на 25 мм. Молот сбрасывается с высоты от 0,25 до 4 м, с шагом 0,25м. Считается, что распространение детонации произошло в том случае, если на

расстоянии не менее 100 мм от точки удара по образцу наблюдаются последствия взрыва, в первую очередь деформация стенок лотка. Для каждой высоты проводится три испытания. Предельной высотой падения является наивысшая точка, при которой в ходе трех испытаний не происходит взрыв. Если при высоте падения 4 м не наблюдается распространение, предельная высота регистрируется как ≥ 4 м.

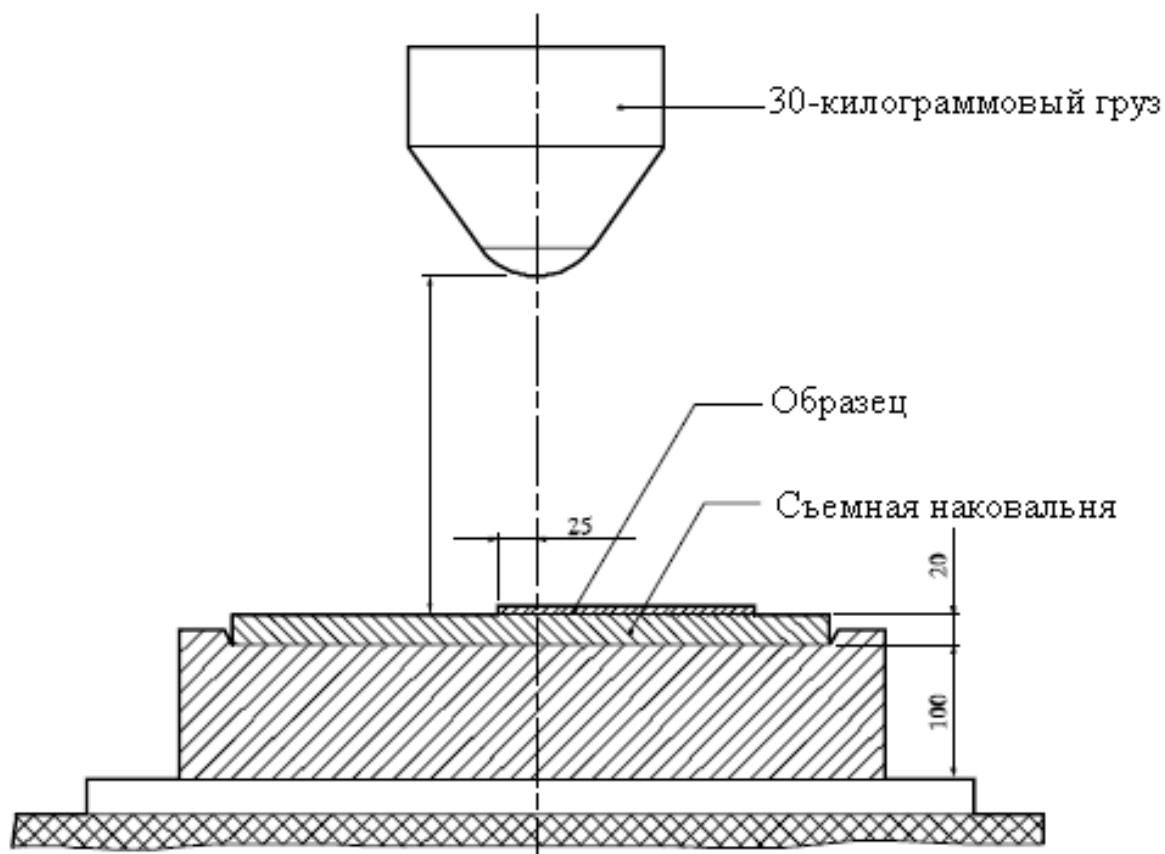


Рис. 1.4. Схема 30-килограммового копра.

Результат испытания рассматривается как «+», если предельная высота сбрасывания составляет менее 0,75 м, и вещество считается слишком опасным для перевозки в том виде, в каком оно испытывалось. Результат испытания рассматривается как «-», если предельная высота падения равна или составляет более 0,75 м.

В Англии для измерения чувствительности твердых и жидких ВВ к удару падающего груза проводят «испытание по Роттеру» [26], представленное на рис. 1.5.

В данном методе используют пятикилограммовый груз. Вещество, отмеряемое с помощью мерки, помещается в чашки, а вещества с малой объемной плотностью набиваются путем трамбовки. Загруженная чашка помещается на наковальню таким образом, чтобы избежать переворачивания чашки до того, как вещество войдет в контакт с верхом наковальни. Затем чашку переворачивают так, чтобы взрывчатое вещество распространилось равномерно, камеру закрывают. Ударник располагают так, чтобы он находился в контакте с чашкой, а камеру помещают в нужном положении в устройство. Логарифмы стандартной высоты падения располагаются в линейном масштабе. Начальные высоты падения, позволяющие приступить к испытаниям опытного образца и стандартного вещества, определяются путем интерполяции между ближайшими позициями «да» (воспламенение) и «нет» (отсутствие воспламенения) до тех пор, пока они не произойдут на соседних уровнях. В ходе обычного испытания проводится 50 серий испытаний. Если применяется процедура сравнительного испытания образцов, чашки со стандартным веществом и опытным образцом испытываются поочередно. При испытании взрывчатого вещества считается, что имеет место результат «да», если манометром регистрируется один или несколько кубических сантиметров газовых продуктов взрыва или если об этом свидетельствует нестандартное неустановившееся движение жидкости в манометре, что должно подтвердиться наличием дыма после открытия корпуса наковальни.

Результаты испытания оцениваются исходя из сравнения средней медианной высоты падения стандартного вещества (H_1) с медианной высотой падения образца (H_2) с помощью следующего уравнения:

Показатель нечувствительности (ПНЧ) = $80 \times H_2/H_1$, если $H_2 \geq 200$ см, величина ПНЧ > 200.

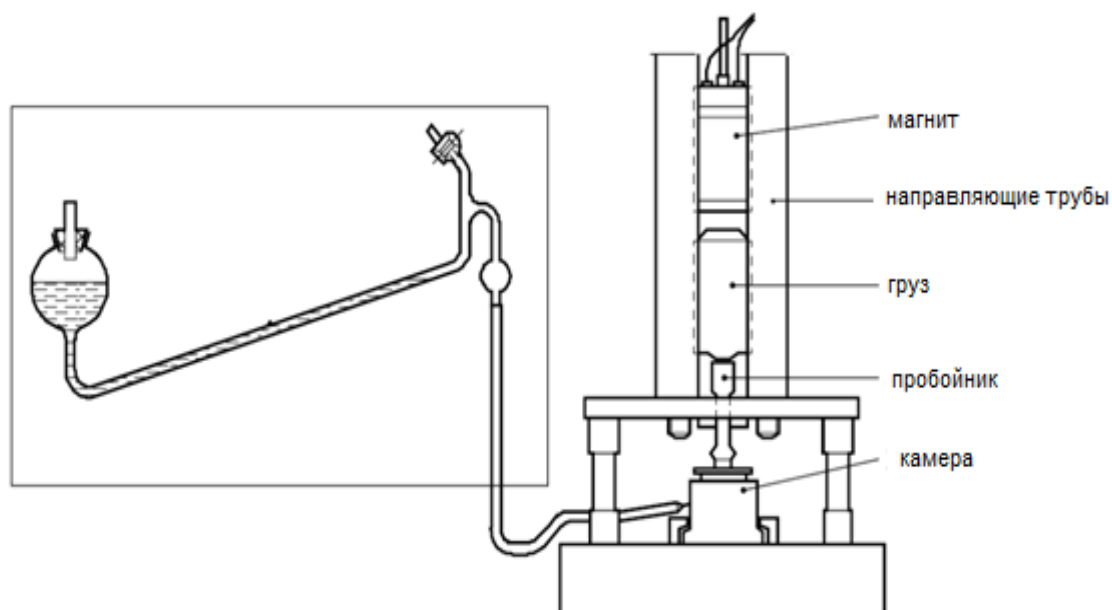


Рис. 1.5. Схема копра Роттера. Общий вид.

Результат испытания рассматривается как «+», если ПНЧ меньше или равен 80, и вещество считается слишком опасным для перевозки в том виде, в каком оно испытывалось. Результат испытания рассматривается как «-», если ПНЧ больше 80.

В нашей стране для определения чувствительности твердых и жидких ВВ к удару, в соответствии с ГОСТ 4545-88, используют «Установку для ударных испытаний» [26], приведенную на рис. 1.6.

Данный метод предусматривает использование трех комплектов приборов. Первый используют для определения частоты взрывов твердых ВВ. Для определения нижнего предела чувствительности к удару твердых ВВ используют второй комплект. Для определения нижнего предела чувствительности к удару и частоты взрывов жидких ВВ используют третий комплект прибора [26, 27].

Нижний порог чувствительности ВВ к удару определяется как максимальная высота сбрасывания 10-килограммового стального груза, не

дающая положительных результатов при 25 испытаниях. Высота сбрасывания груза лежит в диапазоне от 50 до 500 мм.

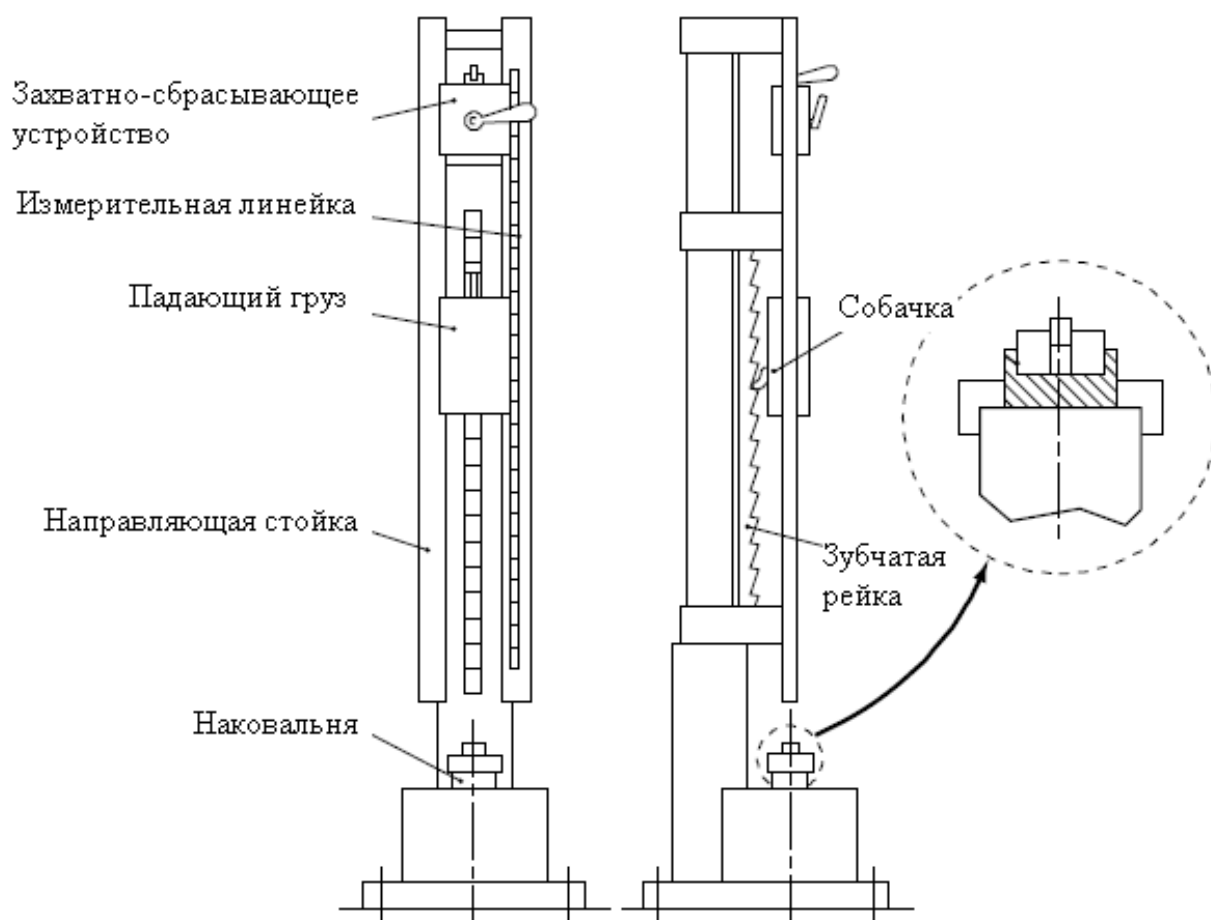


Рис. 1.6. Схема установки для ударных испытаний.

Как положительная реакция расцениваются звуковой эффект, вспышка или следы горения на роликах. Изменение цвета образца не рассматривается как признак взрыва. Результаты испытания рассматриваются как «+», если наименьшая высота, при которой получен положительный результат в ходе испытания комплекта 2, составляет менее 100 мм, и вещество считается слишком опасным для перевозки в том виде, в каком оно испытывалось. Результат рассматривается как «-», если наименьшая высота, при которой получен положительный результат в ходе испытания комплекта 2 равняется или превышает 100 мм.

Используется также упрощенный метод испытания чувствительности по так называемой «русской пробе». Согласно данному методу на навеску взрывчатого материала массой 0,05 г. сбрасывается груз с высоты 250 мм.

Превосходством данного метода в сравнении с выше рассмотренными является относительно низкая стоимость расходных комплектующих материалов.

Данным методом определяется относительная чувствительность взрывчатых материалов по четырем взрывчатым веществам: ТНТ (4-8%) → тетрил (32%) → гексоген (72-76%) → тен (100%).

Не менее важным направлением в изучении чувствительности ВВ является определение их ударно-волновой чувствительности и детонационных характеристик, которые определяются различными методами.

1.3. Методы определения детонационных и ударно-волновых характеристик.

Для измерения параметров детонации широко используются как общезначимые методы (оптический [28], метод манганинового датчика [29], откольный метод [29]), так и специально разработанные [30-38]. Наибольшей простотой и информативностью обладает электромагнитный метод определения параметров детонации [29,39-42], который позволяет одновременно определить скорость детонации и массовую скорость процесса.

Впервые данный метод был предложен академиком Е.К. Завойским и введен в практику исследовательских работ А.Н. Дреминым [43]. Сущность электромагнитного метода заключается в измерении скорости движения вещества за фронтом детонационной волны. В образце перпендикулярно его оси располагается проводник (датчик). Образец помещается в постоянное электромагнитное поле так, чтобы при движении рабочая плоскость датчика пересекала силовые линии магнитного поля. При прохождении детонационной волны по образцу датчик вовлекается в движение продуктами взрыва, а ЭДС, наведенная на его концах, измеряется с помощью осциллографа. ЭДС индукции связана со скоростью движения проводника, его длиной и напряженностью магнитного поля следующим соотношением:

$$\varepsilon = 10^{-8} N l u \quad (1)$$

где N – напряженность магнитного поля, А/м;

u – скорость движения проводника, м/с;

l – длина проводника, см.

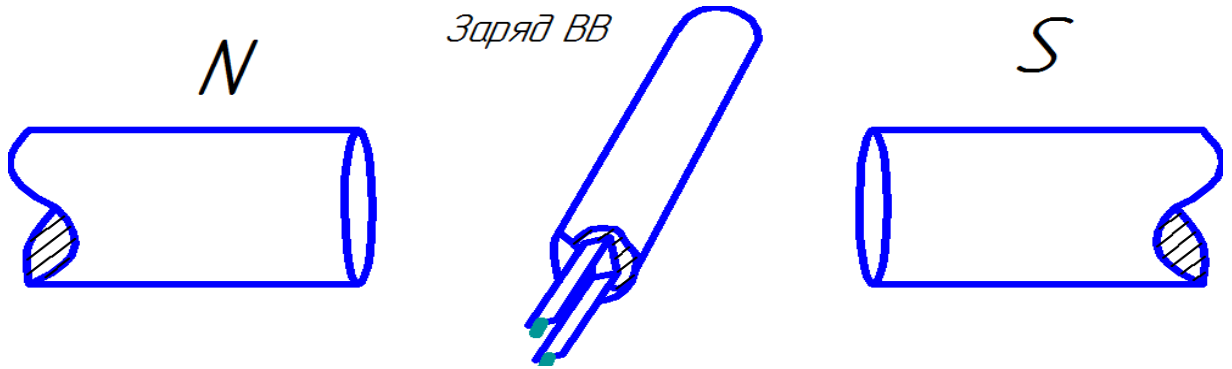


Рис. 1.7. Принципиальная схема постановки эксперимента по замеру массовой скорости движения вещества электромагнитным способом.

Схема расположения заряда с датчиком в магнитном поле приведена на рис. 1.7. Скорость движения проводника легко найти, если известны H , l и ε .

Данный метод предусматривает определение не только массовой скорости, но одновременно на одном заряде определяет скорость фронта детонации D .

Для этого пользуются датчиком с 2-мя переключателями, расположенными на расстоянии S (база). Датчик и полученная осциллограмма процесса при использовании такого датчика представлены на рис. 1.8.

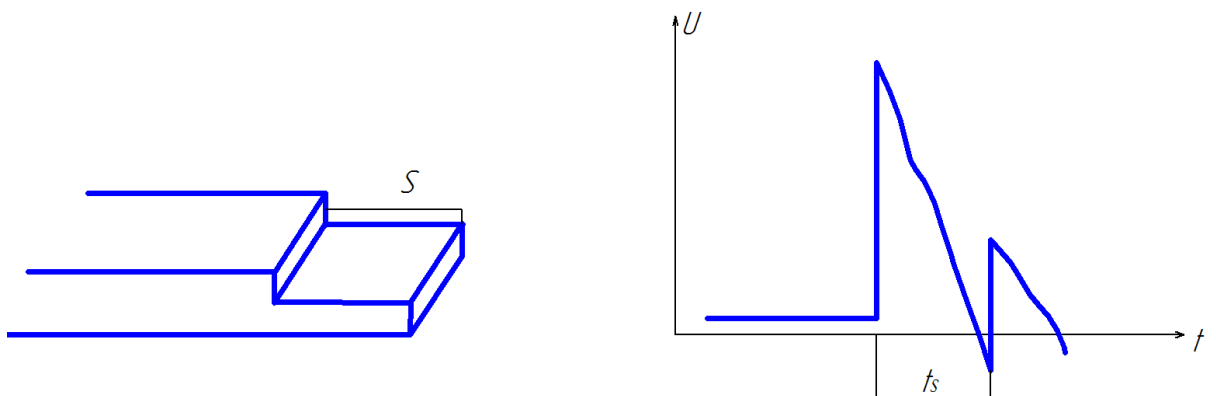


Рис. 1.8. Двухступенчатый датчик и осциллограмма $U=U(t)$, полученная при применении двухступенчатого датчика.

Время, за которое фронт волны проходит расстояние S от одной ступени датчика до другой, представлено на осциллограмме как время t_s между двумя пиками. Зная базу и время, можно определить скорость фронта волны по следующему уравнению:

$$D = S/t_s \quad (2)$$

Точность измерения данного метода лежит в следующих пределах: для скорости детонации D - 1%, для массовой скорости u – 3%. Одновременно этим методом можно изучать кинетику развития процесса распространения ударной волны и время химической реакции.

Процесс развития ударно-волнового инициирования заряда взрывчатого вещества можно определить по развитию процесса, по длине заряда и определить критическое давление инициирования детонационного процесса [44].

Другим интересным методом является предложенный К.К. Шведовым – метод торможения границ разделов. Согласно данному методу, приведенному на рис. 1.9, в пассивный заряд запускается ударная волна прямоугольного профиля, а электромагнитный датчик устанавливается на границе раздела инерт-ВВ. Развитие процесса разложения ВВ определяют по записи динамики процесса изменения массовой скорости. Давление входящей прямоугольной ударной волны регулируется параметрами активного заряда, величиной воздушного зазора и толщиной инертной прокладки.

Параметры детонации паровоздушных смесей могут быть определены экспериментальным методом и с высокой степенью точности могут быть рассчитаны.

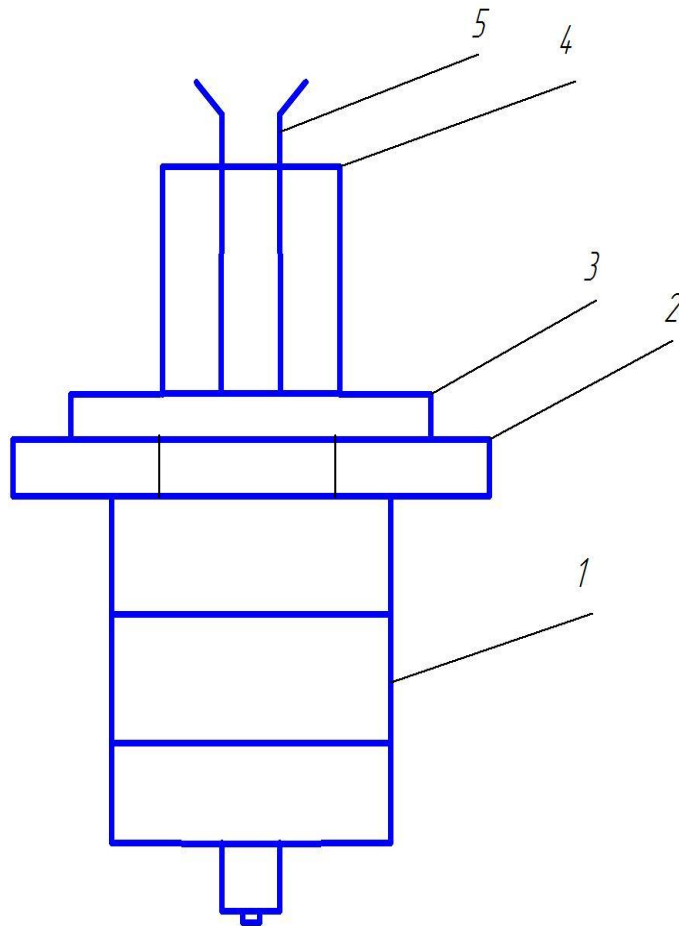


Рис.1.9. Схема эксперимента.

1 - активный заряд;

2 - экран с воздушным зазором;

3 - парафиновая прослойка;

4 – исследуемое ВВ;

5 – электромагнитный датчик.

1.4. Расчет детонационных параметров в паровоздушных смесях.

Одним из основных факторов, влияющих на безопасность транспортировки и хранения нефтепродуктов и газов из класса алканов (насыщенных углеводородов) является наличие паров продукта, концентрационные пределы которого образуют с воздухом взрывоопасную смесь. После слива продукта с котла железнодорожной цистерны за счёт сохранившихся остатков и плёнки на стенках сосуда концентрация паров углеводородов достигает 50 % от объема [45]. В данной работе будет рассмотрено инициирование данного продукта с точки зрения диверсии, т.е. подрыва малым зарядом ВВ или поджога с целью дальнейшего взрыва и разрушения подвижного состава и инфраструктуры. Для этого рассмотрим механизм горения и детонации в газах.

В работах [46,50,113-115] подробно изложен процесс горения и детонации в газах, перевозимых легковоспламеняющихся жидкостей и углеводородного сырья. Детонация в газах обычно происходит в смесях из горючего газа и окислителя, а также инертного газа, чаще всего азота. Пределами взрываемости является концентрация газа в смесях, способных воспламениться. Если концентрация газа в смеси с воздухом будет меньше нижнего предела взрываемости, вспышки не произойдет, так как увеличится расход тепла на нагрев негорючей части смеси и его не хватит для нагрева смеси до определенной температуры. Если концентрация горючих газов будет больше верхнего предела взрываемости, вспышки не произойдет из-за недостатка воздуха (окислителя).

По данным работы [45] скорость распространения взрывной волны смеси паров бензина с воздухом составляет 330 м/с, т.е. приблизительно равна скорости распространения звука. А сила взрыва данной смеси в 2-3 раза превышает взрывную силу дымного пороха в тех же весовых количествах. При взрыве практически мгновенно выделяется теплота реакции горения. Продукты горения также быстро нагреваются и, стремясь расшириться, создают ударную волну.

По данным работ [46 - 48] параметры детонационной волны определяются законами сохранения (массы, импульса, энергии). Воспламенение газовой смеси обусловлено нагревом ее при сжатии ударной волной. В работе [49] предложен расчет температуры в двухатомном идеальном газе с молекулярной массой 29 кг/кмоль при скорости ударной волны 1700 м/с. Расчетная температура составила 1700 К. Данная температура значительно превосходит температуру воспламенения взрывчатых газовых смесей [50].

Согласно гидродинамической теории детонации, расчет параметров детонации за фронтом волны вычисляется решением системы уравнений [51-55]:

$$D = \sqrt{2Q(k^2 - 1)} \quad (3)$$

$$P_2 = 2\rho_1 Q(k - 1) \quad (4)$$

$$u = D/(k + 1) \quad (5)$$

$$\frac{P_2}{\rho_2} = RT \quad (6)$$

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{(k + 1)}{k} \quad (7)$$

где k – показатель политропы расширения продуктов детонации;

Q – детонационная теплота взрыва;

D – скорость детонации;

u – массовая скорость;

P – давление ударной волны за зоной химической реакции.

Автором работы [56] был предложен динамический метод расчета параметров детонации. Согласно данной работе скорость детонации газа может быть рассчитана по следующему уравнению:

$$D = \left(\frac{p_n}{p_0}\right)^3 C_0 \quad (8)$$

где $\frac{p_n}{p_0}$ - отношение плотностей в зоне химической реакции и начальной;

C_0 - скорость звука в газовой смеси.

В этой же работе авторами была сделана попытка сопоставить методы расчета скорости детонации конденсированных ВВ и топливно–воздушных смесей с использованием уравнения ударной адиабаты:

$$D = AC_0 + Xu \quad (9)$$

где u – массовая скорость.

По аналогии с ВВ расчет скорости детонации топливно-воздушных смесей в стехиометрическом соотношении компонентов можно вычислить по следующей формуле:

$$D = 1,2 C_0 + Xu \quad (10)$$

где X – произвольный эмпирический коэффициент, для широкого спектра топливно-воздушных смесей при стехиометрии можно принять равным 1,76.

А показатель политропы для стехиометрических топливно-воздушных смесей имеет вид:

$$k = \frac{1,2 C_0}{\sqrt{\frac{Q}{4}}} + 0,76 \quad (11)$$

Таким образом, авторами данной работы был предложен расчет параметров детонации стехиометрических смесей типа горючее – воздух аналогично с ВВ, а лучшие результаты, полученные методом усреднения, практически совпадают с экспериментальными.

На основании рассмотренного материала в данной главе было установлено, что из всех вышерассмотренных методов определения чувствительности ВВ к удару наиболее удобным для проведения натурных испытаний является метод по ГОСТ 4545-88. Показано, что простым и удобным методом определения детонационных и ударно-волновых характеристик конденсированных ВВ 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. Показано, что усреднение данных методик позволяет получить максимально близкие значения скорости детонации к экспериментальным.

Глава 2. Чувствительность водонаполненного гексогена к удару

Основным способом снижения чувствительности ВМ является их флегматизация и для перевозки таких материалов как гексоген и октоген рекомендовано транспортировать их в водонаполненном состоянии. При транспортировке мощных ВВ, чувствительность к удару является одной из важнейших характеристик, определяющих степень опасности. В настоящее время существуют разные методы определения чувствительности ВВ к удару, описанные выше. Для определения значений чувствительности ВВ к удару в России принято проводить испытания в соответствии с ГОСТ 4545-88. Данный ГОСТ позволяет установить методы определения характеристик чувствительности твердых и жидких ВВ к удару. Прибор 1 используют для определения частоты взрывов твердых ВВ. Для определения нижнего предела чувствительности к удару твердых ВВ используют прибор 2. В данной 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 будет рассмотрена ниже.

Для достижения цели были проведены две серии по 25 опытов с зарядами наполненного гексогена, масса которых составляла $0,050 \pm 0,005$ г. Для опытов использовался насыпной гексоген, просеянный через сито из цветного металла с размером стороны ячеек 1,0 мм. Плотность насыпного гексогена составила $1,03 \text{ г/см}^3$.

Проба ВВ, предназначенного для испытания в соответствии с ГОСТ 4545-88 была массой 10 г. и содержала 7,5 г. насыпного гексогена, перемешенного с 2,5 г. воды.

Такое соотношение компонентов было гарантировано следующим: перед каждым отбором навески проба ВВ была взвешена и перемешена, что исключало

стекание воды с зерен гексогена, а постоянство веса всей пробы на протяжении всего испытания исключали потери воды вследствие ее испарения.

Навеску данного продукта взвешивали на лабораторных микровесах ХР 56. Подготовленный водонаполненный гексоген массой 0,05 г. помещали на ролик прибора №1 рис. 2.1., затем на данный продукт устанавливали второй ролик и, слегка прижимая и вращая, два – три раза верхним роликом разравнивали данный продукт между роликами. Впоследствии прибор с ВВ устанавливали на наковальню копра и сбрасывали груз массой 10 кг с высоты 250 мм, фиксируя при этом наличие или отсутствие взрыва. Было проведено 25 испытаний. За взрыв принимали взрывчатое превращение вещества, сопровождаемое звуковым эффектом, пламенем или следами ожогов на роликах или муфте прибора [57].

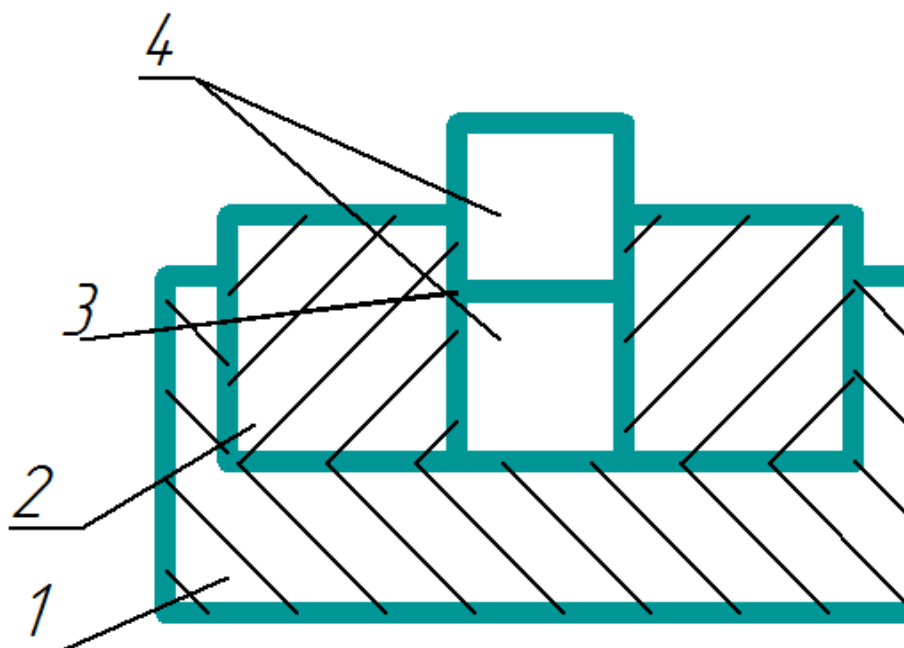


Рис. 2.1. Прибор 1.

- 1 – поддон;
- 2 – муфта;
- 3 – навеска;
- 4 – ролик.

Частость взрывов определяли в процентном соотношении, используя следующее выражение:

$$X_1 = \frac{n_i * 100}{25} \quad (12)$$

где n_i - количество взрывов из проведенных 25 испытаний.

В таблице 2.1. приведены результаты проведенных испытаний.

Таблица 2.1.

Частость взрывов исследуемых ВВ.

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

В целях определения пригодности копра и прибора 1 была проведена серия опытов с использованием насыпного гексогена массой 0,05 г. Частость взрывов сухого продукта составила 72 %, что отвечает требованиям ГОСТ 4545-88.

Из проведенных 25 испытаний водонаполненной системы, как видно из таблицы 2.1, 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. 2.2.

В целях установления первоначальной высоты сбрасывания груза при определении нижнего предела чувствительности к удару водонаполненного гексогена в приборе 2 была определена частость (вероятность) взрывов в этом приборе. Использовалась навеска водонаполненного гексогена массой 0,05 г. Для этого в поддон 1 прибора 2 рис. 2.2. вкладывали муфту 2 положением «канавка

вниз», вставляли в муфту ролик 4 и на ролик помещали навеску испытуемого ВВ массой 0,05 г. На навеску ВВ осторожно устанавливали второй ролик и, слегка прижимая и вращая два - три раза верхним роликом, разравнивали исследуемое ВВ между роликами. Затем верхнюю часть муфты накрывали дополнительным поддоном так, чтобы муфта прибора оказалась в гнезде дополнительного поддона, и прибор переворачивали. Нижний поддон, находящийся сверху, снимали. Слегка нажимали на муфту с целью ее смещения относительно роликов до упора. При этом муфта прибора находилась в положение «канавка вверх», а исследуемое ВВ располагалось напротив канавки муфты. Собранный таким образом прибор был установлен на наковальню копра. Проведено 10 испытаний с грузом 10 кг и высотой сбрасывания 250 мм.

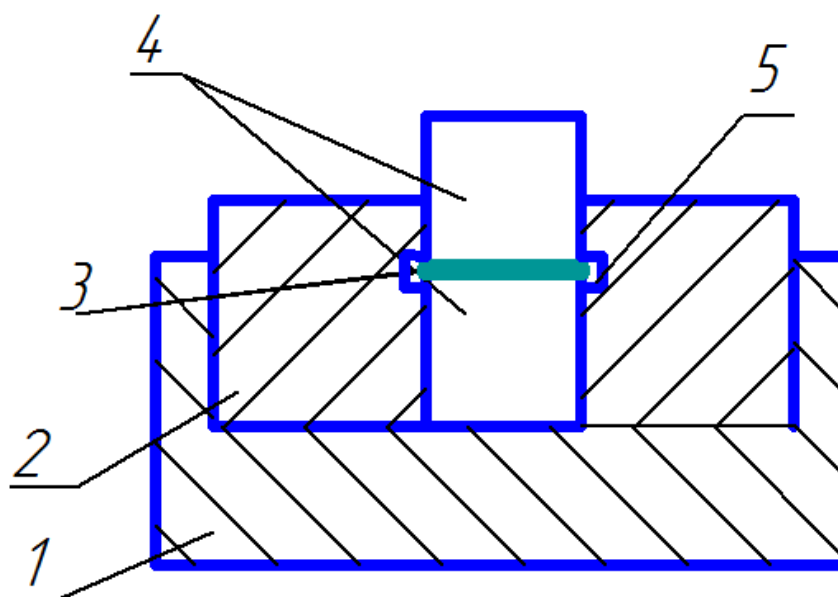


Рис. 2.2. Прибор 2.

- 1- поддон;
- 2- муфта;
- 3- навеска;
- 4- ролик;
- 5 канавка.

В процентном соотношении частота взрывов (X_2) в приборе 2 была вычислена по следующему уравнению:

$$X_2 = \frac{n_i * 100}{10} \quad (13)$$

где n_i - количество взрывов из проведенных 10 испытаний.

Частота взрывов для наполненного гексогена составила - 0 %. В соответствии с ГОСТ 4545-88 при таком значении частоты взрывов первоначальная высота сбрасывания груза составляет 500 мм. Далее была определена максимальная высота сбрасывания груза, при которой не происходило ни одного взрыва из 25 испытаний. Результаты опытов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2.

Значения максимальной высоты сбрасывания груза, при которой не происходило ни одного взрыва из 25 испытаний.

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 2.2. 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 гексогена.

По результатам проведенных опытов была определена чувствительность водонаполненного гексогена к удару в приборах № 1 и 2 в соответствии с ГОСТ 4545-88. Чувствительность водонаполненного гексогена в приборе 1 и 2 значительно ниже, чем сухого продукта и вполне удовлетворяет требованиям, предъявляемым к ВВ при их перевозке.

Глава 3. Детонация и детонационные способности наполненных систем гексогена

Не менее важной характеристикой, определяющей степень опасности ВВ при перевозках, является ударно волновая чувствительность. Механизму разложения наполненных взрывчатых веществ посвящено значительное количество работ [58-63].

В работе [64] определена теплота взрыва водонаполненного гексогена и показано значительное превосходство этой теплоты с монокристаллическим гексогеном [64, 65].

Исследование зависимости критического диаметра водонаполненных систем в зависимости от размера частиц носят не монотонный характер [66]. Эта характеристика является важным показателем детонационной способности ВВ. В данной работе не исследовалось время химической реакции. Таким образом, вопрос о влиянии наполнителя на параметры детонации и энергосодержания в зоне химической реакции и его соотношения с теплотой взрыва является важной частью исследования разложения ВВ в наполненной системе. Поэтому определение детонационных характеристик и тротилового эквивалента систем гексоген – наполнитель является одной из важных задач в данном вопросе.

Одним из способов флегматизации мощных ВВ является разбавление порошкообразных продуктов флегматизирующими веществами, которыми могут быть жидкости и легкоплавные соединения [67]. Эти вещества, с одной стороны, заметно снижают чувствительность ВВ, но, с другой, могут приводить к повышению бризантности и работоспособности ВВ [68]. Характер этих изменений зависит от кристаллической структуры зерен ВВ [66, 69, 70]. Для таких смесей, как правило, наблюдается более высокая скорость детонации, чем для сухого ВВ, причем максимальное увеличение наблюдается для системы, в которой жидкость полностью заполняет объем, занимаемый воздухом.

В работе [71] с помощью электромагнитного метода исследована эволюция инициирующей ударной волны в детонационную в водонаполненном тротиле, различной структуры зерен. Детонационная способность водных суспензий ВВ на основе ТЭНа и октогена исследовались в работе [72-74]. Была определена зависимость критического диаметра водных суспензий от объемной доли ТЭНа. В работе [75] исследовался монокристаллический водонаполненный гексоген с минимальным количеством дефектов и плотностью зерен $1,80 \text{ г/см}^3$. Влияние флегматизатора на параметры детонации промышленного гексогена, имеющего дефекты и внутренние неоднородности, ранее не исследовались.

Организация объединенных наций рекомендует перевозить гексоген в увлажненном состоянии, а именно с добавлением не менее 15 % воды по массе [1]. Проведенные исследования, изложенные ниже, показали, что полное заполнение объема гексогена водой, занимаемого воздухом, при соотношении воды 15 % по массе, применимо только для монокристаллического гексона с плотностью зерен $1,80 \text{ г/см}^3$. Для полного заполнения объема промышленного гексогена водой, имеющего дефекты и внутренние неоднородности требуется большее количество воды. Вероятно, именно поэтому ООН рекомендует разбавлять гексоген водой с минимальным соотношением 15 %.

Представляет интерес исследовать влияние флегматизатора на параметры детонации промышленного гексогена, имеющего дефекты и внутренние неоднородности. 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. Для этого необходимо было измерить два параметра – скорость фронта и профиль массовой скорости за фронтом ударной волны. Этим вопросам посвящена данная часть работы.

3.1. Зависимость параметров детонации от диаметра заряда наполненных систем

Особенности взрывчатого превращения наполненных взрывчатых систем должны определенным образом сказаться на зависимости параметров детонации от диаметра зарядов. Представляет интерес определить, какой из наполнителей обладает максимальным флегматизирующим действием.

Для определения зависимости параметров детонации от диаметра заряда в опытах 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 (скорость детонации и массовая скорость) определялись электромагнитным методом [29]. Непосредственно измерялись скорость детонации и профиль массовой скорости, по точке излома которого определялись массовая скорость продуктов детонации в плоскости Чепмена – Жуге и время химической реакции. Остальные параметры рассчитывались по следующим формулам:

$$P = \rho_0 D U, \quad (14)$$

$$k = D/u - 1 \quad (15)$$

Результаты эксперимента приведены в таблице 3.1.1.

Как видно из таблицы 3.1.1. предельные параметры детонации наполненных систем достигаются 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. 3.1.1, 3.1.2 приведены зависимости скорости и давления детонации от диаметра заряда для гексогена с ацетоном, водой и четыреххлористым углеродом.

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
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

Как видно из рис. 3.1.1, 3.1.2 на всех зависимостях наполненных систем гексогена имеется участок с постоянными параметрами детонации. Такие участки ранее наблюдались в смесевых ВВ [76], параметры на этих участках назывались псевдоидеальными. Впоследствии такие же участки были обнаружены для пористых систем гексогена с парафином [77], и их наличие связывалось со сменой механизма разложения частиц ВВ. В сплошных взрывчатых системах участки с постоянными параметрами детонации в литературе не описаны.

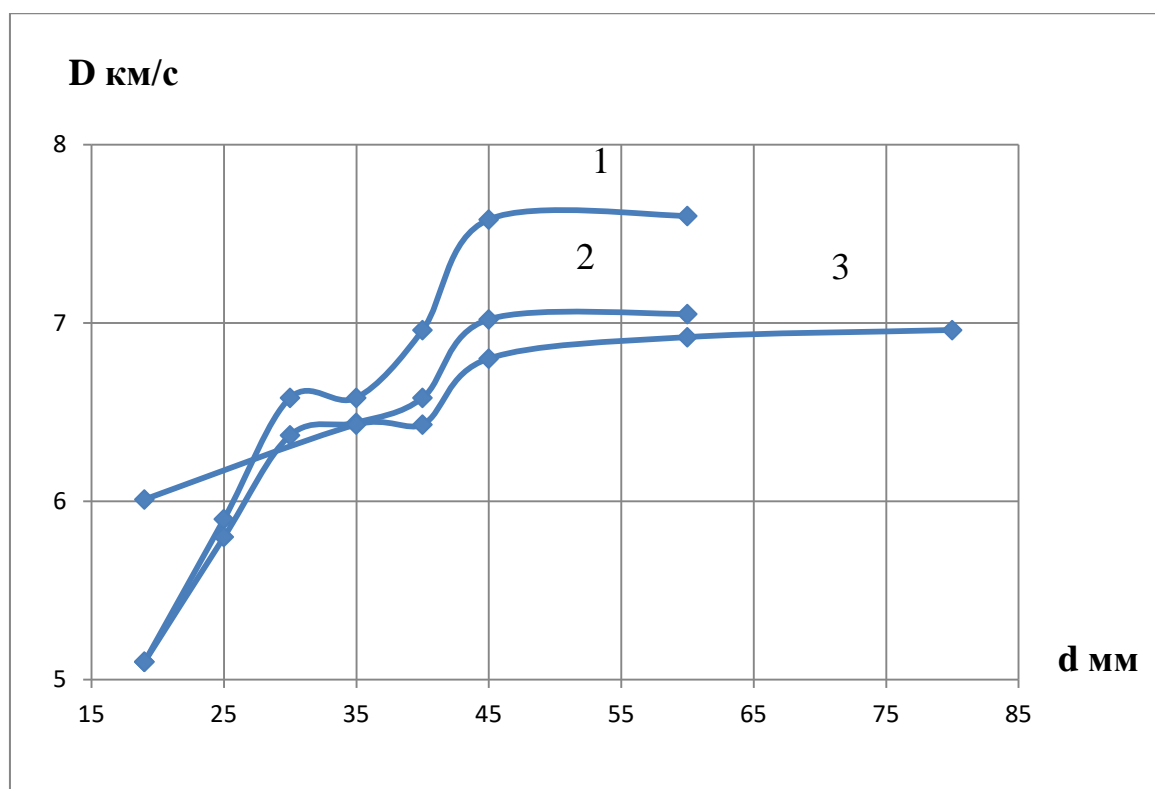


Рис. 3.1.1. Зависимость скорости детонации от диаметра заряда в наполненных системах гексогена с водой (1), четыреххлористым углеродом (2) и ацетоном (3).

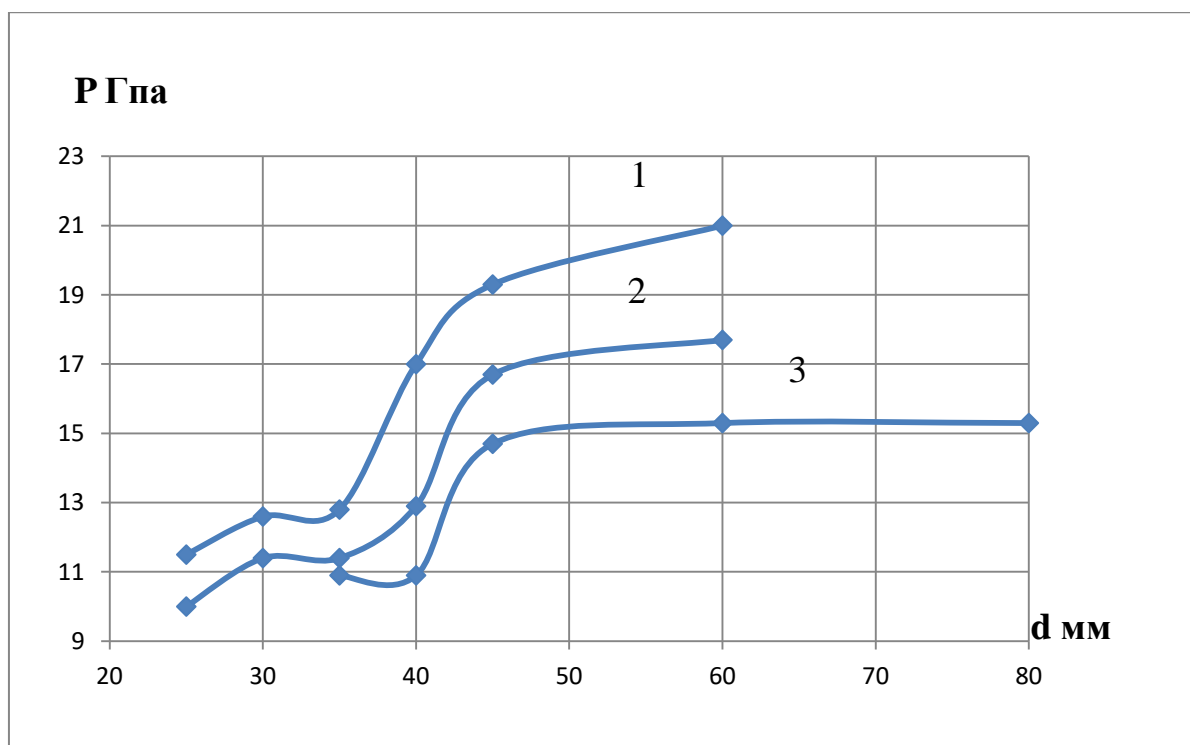


Рис. 3.1.2. Зависимость давления детонации от диаметра заряда в наполненных системах гексогена с четыреххлористым углеродом (1), водой (2) и ацетоном (3).

Отношение скоростей детонации критических к идеальным в системах гексоген – вода и гексоген – четыреххлористый углерод имеют следующие значения: 0,67 и 0,72, а отношение псевдоидеальных скоростей детонации к идеальным для тех же взрывчатых систем имеют значения 0,85 и 0,9 соответственно.

Значениям скоростей фронта волны и давления в области от критического диаметра до участка постоянных параметров отвечает спадающий профиль массовой скорости, отвечающий неполному разложению частиц ВВ. Поэтому процесс детонации вблизи критического диаметра в наполненных системах гексогена может носить нестационарный характер. Для проверки стационарности распространения процесса были поставлены опыты по измерению скорости детонации в зарядах водонаполненного гексогена диаметром 25 мм и длиной до 25 диаметров. Опыты показали, что процесс распространяется по заряду с постоянной скоростью равной 5,95 км/с.

При давлениях, характерных для области постоянных параметров, на кривой торможения границы раздела фиксируется излом. Скорости фронта при этом для гексогена с водой и четыреххлористым углеродом имеют значения 6,43 км/с и 6,17 км/с, а значения псевдоидеальных скоростей детонации 6,58 км/с и 6,37 км/с соответственно. Как видно из данного сопоставления значения скоростей близки. Однако, из несколько более низких значений скоростей, полученных в опытах по разложению гексогена наполненных взрывчатых систем в ударных волнах можно заключить, что смена механизма может происходить несколько раньше появления участка постоянных параметров или в самом его начале.

Таким образом, нижний участок зависимости параметров детонации отвечает неполному разложению частиц гексогена в волне, механизм разложения которого, вероятно, связан с очаговым тепловым взрывом с частичным распространением на объем [78]. С увеличением диаметра растет давление на ударном фронте, вызывая более полное разложение ВВ.

Процесс критической детонации, вероятно, можно отождествить с застывшей картиной развития ударной волны в детонационную, вследствие установления равновесия между развивающейся ударной волной и волной разгрузки. Увеличение диаметра вызывает новое равновесие, параметры процесса растут до своих псевдоидеальных значений. Дальнейший рост параметров связан уже с полным разложением зерна ВВ и определяется, вероятно, лишь установлением того или иного положения химического равновесия.

В диапазоне от критического диаметра до диаметров, отвечающих участку постоянства параметров, параметры детонации всех трех систем гексогена близки между собой. Интересной особенностью детонации наполненных систем гексогена является резкое ускорение и прирост параметров детонации при переходе диаметра заряда от 35 до 45 мм. Вероятно, это не связано с изменением механизма разложения, но является интересным фактом, ранее отмеченным И.М. Воскобойниковым в работах [79,80]. Давление 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.

Прирост давления и скорости детонации от псевдоидеальных до идеальных составляет для тех же взрывчатых систем 4,5 ГПа и 0,55 км/с, 6,3 ГПа и 1,02 км/с, 8,2 ГПа и 0,61 км/с.

Такие результаты, вероятно, можно объяснить тем, что при частичном разложении зерен ВВ природа наполнителя практически не влияет на этот процесс. При полном же разложении зерен ВВ влияние природы наполнителя начинает сказываться.

Таким образом, разложение ВВ наполненных систем в ударных и детонационных волнах имеют один механизм разложения – тепловой взрыв, который в некотором диапазоне давлений для ударных волн и аналогично в некотором диапазоне диаметров для детонационных волн носит характер очагового взрыва без распространения или с частичным распространением на массу ВВ.

При росте давления на фронте ударной детонационной волны (диаметра заряда) увеличивается степень разложения ВВ и при достижении некоторого значения давления на профиле массовой скорости появляется излом, означающий завершение разложения ВВ за конечные времена. Реакция из очагов в этом случае успевает распространиться на всю массу ВВ.

Дальнейшее увеличение давления вызывает приближение разложения по механизму очагового теплового взрыва к гомогенному тепловому взрыву.

Величину критического диаметра определяет с одной стороны давление во фронте детонационной волны, которое должно быть достаточным, чтобы возбудить быструю химическую реакцию, с другой стороны, волна разгрузки,

которая должна позволить выделиться в результате этой реакции некоторому количеству энергии, достаточному для самоподдержания процесса.

3.2. Определение детонационных характеристик систем гексоген-наполнитель

Флегматизация мощных ВВ, среди которых могут быть жидкости, помимо снижения чувствительности могут приводить к увеличению бризантности и работоспособности ВВ. Основным критерием таких параметров является тротильный эквивалент и параметры детонации.

Были исследованы несколько взрывчатых систем гексоген – наполнитель. Схема эксперимента приведена на рис. 3.2.1. Давления определялось исходя из закона сохранения импульса:

$$P = \rho_0 D U, \quad (16)$$

где ρ_0 - плотность заряда,

D – скорость фронта,

U - массовая скорость на фронте.

Время химической реакции определялось по излому профиля τ . Ширина зоны химической реакции определялось по формуле:

$$a = (D - 1,25U) \tau \quad (17)$$

где a – ширина зоны химической реакции,

τ – время химической реакции.

В опытах исследовались насыпные крупнокристаллический, полидисперсный и наполненный заряды из кристаллических частиц промышленного гексогена, с размером частиц 0,3 – 0,5 мм. Парциальная плотность крупнокристаллического гексогена в наполненных системах составляла $1,04 \pm 0,02$ г/см³. Заполнение пор между частицами ВВ производилось через специальные окна в пресшпановой оболочке зарядов, покрытой тонким слоем

церезиновой мастики. 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.

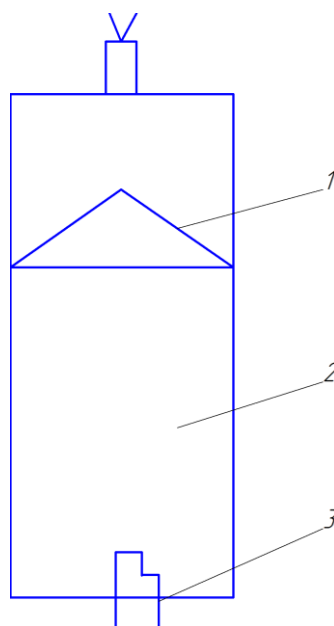


Рис. 3.2.1. Схема эксперимента.

1 – взрывная линза;

2 – исследуемое ВВ;

3 - электромагнитный датчик.

В таблице 3.2.1. приведены параметры детонации различных взрывчатых систем и параметры детонации насыпного крупнокристаллического гексогена плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$ и пресованного гексогена плотностью $1,44 \text{ г/см}^3$ (эта плотность близка к средней плотности наполненных систем), а также схожие экспериментальные значения скорости детонации работы [81].

Как видно из таблицы 3.2.1. 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 $1,44 \text{ г/см}^3$.

Значение показателя политропы систем колеблется в зависимости от природы наполнителя от 3,0 до 3,8, что несколько больше, чем в чистом гексогене при одинаковых давлениях. Времена химической реакции в наполненных системах, как правило, меньше, чем в заряде насыпного гексогена без наполнителя, но больше, чем в зарядах прессованного с плотностью $1,44 \text{ г/см}^3$. Схожие значения роста скорости детонации в наполненных системах гексогена, по сравнению с гексогеном без наполнителя, были получены в работе [81]. Данные значения приведены в таблице 3.2.1. Авторами данной работы было сделано предположение, что рост параметров детонации взрывчатых систем, по сравнению с пористым гексогеном, может быть вызван рядом причин. При неизменной плотности самого ВВ и объемного содержания наполнителя введение различных наполнителей может приводить к существенному различию в весовом отношении системы ВВ – наполнитель, средней начальной плотности системы к различным затратам энергии на сжатие, разгон и прогрев наполнителя из-за различия физических свойств наполнителей.

Параметры детонации взрывчатых систем.

ВВ, взрывчатая система	с, вес, % Содержание наполнителя	ρ_n , г/см ³ , Плотность наполнителя	ρ_0 , г/см ³ , Плотность заряда	D, км/с, Скорость детонации	u, км/с, Массовая скорость	P, ГПа, Давление детонации	τ , мкс, Время химической реакции	a, ширина ЗХР, мм	k, Показатель политропы	D, км/с, Скорость детонации [81]
Гексоген	-	-	1,03	6,0	1,56	9,64	0,67	2,5	2,8	6,0
Гексоген	-	-	1,44	7,53	1,8	19,6	0,24	1,12	3,1	7,53
Гексоген - бромформ	51	2,81	2,28	6,32	1,47	21,2	0,95	4,23	3,3	6,27
Гексоген - ацетон	24	0,79	1,35	6,94	1,62	15,2	0,48	2,37	3,3	6,92
Гексоген - спирт	25	0,81	1,36	7,05	1,81	17,3	0,48	2,34	3,0	7,15
Гексоген - формамид	32	1,13	1,52	7,40	1,80	20,1	0,43	2,21	3,1	—
Гексоген (полидисперсный) - вода	26	1,0	1,43	7,56	1,58	17,1	0,51	2,61	3,78	—

Продолжение таблицы 3.2.1.

Параметры детонации взрывчатых систем.

ВВ, взрывчатая система	с, вес, % Содержание наполни- теля	$\rho_n, \text{г/см}^3$, Плотность наполни- теля	$\rho_0, \text{г/см}^3$, Плот- ность заряда	D, км/с, Скорость детонации	u, км/с, Массовая скорость	P, ГПа, Давление детонации	τ , мкс, Время химической реакции	a, ширина ЗХР, мм	k, Показатель политропы	D, км/с, Скорость детонации [81]
Гексоген - этаноламин	30	1,01	1,47	7,62	1,80	19,9	0,40	2,14	3,2	—
Гексоген (крупнокристалли- ческий) – вода	27	1,0	1,48	7,63	1,61	18,2	0,45	2,52	3,74	7,60
Гексоген - ацетамид	32	1,16	1,52	7,85	1,71	20,4	0,52	2,97	3,6	—
Гексоген - гидразингидрат	30	1,03	1,47	8,11	1,73	20,7	0,35	2,08	3,8	—

Детонационные характеристики ВВ определяются детонационной теплотой взрыва, выделяющейся в зоне химической реакции (в Химпике). 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. Сделаем попытку провести оценку параметров детонации через данную характеристику. Для этого необходимо получить значения скорости звука во взрывчатых системах, которые могут быть определены, исходя из следующего выражения [82]:

$$c_{1,2} = c_1 c_2 \frac{\beta \rho_1 + (1-\beta)\rho_2}{\beta \rho_1 c_1 + (1-\beta)\rho_2 c_2} \quad (18)$$

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. 3.2.2. представлен график зависимости скорости детонации в системах гексогена с различными наполнителями от скорости распространения звука, а в таблице 3.2.2. представлены расчетные значения скоростей распространения звука в системах гексогена с наполнителями, имеющие различные физические свойства. Значения, приведенные в таблице 3.2.2, представлены в порядке увеличения скорости детонации систем, полученные экспериментальным методом.

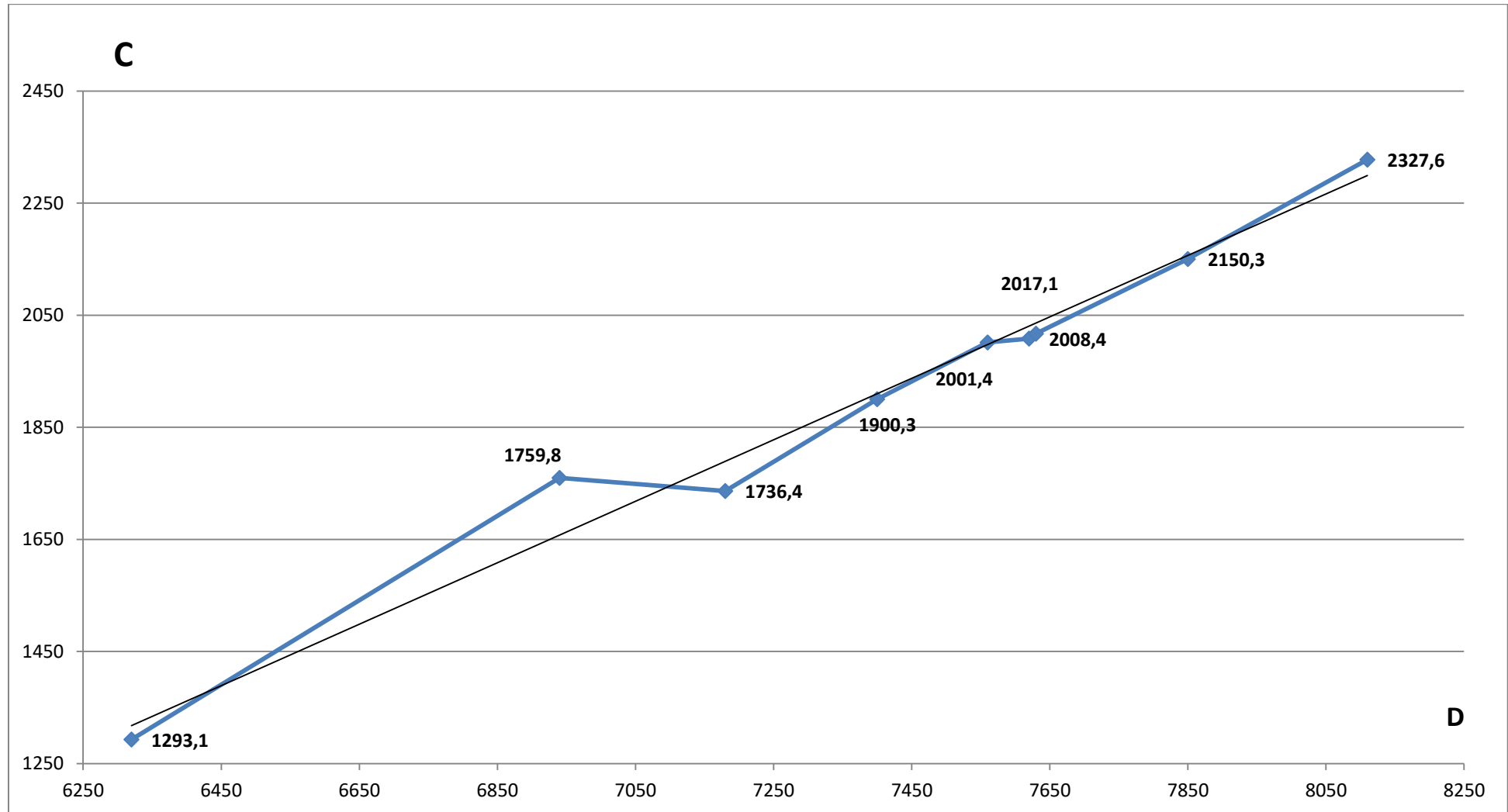


Рис. 3.2.2. Зависимость скорости детонации в системах гексоген – наполнитель от скорости звука.

Расчетные и экспериментальные значения скорости детонации.

ВВ, взрывчатая система	с, 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 (19), Расчетная скорость детонации	D (расч), м/с (20), 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	7892,002	728	1293,1
Гексоген - ацетон	24,0	0,79	1,35	6 940	7159,8	6907,373	1192	1759,8
Гексоген - спирт	25,0	0,81	1,36	7 050	7136,4	6910,848	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

Продолжение таблицы 3.2.2.

Расчетные и экспериментальные значения скорости детонации.

ВВ, взрывчатая система	с, 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 (19), Расчетная скорость детонации	D (расч), м/с (20), Расчетная скорость детонации	c ₁ Скорость звука наполнителя м/с	c _{1,2} Скорость звука системы м/с
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	7840,631	1980	2327,6

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

$$D_{\text{расч}} = 5400 + c_{1,2} \quad (19)$$

Расчетные и экспериментальные значения представлены в таблице 3.2.2. 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 достигло ~ 3%.

Автором работы [83] было предложено производить расчет скорости детонации по следующему уравнению:

$$D = 1,2 c_0 \frac{\rho_0}{\rho} + 2,55 \sqrt{\frac{\alpha + 1,65}{5,5} \rho_0 Q_m} \quad (20)$$

где ρ – предельное значение плотности системы;

α – кислородный коэффициент;

Q_m – максимальная теплота взрыва.

В качестве сравнительного анализа был произведен расчет скорости детонации по формуле (20), для этого воспользовались экспериментальными данными [83] по теплоте взрыва гексогена.

Значение предельной плотности системы было рассчитано по следующим уравнениям:

$$\rho = 1/\rho_m \quad (21)$$

$$\rho_m = \frac{\beta_1}{\rho_1} + \frac{\beta_2}{\rho_2} \quad (22)$$

где β_1, β_2 - массовые доли компонентов.

$$Q_m = 6\,320 \text{ кДж}, \alpha = 0,67.$$

Полученные значения скорости детонации, рассчитанные по уравнению (20), также приведены в таблице 3.2.2.

3.3. Определение критического диаметра водонаполненного гексогена и критического давления инициирования зарядов насыпного и водонаполненного гексогена

Одной из основных характеристик детонационной способности ВВ является критический диаметр и критическое давление инициирования. Т.к. высокомоощные ВВ гексоген и октоген рекомендовано перевозить в водонаполненном состоянии, то при водоразбавлении их в промышленных условиях в данных смесях могут содержаться воздушные включения и дефектные зерна. Именно это может сказаться на критических условиях инициирования и характере развития процесса.

В работе [75] проводилось исследование инициирования ударными волнами зарядов насыпного и водонаполненного гексогена плотностью $0,95 \text{ г/см}^3$ и $1,42 \text{ г/см}^3$ соответственно. Инициирование создавалось ударными волнами треугольного профиля активного заряда через преграду из оргстекла. В работе использовался перекристаллизованный гексоген размером $0,1-0,3 \text{ мм}$, с минимальным количеством дефектов. Были определены критические диаметры насыпного и водонаполненного гексогена, которые составляли 3 и 24 мм соответственно, и критическое давление инициирования составляло $0,2 \pm 0,02$ и $4,5 \pm 0,3 \text{ ГПа}$ соответственно.

Для определения критического диаметра водонаполненного промышленного гексогена и критического давления инициирования зарядов насыпного и водонаполненного гексогена была применена установка Института проблем химической физики РАН. Схема эксперимента, предложенная в работах [84,85] приведена на рис. 3.3.1. Активный заряд, состоящий из взрывной линзы и двух таблеток ВВ диаметром 80 мм при взрыве через экран воздушного зазора и парафиновой прослойки генерировал в исследуемом взрывчатом веществе ударную волну прямоугольного профиля, что позволяло существенно повысить

информативность процесса. Исследовались насыпные и наполненные заряды из кристаллических частиц промышленного гексогена, с плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ и $1,42 \text{ г/см}^3$ соответственно. Электромагнитный датчик, фиксирующий развитие ударной волны до детонационной или ее затухание [86], размещался в пассивном заряде диаметром 60 мм, что позволяло уменьшить влияние боковой волны разрежения, а прямоугольный профиль входящей ударной волны позволял более детально прорисовать картину инициирования сухого и водонаполненного гексогена. В эксперименте по всей глубине развития ударной волны в детонационную электромагнитным методом записывался профиль $U(t)$ и измерялась скорость ударного фронта D , для этого использовался ступенчатый датчик с базой 3мм. Т.к. на таком расстоянии изменение скорости фронта волны незначительно, то датчик размещался на разных расстояниях L от границы парафиновой прослойки до исследуемого ВВ. Давление в волне рассчитывалось по гидродинамической формуле:

$$P = \rho_0 D U, \quad (23)$$

где ρ_0 - плотность заряда;

D – скорость фронта;

U - массовая скорость на фронте.

Давление входящей ударной волны регулировалось активным зарядом (две таблетки ТНТ/талък 50/50), толщиной парафиновой прослойки и величиной воздушного зазора.

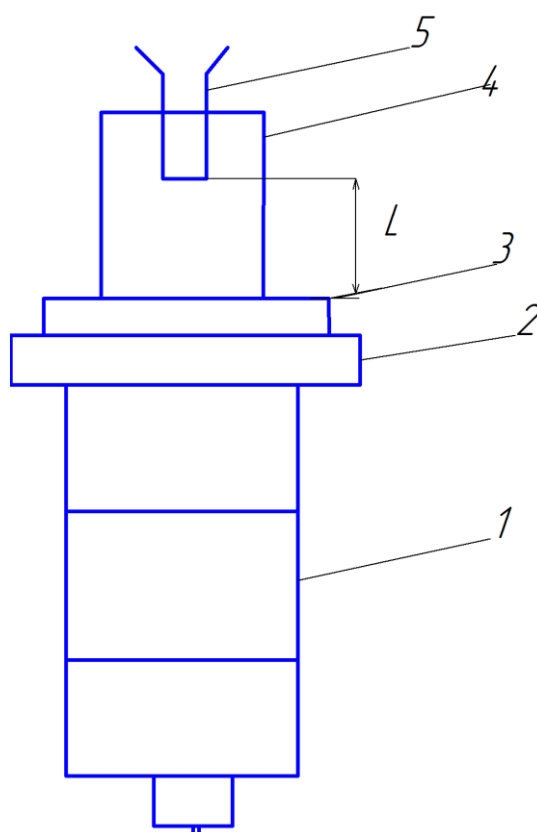


Рис. 3.3.1. Схема эксперимента.

1 - активный заряд;

2 - экран с воздушным зазором;

3 - парафиновая прослойка;

4 – исследуемое ВВ;

5 – электромагнитный датчик.

Критический диаметр водонаполненного промышленного гексогена составил 19 мм. В таблице 3.3.1. приведены параметры развивающихся ударных волн (скорость фронта, значения массовой скорости и давления на фронте). Данные значения были получены путем усреднения данных 4-6 опытов.

Параметры детонации.

Р давление входящей ударной волны ГПа	Положение датчика (мм)	U массовая скорость км/с	D скорость фронта км/с	Давление ГПа
1	2	3	4	5
Промышленный гексоген				
0,2	0	0,16	1,22	0,2
	4,0	0,87	2,62	2,3
	6,0	1,22	3,7	4,5
	10,0	1,61	4,7	7,6
	12,0	2,1	5,3	11,1
	20,0	2,1	5,3	11,1
Водонаполненный промышленный гексоген				
3,4	0	0,63	3,8	4,0
	4,0	0,95	4,4	5,9
	6,0	1,1	4,5	7,0
	10,0	1,2	4,75	8,1
	12,0	1,3	6,3	11,6
	20,0	1,5	6,7	14,3
	30	2,0	7,1	20,2

На рис. 3.3.2. приведены параметры развития входящей ударной волны в образцы насыпного и водонаполненного гексогена. В опытах с насыщенным гексогеном наблюдался треугольный профиль процесса с растущими параметрами на расстояниях 4,0 и 6,0 мм от входа ударной волны. На расстоянии 10,0 мм появился профиль с изломом «Химпиком», а на расстоянии 12,0 мм параметры процесса достигли максимальных значений и дальше не росли.

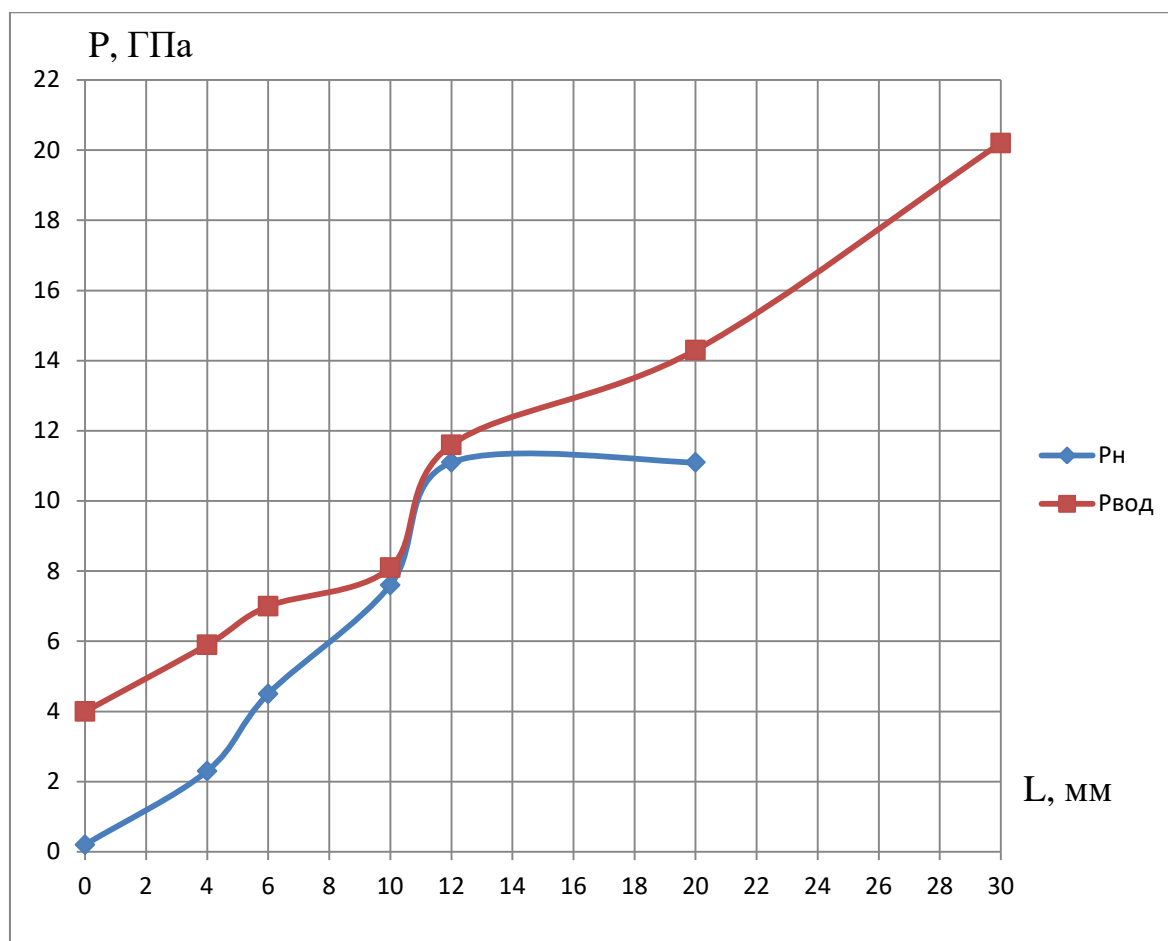


Рис. 3.3.2. Зависимости давлений на фронте развивающейся детонационной волны от расстояния до границы раздела инертный барьер – ВВ.

В случае с водонаполненным гексогеном на расстояниях от 0,0 до 4,0 мм наблюдался прямоугольный профиль с растущими параметрами, который на 6,0 мм трансформировался в треугольный, а на 10,0 мм появился излом. Развитие процесса продолжалось вплоть до 30,0 мм, параметры которых

приблизились к характерным параметрам скорости детонации $\sim 7,1$ км/с. Схожие результаты были получены в работе [81], где скорость фронта $\sim 7,5$ км/с.

Детонационные параметры продуктов взрыва промышленного гексогена несколько отличаются от параметров продуктов взрыва перекристаллизованного гексогена. По сравнению с перекристаллованным гексогеном промышленный гексоген более чувствителен. Повышение чувствительности естественно связано с наличием воздушных включений в зернах промышленного гексогена.

Более полное представление о механизме разложения водонаполненного гексогена может дать метод торможения границы раздела.

3.4. Определение значения давлений устойчивого инициирования наполненных систем гексогена методом торможение границы раздела

Другим методом определения устойчивого инициирования при ударно - волновом воздействии ВВ является метод торможения границы раздела инерт – ВВ, предложенный К.К. Шведовым [43].

Метод торможения границы раздела хорошо зарекомендовал себя при изучении разложения насыпных ВВ с наличием воздушных включений, а также литых и жидких ВВ в ударных волнах [87]. Данный метод позволяет исследовать разложение ВВ за времена порядка 2-3 мкс без воздействие на процесс боковых волн разрежение при четком контроле интенсивности и длительности входящей ударной волны. Это достигается применением заряда, конструкция которого изображена на рис. 3.4.1. В данном эксперименте датчик во всех случаях устанавливается на границу раздела парафиновая прослойка –ВВ.

Интенсивность и длительность существования прямоугольной ударной волны определялись активным зарядом, величиной воздушного зазора и парафиновой прослойки. Прямоугольный профиль формировался за счет отраженной ударной волны от внешней поверхности парафиновой прослойки и продуктов детонации.

Основная идея метода состоит в том, что разложение ВВ после входа в исследуемый образец ударной волны прямоугольного профиля достаточной интенсивности сопровождается ростом давления за счет выделения газообразных продуктов реакции как в направлении движения ударной волны, так и в противоположном направлении, тормозя границу раздела инерт – исследуемый образец. На осциллограмме профиля массовой скорости в этом случае будет регистрироваться спад. В зависимости от интенсивности разложения спад профиля массовой скорости будет более или менее крут. В инертном материале торможение границы раздела не будет и на осциллограмме наблюдается полка массовой скорости.

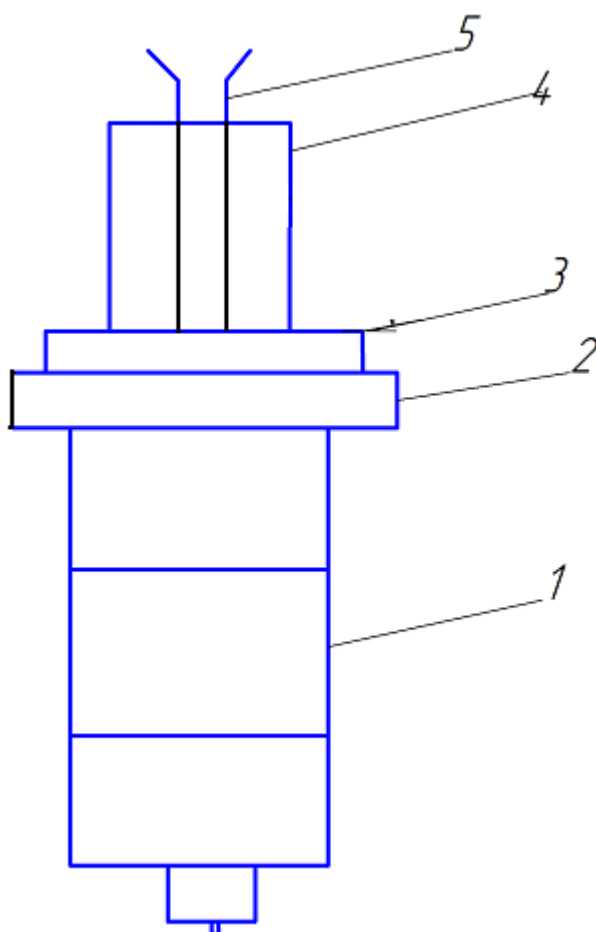


Рис. 3.4.1. Схема эксперимента.

1 - активный заряд;

2 - экран с воздушным зазором;

3 - парафиновая прослойка;

4 – исследуемое ВВ;

5 – электромагнитный датчик.

Амплитуда падающей на исследуемый образец ударной волны прямоугольного профиля и его длительность существенно зависят от характеристик генератора прямоугольных ударных волн.

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. 3.4.2. 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. 3.4.3. приведены примеры записи профиля массовой скорости в некоторых взрывчатых системах от таких генераторов.

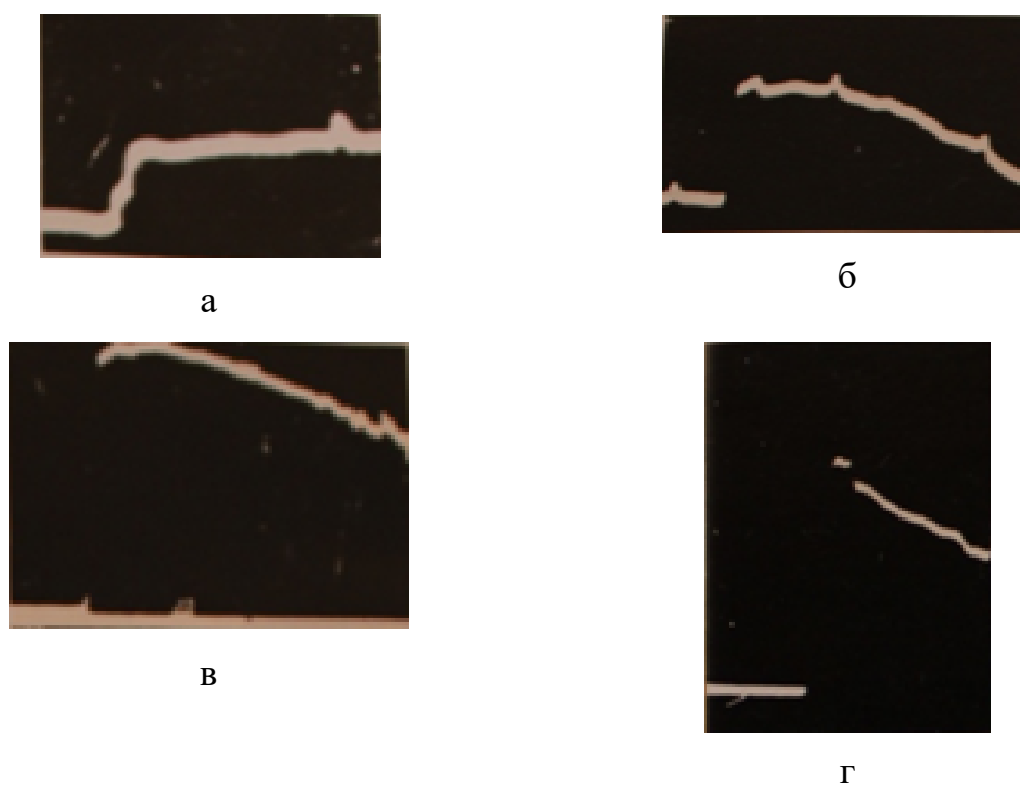


Рис. 3.4.2. Примеры осциллограмм массовой скорости на границе раздела во взрывчатых системах.

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;

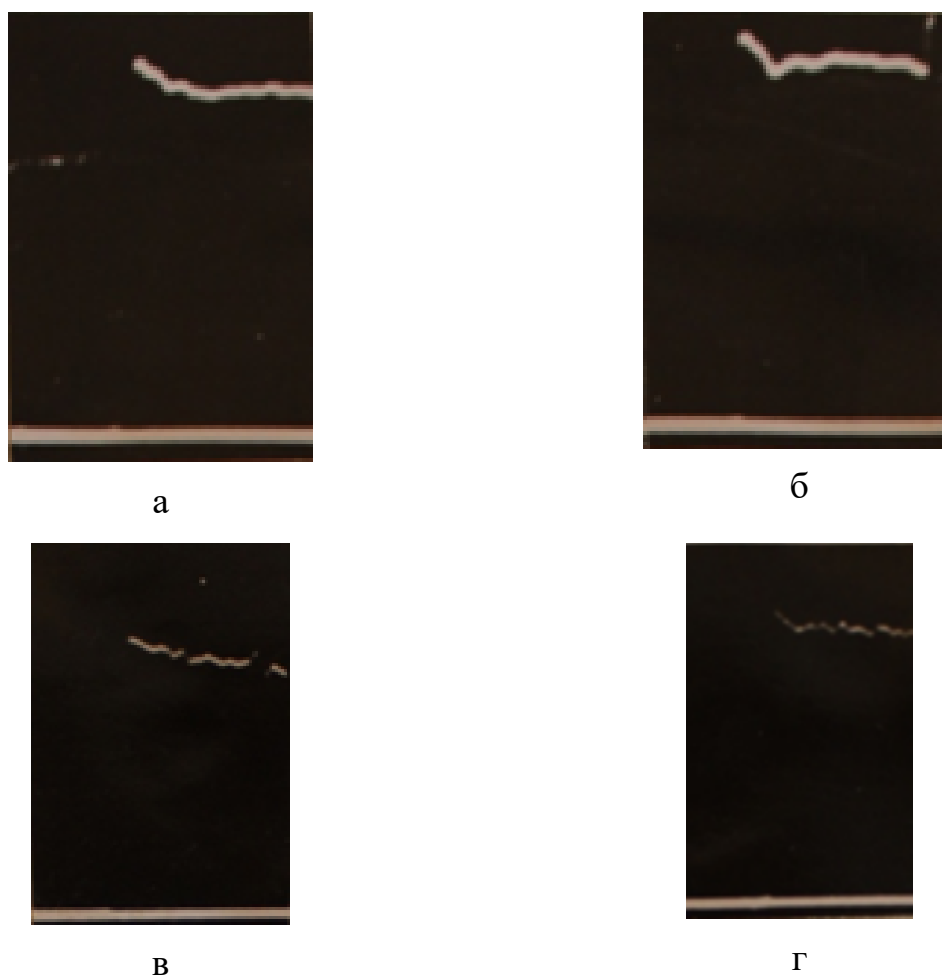


Рис. 3.4.3. Примеры осциллограмм массовой скорости на границе раздела во взрывчатых системах.

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.

Результаты опытов приведены в таблицах 3.4.1. и 3.4.2, где даны экспериментальные значения параметров входящей ударной волны во взрывчатую систему (D , U , P), полученные двумя методами. В первом варианте ($D_э$, $U_э$, $P_э$) получены по непосредственно экспериментальным измерениям массовой скорости и скорости фронта входящей ударной волны. На основании этих параметров построены ударные адиабаты взрывчатых систем, которые

приведены в таблице 3.4.1. после каждой системы, имеющей более трех экспериментальных точек. Полученные выражения для ударных адиабат близки к расчетным по методу [88]. В другом варианте (U_p , P_p , D_p) указаны и параллельно рассчитаны по известной массовой скорости в проходящей по парафину ударной волне, ударной адиабате системы и парафина. Оба метода, как правило, дают близкие значения параметров ударных волн во взрывчатых системах.

Таблица 3.4.1.

Параметры детонации.

Параметры взрывчатой системы	Профили массовых скоростей					
1	2					
Гексоген – вода, $\rho_0 = 1,43 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,37 \text{ км/с}$; $U_p = 1,42 \text{ км/с}$; $P_3 = 8,9 \text{ ГПа}$; $P_p = 9,4 \text{ ГПа}$; $D_3 = 4,57 \text{ км/с}$; $D_p = 4,65 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,37	1,23	1,09	0,95	
Гексоген – вода, $\rho_0 = 1,43 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,47 \text{ км/с}$; $U_p = 1,51 \text{ км/с}$; $P_3 = 10,7 \text{ ГПа}$; $P_p = 10,8 \text{ ГПа}$; $D_3 = 5,12 \text{ км/с}$; $D_p = 5,02 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,47	1,33	1,20	1,07	
Гексоген – вода, $\rho_0 = 1,43 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,56 \text{ км/с}$; $U_p = 1,61 \text{ км/с}$; $P_3 = 11,4 \text{ ГПа}$; $P_p = 11,8 \text{ ГПа}$; $D_3 = 5,1 \text{ км/с}$; $D_p = 5,12 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,56	1,43	1,30	1,17	
Гексоген – вода, $\rho_0 = 1,43 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,74 \text{ км/с}$; $U_p = 1,76 \text{ км/с}$; $P_3 = 14,1 \text{ ГПа}$; $P_p = 13,8 \text{ ГПа}$; $D_3 = 5,6 \text{ км/с}$; $D_p = 5,5 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,74	1,65	1,56	1,47	1,38

Продолжение таблицы 3.4.1.						
Гексоген – вода, $\rho_0 = 1,43 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,93 \text{ км/с}$; $U_p = 1,93 \text{ км/с}$; $P_3 = 16,6 \text{ ГПа}$; $P_p = 16,4 \text{ ГПа}$; $D_3 = 6,04 \text{ км/с}$; $D_p = 5,97 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,93	1,86	1,78	1,71	1,64
$D = 1,5 + 2,3 U$						
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 0,47 \text{ км/с}$; $U_p = 0,51 \text{ км/с}$; $P_3 = 1,9 \text{ ГПа}$; $P_p = 2,2 \text{ ГПа}$; $D_3 = 2,43 \text{ км/с}$; $D_p = 2,65 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,5	3,0	
	U км/с	0,47	0,47	0,47	0,47	
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 0,88 \text{ км/с}$; $U_p = 0,86 \text{ км/с}$; $P_3 = 4,8 \text{ ГПа}$; $P_p = 4,8 \text{ ГПа}$; $D_3 = 3,26 \text{ км/с}$; $D_p = 3,32 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,1	1,5	2,0
	U км/с	0,88	0,88	0,88	0,8	0,7
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,06 \text{ км/с}$; $U_p = 1,08 \text{ км/с}$; $P_3 = 6,7 \text{ ГПа}$; $P_p = 6,8 \text{ ГПа}$; $D_3 = 3,70 \text{ км/с}$; $D_p = 3,76 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,06	0,97	0,87	0,76	0,66
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,17 \text{ км/с}$; $U_p = 1,16 \text{ км/с}$; $P_3 = 7,8 \text{ ГПа}$; $P_p = 8,0 \text{ ГПа}$; $D_3 = 3,86 \text{ км/с}$; $D_p = 4,02 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,17	1,07	0,96	0,85	0,75
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0 = 1,70 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,36 \text{ км/с}$; $U_p = 1,36 \text{ км/с}$; $P_3 = 9,9 \text{ ГПа}$; $P_p = 10,1 \text{ ГПа}$; $D_3 = 4,28 \text{ км/с}$; $D_p = 4,35 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,36	1,24	1,13	1,02	0,9

Продолжение таблицы 3.4.1.						
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0=1,70$ г/см ³ ; $U_3 = 1,55$ км/с; $U_p = 1,47$ км/с; $P_3 = 12,6$ ГПа; $P_p = 11,3$ ГПа; $D_3 = 4,78$ км/с; $D_p = 4,60$ км/с.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,55	1,43	1,31	1,19	1,07
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0=1,70$ г/см ³ ; $U_3 = 1,70$ км/с; $U_p = 1,68$ км/с; $P_3 = 14,3$ ГПа; $P_p = 14,3$ ГПа; $D_3 = 4,95$ км/с; $D_p = 4,98$ км/с.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	2,0
	U км/с	1,70	1,67	1,63	1,59	1,55
Гексоген – CCl_4 , $\rho_0=1,70$ г/см ³ ; $U_3 = 1,86$ км/с; $U_p = 1,86$ км/с; $P_3 = 16,8$ ГПа; $P_p = 16,8$ ГПа; $D_3 = 5,31$ км/с; $D_p = 5,31$ км/с.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,86	1,82	1,78	1,74	
$D = 1,65 + 2,05 U$						
Гексоген – бромформ, $\rho_0 = 2,28$ г/см ³ ; $U_3 = 1,05$ км/с; $U_p = 1,03$ км/с; $P_3 = 9,0$ ГПа; $P_p = 8,8$ ГПа; $D_3 = 3,82$ км/с; $D_p = 3,75$ км/с.	t мкс	0	0,65	1,0	1,5	
	U км/с	1,05	1,05	0,95	0,8	
Гексоген – бромформ, $\rho_0 = 2,28$ г/см ³ ; $U_3 = 1,55$ км/с; $U_p = 1,53$ км/с; $P_3 = 16,4$ ГПа; $P_p = 16,2$ ГПа; $D_3 = 4,68$ км/с; $D_p = 4,64$ км/с.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,55	1,47	1,40	1,32	

Продолжение таблицы 3.4.1.						
Гексоген – бромформ, $\rho_0 = 2,28 \text{ г/см}^3$; $U_3 = 1,64 \text{ км/с}$; $U_p = 1,65 \text{ км/с}$; $P_3 = 18,4 \text{ ГПа}$; $P_p = 18,6 \text{ ГПа}$; $D_3 = 4,94 \text{ км/с}$; $D_p = 4,95 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,5	1,0	1,5	
	U км/с	1,64	1,57	1,50	1,44	
$D = 1,95 + 1,75 U$						

Таблица 3.4.2.

Параметры детонации.

Параметры взрывчатой системы	Профили массовых скоростей				
1	2				
Гексоген – вода, $U_3 = 2,14 \text{ км/с}$; $P_3 = 19,6 \text{ ГПа}$; $D_3 = 6,43 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,1	0,56	1,3
	U км/с	2,14	2,10	1,89	1,89
Гексоген – вода, $U_3 = 2,33 \text{ км/с}$; $P_3 = 22,6 \text{ ГПа}$; $D_3 = 6,82 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,1	0,27	1,1
	U км/с	2,33	2,24	2,06	2,11
Гексоген – CCl_4 , $U_3 = 2,05 \text{ км/с}$; $P_3 = 20,5 \text{ ГПа}$; $D_3 = 5,90 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,12	0,5	1,1
	U км/с	2,05	2,02	1,93	1,73
Гексоген – CCl_4 , $U_3 = 2,19 \text{ км/с}$; $P_3 = 23,0 \text{ ГПа}$; $D_3 = 6,17 \text{ км/с}$.	t мкс	0	0,12	0,35	1,1
	U км/с	2,19	2,12	1,98	1,96

Продолжение таблицы 3.4.2.					
Гексоген – бромформ, $U_3 = 1,91$ км/с; $P_3 = 23,0$ ГПа; $D_3 = 5,40$ км/с.	t мкс	0	0,2	0,8	1,3
	U км/с	1,91	1,91	1,91	1,80
Гексоген – бромформ, $U_3 = 2,03$ км/с; $P_3 = 26,0$ ГПа; $D_3 = 5,58$ км/с.	t мкс	0	0,14	0,5	1,2
	U км/с	2,03	1,99	1,93	1,82

Для удобства анализа полученные результаты по торможению границы раздела при различных давлениях представлены на рис. 3.4.4. – 3.4.6. Приведенные графики являются усредненными профилями массовой скорости, цифрами на кривых указаны давления ударной волны на границе раздела инерт – ВВ.

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. 3.4.4. – 3.4.6.), что свидетельствует о протекании разложения ВВ в волне за наблюдаемые времена без заметного ускорения.

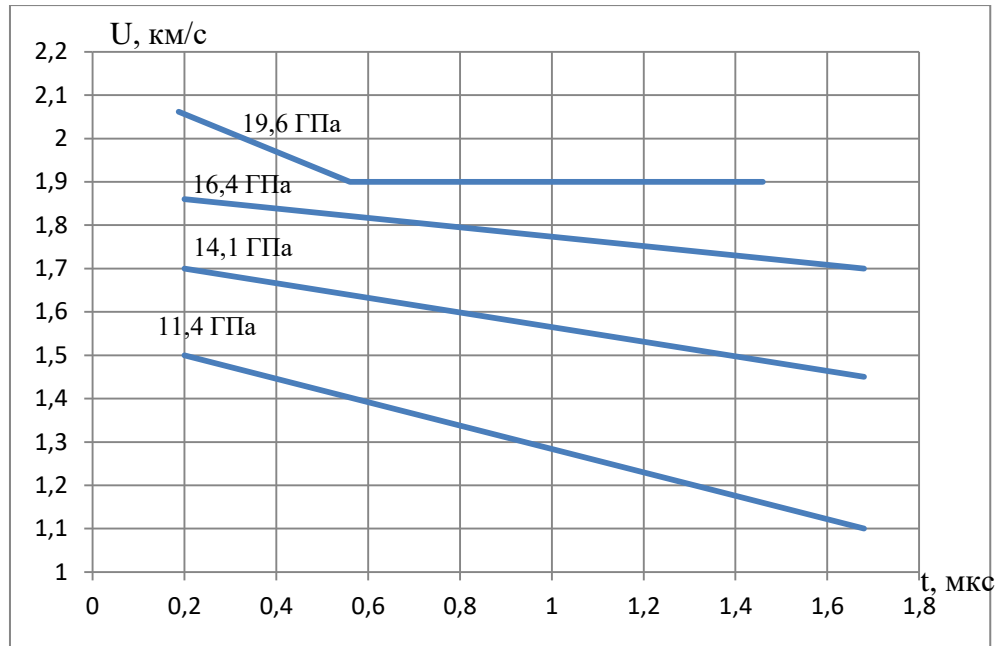


Рис. 3.4.4. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – водонаполненный гексоген (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

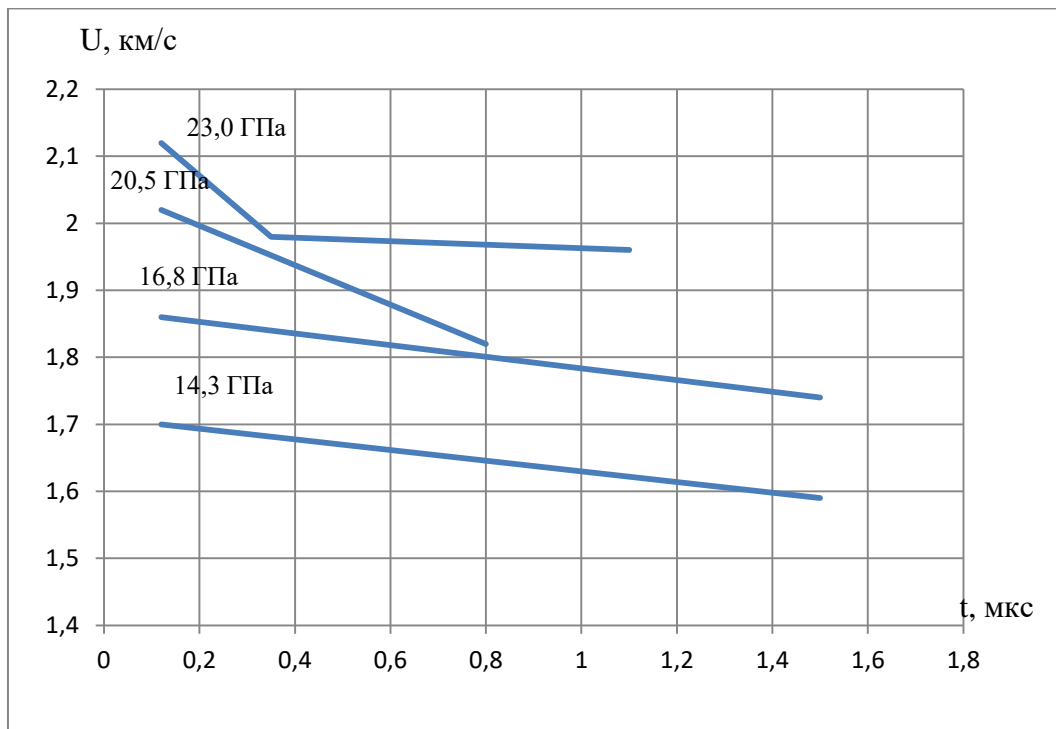


Рис. 3.4.5. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – система гексоген – четыреххлористый углерод (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

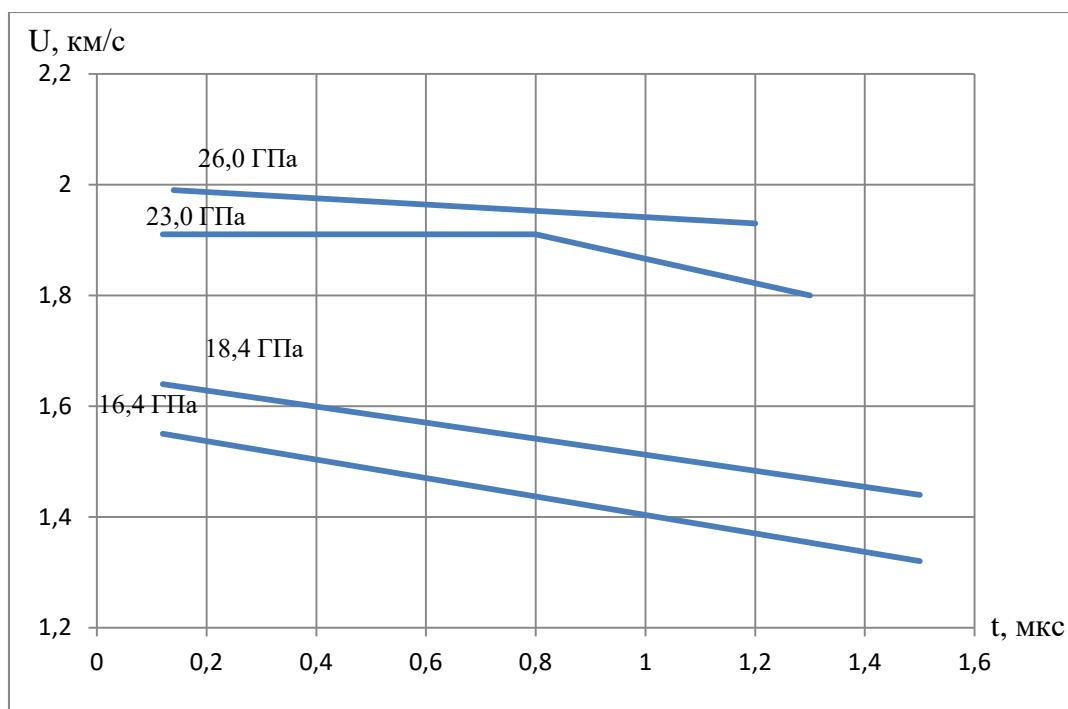


Рис. 3.4.6. Усредненные профили массовой скорости на границе раздела парафиновая прослойка – система гексоген – бромформ (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

Спаду массовой скорости отвечает рост давления на границе раздела инерт – ВВ, которое можно рассчитать по методу отражения, используя ударную адиабату парафина (предполагая, что она совпадает с изэнтропой) и текущие значения массовой скорости. Качественная схема расчета показана на рис. 3.4.7. Результаты расчета роста давления во времени для трех начальных амплитуд ударной волны в водонаполненном гексогене приведены на рис. 3.4.8. Характер разложения ВВ в случае спада массовой скорости не может быть гомогенным вследствие недостаточного прогрева частиц. Реакции взрывчатого превращения протекают в отдельных очагах и могут носить характер очагового теплового взрыва, горения или смешанный. Для быстрого разложения ВВ в форме теплового взрыва за времена 1 мкс для гексогена необходимы температуры 700 – 800 К [80,89,90]. Такие температуры для высокоплотных ВВ достижимы лишь при давлениях 13 – 20 ГПа. На рис. 3.4.9. приведены зависимости температуры

ударного сжатия от давления входящей ударной волны для гексогена плотностью $1,8 \text{ г/см}^3$ по данным работ [80,89], воды, четыреххлористого углерода и бромформа по данным работ [91-93].

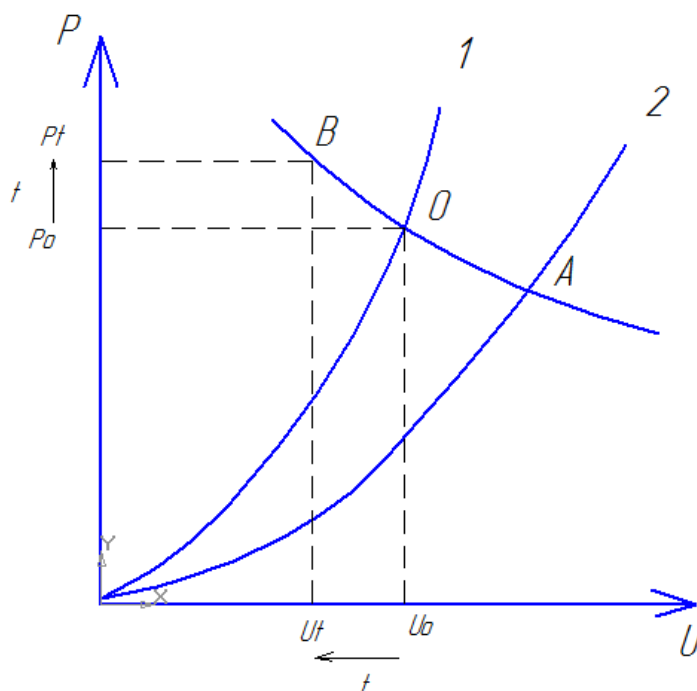


Рис. 3.4.7. Схема расчета роста давлений в проходящей волне на границе раздела.

1 – ударная адиабата исследуемого образца;

2 – Изэнтропа парафина.

Точке А отвечают параметры входящей ударной волны из парафина, точке О – параметры входящей волны в образец, точке В – параметры волны на границе раздела через время t после входа ударной волны.

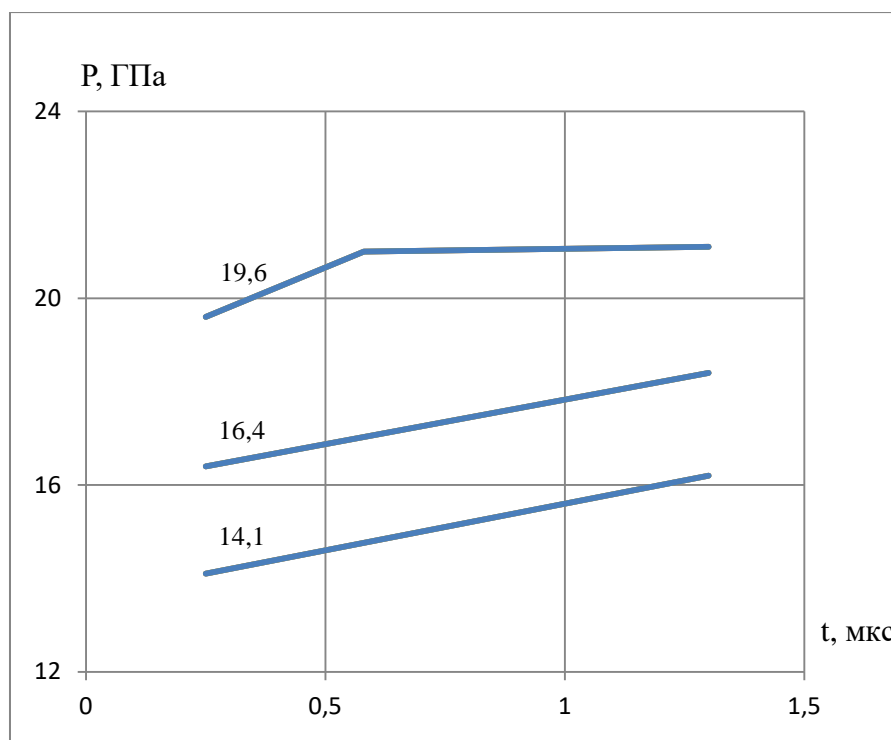


Рис. 3.4.8. Зависимость давления от времени за фронтом ударной волны в водонаполненном гексогене при различных начальных давлениях входящей ударной волны (цифрами указаны начальные давления на границе раздела).

Исходя из вышесказанного, вероятно, превращение падающего профиля массовой скорости в профиль с химпиком следует интерпретировать как суммарный эффект разложения ВВ в очагах и распространение реакции из очагов на объем.

Для взрывчатых систем гексогена появление химпика отмечается при давлениях порядка 20 ГПа и даже несколько выше. Так для водонаполненного крупнокристаллического гексогена профиль с химпиком был зарегистрирован при давлении входящей ударной волны 19,6 ГПа, время разложение составляет 0,56 мкс (рис. 3.4.4). Эксперименты по фоторегистрации свечения на боковой поверхности для водонаполненного гексогена показали, что свечение появляется без задержки и распространяется со скоростью, близкой к скорости

установившейся детонации, что, вероятно, свидетельствует об особенностях разложения системы гексоген – вода в зоне химической реакции и отсутствии волны разрежения за счет прямоугольного профиля.

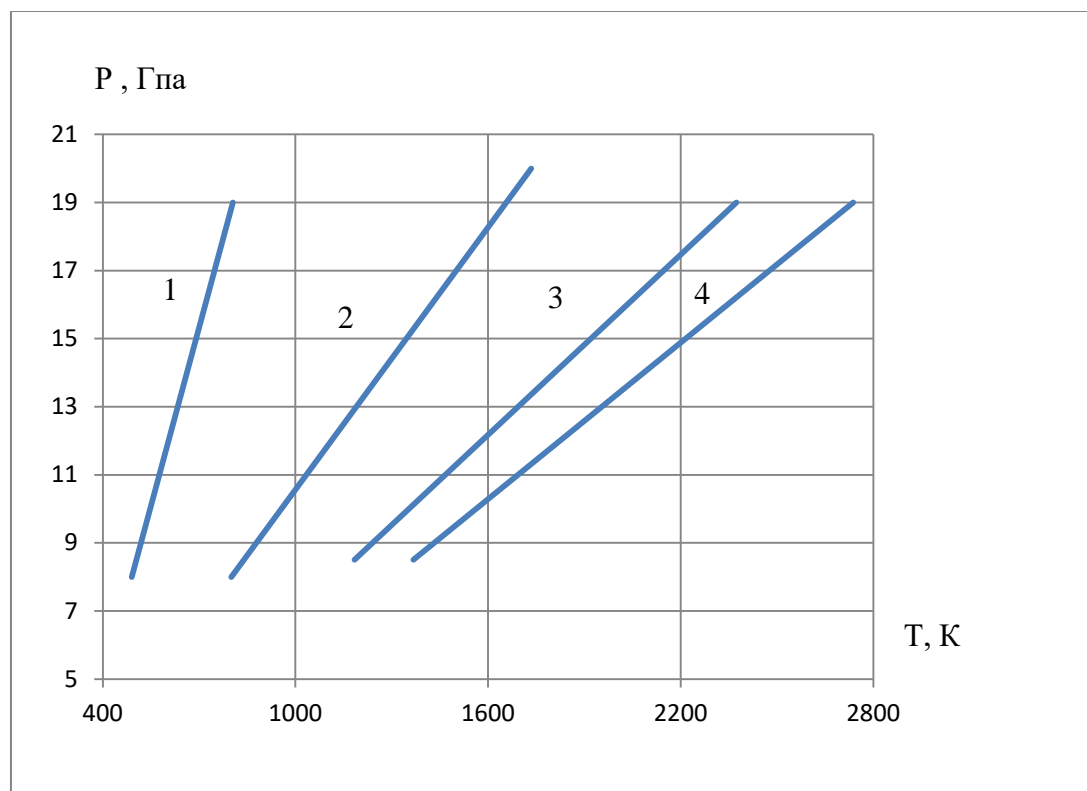


Рис. 3.4.9. Зависимость давления от температуры ударного разогрева.

1 - монокристаллический гексоген;

2 – вода;

3 – бромформ;

4 – четыреххлористый углерод.

Таким образом, давления, при которых появляется излом на записи массовой скорости на границе раздела инерт – ВВ близки к давлениям инициирования детонации без заметной области развития.

Следует отметить, что значения давлений инициирования детонации во всех случаях превышают давление инициирования монокристаллического гексогена, которое составляет 16,4 ГПа [94]. Как видно на рис. 3.4.9. 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.

Ударные адиабаты гексогена, воды и системы приведены на рис. 3.4.10. Расчет ударной адиабаты системы гексоген – вода был произведен по аддитивному методу, согласно которому при фиксированном давлении определяется массовая скорость:

$$U = \alpha U_n + (1 - \alpha) U_{\text{гг}} \quad (24)$$

где α - весовая доля наполнителя;

$U_n, U_{\text{гг}}$ - массовые скорости наполнителя и гексогена.

В работах [88, 95] отмечается, что в многокомпонентных системах внутренняя энергия неаддитивно распределяется между компонентами. Согласно [95] внутренняя энергия может быть представлена в следующем аналитическом виде:

$$E_{\text{гг}} = (1 - \alpha) E = \frac{1}{2} (1 - \alpha) P (V_0 - V); \quad (25)$$

$$E_n = \alpha E = \frac{1}{2} \alpha P (V_0 - V). \quad (26)$$

где $E_{\text{гг}}, E_n$ – внутренняя энергия ВВ и наполнителя;

$V_0 - V$ – начальный и конечный объем смеси;

α – весовая доля наполнителя.

Зная критическое давление инициирования монокристаллического гексогена и системы гексоген – вода 74/26 был проведен расчет внутренней энергии компонентов.

Результаты расчета представлены в таблице 3.4.3.

Расчет показал, что в случае инициирования устойчивой детонации монокристаллического гексогена внутренняя энергия ВВ равна 1291,3 кДж. В случае инициирования устойчивой детонации системы гексоген – вода значение внутренней энергии ВВ увеличивается на 477,6 кДж. Эта разница совпадает с результатами расчета внутренней энергии наполнителя. Таким образом, механизм перераспределение внутренней энергии между компонентами не исключается.

Таблица 3.4.3.

Расчетные значения внутренней энергии исследуемых компонентов.

Взрывчатая система	с, вес, %	ρ_0 , г/см ³	D, км/с	u, км/с	P, ГПа критическое давление	$E_{ВВ}$, кДж Внутренняя энергия ВВ	$E_{н}$, кДж Внутренняя энергия наполнителя	E, кДж Внутренняя энергия системы
Гексоген-вода	26	1,43	7,63	1,61	19,6	1291,3	477,6	1768,9

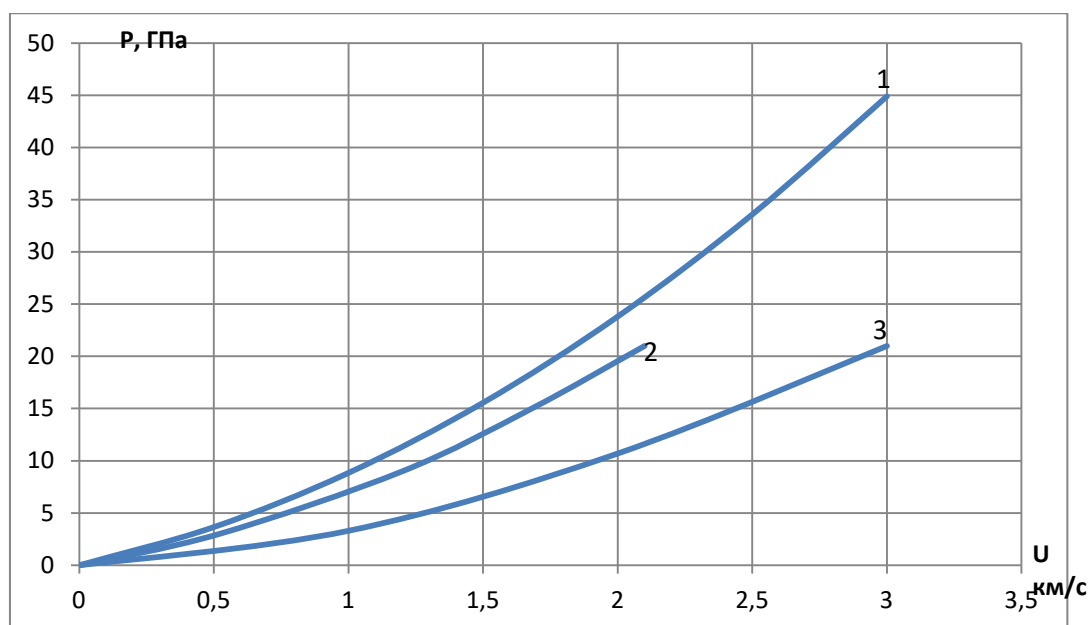


Рис. 3.4.10. Ударные адиабаты ПД.

1 - гексогена с ρ_0 равным 1,8 г/см³;

2 – системы гексоген – вода $\rho_0=1,43$ г/см³;

3 – воды $\rho_0=1,0$ г/см³.

Вероятно, данное воздействие наполнителя на гексоген определяется изменением внутренней энергии за счет частичного поглощения ее наполнителем. Также следует отметить, что в случае инициирования систем гексогена с четыреххлористым углеродом и гексогена с бромформом температура на границе раздела этих наполнителей в 2 – 3 раза превышает необходимую температуру для воспламенения зерен гексогена. Следовательно, о зажигании кристаллов гексогена на границе раздела речь не идет. Вероятно, объяснение этому лежит в области поверхностных взаимодействий компонентов.

На основании приведенных в данной главе уже известных данных по исследованию детонационных характеристик наполненных систем гексогена показано, что полное заполнение объема гексогена водой, занимаемого воздухом, при соотношении воды 15 % по массе, применимо только для монокристаллического гексона с плотностью зерен $1,80 \text{ г/см}^3$ и не достаточно для полного заполнения объема промышленного гексогена водой, имеющего дефекты и внутренние неоднородности. Установлено, что любой из наполнителей приводит к увеличению параметров детонации и, следовательно, к увеличению детонационной теплоты взрыва, также показано, что скорость детонации наполненных систем может быть определена по формуле $D = 5400 + c_{1,2}$

Для сопоставления детонационной способности водонаполненного и насыпного гексогена определены критические диаметры и критическое давление инициирования зарядов, показано, что водонаполнение приводит к снижению детонационной способности, что существенно влияет на безопасность перевозок и хранение водонаполненного продукта.

Методом торможения границ раздела определены значения давлений ударной волны для устойчивого инициирования систем гексогена с водой, четыреххлористым углеродом и бромформом. Зафиксировано давление инициирования наполненных систем гексогена, которые превышают давление

инициирования монокристаллического гексогена. Показано, что это может быть связано с перераспределением внутренней энергии.

Глава 4. Определение тротилового эквивалента водонаполненного гексогена

Водонаполнение гексогена должно определенным образом сказаться на его работоспособности. Согласно работам [96-98] работоспособность конкретного ВВ может быть выражена через показатель работоспособности тротила, т.е. через тротиловый эквивалент, который напрямую зависит от значения выделенной энергии при взрыве. Мерой идеальной работоспособности ВВ может служить максимальная работа, которую совершают продукты взрыва (ПВ) при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды [96]. В работе [99] Беляев А.Ф. дал определение работоспособности ВВ и предложил определять идеальную работу взрыва с помощью следующего выражения:

$$A = Q [1 - (v_1/v_2)^{k-1}] \quad (27)$$

где Q – удельная теплота взрыва;

v_1 - удельный объем или обратная плотность ВВ;

v_2 – объем газообразных продуктов взрыва;

k – показатель политропы идеального газа.

Фактическая величина работы, совершаемая продуктами взрыва в плотных средах, всегда меньше, чем идеальная величина, из-за химических и термодинамических потерь энергии взрыва. К.К. Шведов для приближенного вычисления работы, совершаемой ПВ при их расширении до не слишком малых давлений, когда еще возможно пользоваться политропой вида $pv^k = \text{const}$, предложил пользоваться следующим выражением [100]:

$$A = u_1^2 k/(k-1) [1 - (\rho_2/\rho_1)^{k-1}] \quad (28)$$

где u_1 - массовая скорость;

u_1^2 - полная энергия единицы массы ПВ;

ρ_1 – плотность ПВ в точке Жуге;

ρ_2 - плотность ПВ к концу расширения.

Данное уравнение пригодно для описания поведения ПВ на всех стадиях расширения и имеет общий для конденсированных ВВ вид. К.К. Шведов в качестве критерия работоспособности ВВ предлагает использовать величину $A_{0,5}$ при которой происходит двукратное расширение ПВ ($v_2/v_1 = 2$) и составляет 60-70 % полной работы расширения (A_0).

Представляет интерес подробно рассмотреть ту часть работы взрыва, которая связана с расширением продуктов детонации (ПД). Поведение ПД на всех стадиях расширения от давления детонации до атмосферного можно проследить, используя выражение (28). Также представляет интерес проследить изменение тротилового эквивалента исследуемых ВВ в разных точках расширения ПД. Для этого необходимо получить значения работы взрыва на всем участке расширения ПД, из точек Жуге до степени расширения ρ_2/ρ_1 .

На рис. 4.1. приведены зависимости работы взрыва ПД гексогена плотностью заряда $1,44 \text{ г/см}^3$ (1), системы гексоген – вода 75/25 плотностью заряда $1,43 \text{ г/см}^3$ (2), насыпного гексогена плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$ (3) и тротила плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$ (4) от степени расширения ρ_2/ρ_1 , рассчитанные по формуле (28). Видно, что все кривые сухих конденсированных ВВ подобны. На всем участке расширения ПД конденсированных ВВ наблюдается постоянный рост значений работы взрыва. В случае водонаполненной системы рост наблюдается при 85% расширении ПД и достигает $3,53 \text{ кДж/г}$ и при дальнейшем расширении ПД водонаполненной системы значение работы взрыва не растет.

При 10 % расширении ПД рост кривых зарядов водонаполненной системы плотностью $1,43 \text{ г/см}^3$ и гексогена плотностью $1,44 \text{ г/см}^3$ совпадает, затем заряды гексогена «уходят в отрыв» и при расширении до нулевой плотности работа взрыва достигает максимального значения $4,78 \text{ кДж/г}$. При 75 % расширении ПД

значение работы взрыва водонаполненной системы плотностью 1,43 г/см³ превышает значение работы взрыва насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см³, затем идет затухание роста работы взрыва водонаполненной системы, тогда как значение работы взрыва насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см³ продолжает расти и при нулевой плотности достигает максимального значения 3,79 кДж/г.

Мера максимального роста работоспособности исследуемых ВВ приходится на начало адиабатического расширения, а именно на первые 10% расширения ПД, далее идет плавное снижение роста работоспособности. Вероятно, это связано с физическими свойствами ВВ.

Имея значения работы взрыва ПД конденсированных ВВ на всех стадиях расширения из точек Жуге до расширения нулевой плотности представляет интерес определить максимальное значение работоспособности конкретного ВВ через показатель работоспособности тротила, т.е. через тротиловый эквивалент. Согласно [96] значение тротилового эквивалента может быть рассчитано по следующим классическим выражениям:

$$a_{T1} = \frac{A_{ВВ}}{A_T} \quad (29)$$

$$a_{T2} = \frac{(\eta_{и} * Q_{взр})}{4186 \eta_T} \quad (30)$$

где $a_{T1,2}$ – тротиловый 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.

На рис. 4.1 кривыми (5) и (6) показаны значения отношений работоспособности водонаполненного гексогена плотностью 1,43 г/см³ и

насыпного гексогена плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$ соответственно к работоспособности тротила. Как видно на рис. 4.1 максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$ и в случае насыпного гексогена достигает значения 1,33, а в случае водонаполненного - 1,82.

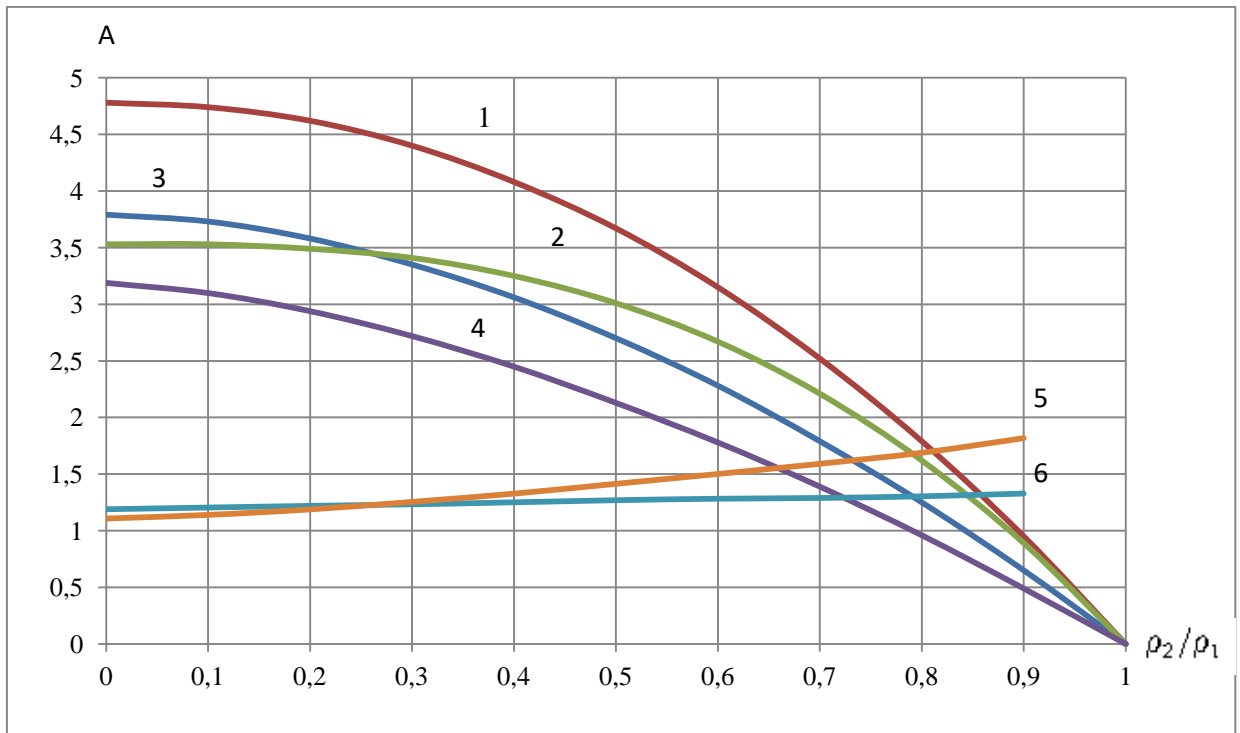


Рис. 4.1. Зависимость работы взрыва ПД исследуемых ВВ от степени расширения ρ_2/ρ_1 . 1 - гексоген плотностью заряда $1,44 \text{ г/см}^3$; 2 - система гексоген – вода 75/25 плотностью заряда $1,43 \text{ г/см}^3$; 3 - насыпной гексоген плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$; 4 - тротил плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$; 5,6 - значения отношений работоспособности водонаполненного гексогена плотностью $1,43 \text{ г/см}^3$ и насыпного гексогена плотностью $1,03 \text{ г/см}^3$ соответственно к работоспособности тротила.

Согласно выражению (30) значение тротилового эквивалента напрямую зависит от значения выделенной энергии при взрыве. Авторами работы [64] был проведен ряд экспериментов по определению теплоты взрыва водонаполненного

гексогена в зависимости от содержания воды и дисперсности порошка. Так, в данной работе было экспериментально показано, что теплота взрыва на единицу веса гексогена различной степени дисперсности линейно возрастает при увеличении содержания воды в заряде от 0 до 24%, а введение в заряд ВВ воды более 24% не приводит к дальнейшему увеличению теплоты взрыва. Воспользовавшись данными по теплоте взрыва системы гексоген – вода с пропорциональным соотношением 75/25 был определен тротильный эквивалент данного продукта по (30).

Результаты вычислений приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1.

Расчетные значения тротилового эквивалента.

ВВ/система	ρ , г/см ³	Q, Дж/г	a_{T1} (29)	a_{T2} (30)	a_T (31)
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

В таблице 4.1. приведены значения тротильных эквивалентов насыпного и водонаполненного гексогена рассчитанных по (29) и (30). Видно неплохое совпадение полученных результатов. Так как уже было выше отмечено, что максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$, и при этом расширении работа взрыва тротила составляет 0,49 кДж/г, то представляется возможным расчет тротилового эквивалента вести по следующему выражению:

$$a_T = \frac{u_{1k-1}^2 \cdot k \cdot (1 - 0,9^{k-1})}{0,49} \quad (31)$$

где a_T – тротильный эквивалент;

u_1 , u_1^2 – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ;

0,49 кДж/г – работа ПД тротила при $\rho_2/\rho_1 = 0,9$.

Максимальное значение тротилового эквивалента в точке расширения ПД исследуемых ВВ равной 0,9 подтверждает максимальный рост работоспособности ВВ на данном участке и может служить в качестве критерия работоспособности исследуемого ВВ.

Предложенная методика расчета тротилового эквивалента конденсированных ВВ на базе справочных данных позволяет с хорошей степенью точности определить значение тротилового эквивалента.

Глава 5. Детонация, условия возбуждения и тротиловый эквивалент паровоздушных смесей и условия безопасности при перевозке и наливке

Одним из основных факторов, влияющих на безопасность транспортировки и хранения нефтепродуктов, или газов из класса алканов (насыщенных углеводородов) является наличие паров продукта, концентрационные пределы которого образуют с воздухом взрывоопасную смесь. После слива продукта с котла железнодорожной цистерны, за счёт сохранившихся остатков и плёнки на стенках сосуда, концентрация паров углеводородов достигает 50 % от объема [45]. Так, «пустая» железнодорожная цистерна при наличии внешнего инициирующего импульса может создать немалую угрозу для населения и окружающей среды.

В работе [101] распространение детонации в газообразных взрывчатых смесях делят на две большие группы:

- Исследования, в основе которых лежит представление о детонационной волне как об одномерном комплексе, состоящем из плоской ударной волны, зоны химической реакции и последующего потока продуктов детонации.
- Исследования, связанные с открытием и объяснением спиновой и пульсирующей (многофронтной) детонации.

В работе [102] в результате экспериментальных исследований установлено следующее:

1. Скорость распространения детонации в зависимости от характеристик газовой смеси колеблется от 1000 до 3500 м/с, что в несколько раз больше скорости звука в этих смесях при обычных температурах и давлениях.

2. Скорость детонации мало зависит от материала трубы, в которой заключен газ, толщины ее стенок и диаметра, если последний превосходит в несколько раз критический.

3. Скорость детонации не зависит от того, где производится инициирование детонации, у открытого или закрытого конца трубы.

4. Скорость детонации слабо зависит от изменения начальной температуры газовой смеси.

5. С ростом начального давления (плотности) газовой смеси скорость детонации возрастает медленно при сравнительно низких давлениях и более заметно при повышенных давлениях.

В качестве средств инициирования детонации в газообразных взрывчатых смесях наибольшее распространение получили: взрыв небольшого заряда конденсированного ВВ, взрыв другой газовой смеси, электровзрыв проволоочки, высоковольтная или лазерная искры. В качестве критерия инициирования детонации используют величину минимальной энергии E_{*v} , которую необходимо ввести во взрывчатую газовую смесь, что бы создать в ней ударную волну, переходящую в самоподдерживающуюся детонацию. Индекс $v = 1,2,3$ обозначает плоскую, цилиндрическую и сферические волны соответственно. В работе [101] представлены значения E_{*v} часто встречающихся стехиометрических смесей, которые получены экспериментальным методом. Данные значения приведены в таблице 5.1.

В основном исследовались газообразные взрывчатые смеси, и к сожалению, не уделялось внимание парообразным (пропан–бутановым) смесям. В то время как видно из практики, что разрушение при взрыве пропан–бутановых смесей более интенсивнее, чем наиболее детонационно-стойкой метановоздушной смеси. Возможно, это связано с большей плотностью данных смесей.

Смесь паров насыщенных углеводородов с воздухом при наличии источника зажигания может воспламеняться и гореть, как вблизи источника зажигания, так и при его удалении, только если концентрация паров

углеводородов находится между нижним и верхним концентрационными пределами распространения пламени. Чем шире диапазон концентрационного предела распространения пламени, тем более взрывоопасна смесь.

Таблица 5.1.

Значения минимальной энергии инициирования детонации газовых смесей.

Смесь	$P_0, 10^5 \text{ Па}$	ν	Инициатор	$E_{*v}, \text{ Дж} \cdot \text{м}^{\nu-3}$
$C_2H_2+2,5O_2$	0,024	2	Взрыв пров.	270
	0,052	2	Взрыв пров.	100
	0,066	2		22
	0,13	2	искра	11,5
	0,27	2		6,3
	0,4	2		4,5
$2H_2+O_2$	0,5	2	Искра	300
	0,5	2	Взрыв пров.	460
$C_2H_2+\text{воздух}$	1	2	КВВ	$2,3 \cdot 10^4$
	1	3		$4,6 \cdot 10^3$
$H_2+\text{воздух}$	1	3	КВВ	$4,6 \cdot 10^3$
	1	3		$6,3 \cdot 10^3$
$C_2H_4+\text{воздух}$	1	3	КВВ	$4,4 \cdot 10^4$
$C_2H_6+\text{воздух}$	1	3		$1,6 \cdot 10^5$
$C_3H_8+\text{воздух}$	1	3		$3,4 \cdot 10^5$
$C_4H_4+\text{воздух}$	1	3		$3,4 \cdot 10^5$
$C_4H_4+\text{воздух}$	1	3		$4,2 \cdot 10^5$
$CH_4+\text{воздух}$	1	1	$2H_2+O_2$	10^6

При концентрации паров углеводородов в смеси с воздухом меньше нижнего концентрационного предела распространения пламени, при наличии источника зажигания смесь не будет гореть и взрываться, поскольку выделяющейся вблизи источника зажигания теплоты химической реакции недостаточно для подогрева смеси до температуры воспламенения в удалении от источника зажигания.

Если концентрация паров углеводородов в смеси превышает верхний концентрационный предел распространения пламени, то количество кислорода (окислителя) в смеси недостаточно для поддержания распространения пламени вдали от источника зажигания.

На значения концентрационного предела распространения пламени оказывают влияние следующие факторы:

- физико-химические свойства углеводородов;
- давление смеси (обычно повышение давления не сказывается на нижнем концентрационном пределе распространения пламени, но верхний концентрационный предел распространения пламени может сильно возрастать);
- температура (повышение температуры расширяет концентрационный предел распространения пламени);
- наличие в смеси паров углеводородов с воздухом негорючей инертной добавки.

Внесение в смесь инертной добавки понижает значение верхнего концентрационного предела распространения пламени практически пропорционально его концентрации вплоть до точки флегматизации, где верхний и нижний концентрационные пределы распространения пламени совпадают. Нижний концентрационный предел распространения пламени при этом повышается незначительно.

В середине прошлого века в Куйбышевском индустриальном институте им. В.В. Куйбышева (СамГТУ), были проведены исследования, направленные на изыскание способа проведения сварочных работ при ремонте нефтеналивных судов без освобождения их от нефтепродуктов. При этом были разработаны лабораторные методики, являющиеся прообразом современных способов определения концентрационных пределов распространения пламени, измерения упругости (давления) насыщенных паров и определены безопасные концентрации флегматизаторов в виде дымовых газов (углекислоты).

Система инертных газов, дымовых в том числе, широко применяется на нефтеналивных судах, при этом содержание кислорода в пространстве грузовых танков по международным правилам не должно превышать 8% в любой точке измерения в грузовом танке [103].

В четвертой главе была предложена формула (31) для определения тротилового эквивалента бризантных ВВ и предполагалось, что максимальное значение тротилового эквивалента приходится на начало адиабатического расширения, где плотность расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$. Расширения продуктов детонации в конденсированном и паровоздушном взрывчатых веществах принципиально различные. Так показатель политропы процесса в конденсированном ВВ при их расширении изменяется от 3,0 до 1,3, а при детонации паровоздушных смесей показатель политропы остается примерно одинаковым $\approx 1,3$. Очевидно, что картина разложения газовой смеси и значения работы в разных точках расширения будет отличаться от конденсированных ВВ. Поэтому динамика изменения тротилового эквивалента конденсированного ВВ и паровоздушной смеси будет различной.

В работе экспериментально 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 изменения работы взрыва ПД рассматриваемых веществ из точек Жуге до степени расширения ρ_2/ρ_1 и изменения тротилового эквивалента исследуемых веществ в разных точках расширения ПД.

Для определения средней концентрации паров данных продуктов был использован хроматограф ЛХМ-80 в соответствии с ГОСТ 14920-79 [104].

В таблице 5.2. приведены округленные значения концентрации паров метана, этана и пропана, полученные экспериментальным методом. Значения концентраций остальных исследуемых газов были взяты стехиометрическими.

Таблица 5.2.

Параметры детонации паровоздушных смесей.

Горючее	% горючего	Удельная теплота сгорания Q , кДж/кг [105]	Скорость детонации D , м/с (32)	Массовая скорость U м/с	$a_T(0,9)$ (29)	a_T (30) Класси- ческий метод	$a_T(0,9)$ (33)
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
ацетилен (C_2H_2)	7,16	3456,40	2500,39	1050,58	0,33	0,32	0,33

Продолжение Таблицы 5.2.

1	2	3	4	5	6	7	8
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 определить следующие параметры: скорость детонации, детонационную теплоту взрыва и давление ударной волны.

Для определения параметров детонации в работе [47] было предложено использовать три уравнения сохранения (массы, импульса, энергии), уравнение состояния и дополнительное условие отбора единства скорости детонации. Таким образом, было получено основное гидродинамическое уравнение для скорости детонации:

$$D = \sqrt{2Q(k^2 - 1)} \quad (32)$$

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 $\approx 1,25$.

Детонационная теплота взрыва была заимствована из работы [105].

Результаты расчета скоростей детонации паровоздушных смесей представлены в таблице 5.2.

Как отмечалось выше, важной энергетической характеристикой ВВ является механическая работа, которую совершает взрыв в плотных средах. Для нахождения работы совершаемой продуктами детонации исследуемых

паровоздушных смесей было использовано выражение, предложенное Шведовым К.К. (28).

На рис. 5.1. 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 (28).

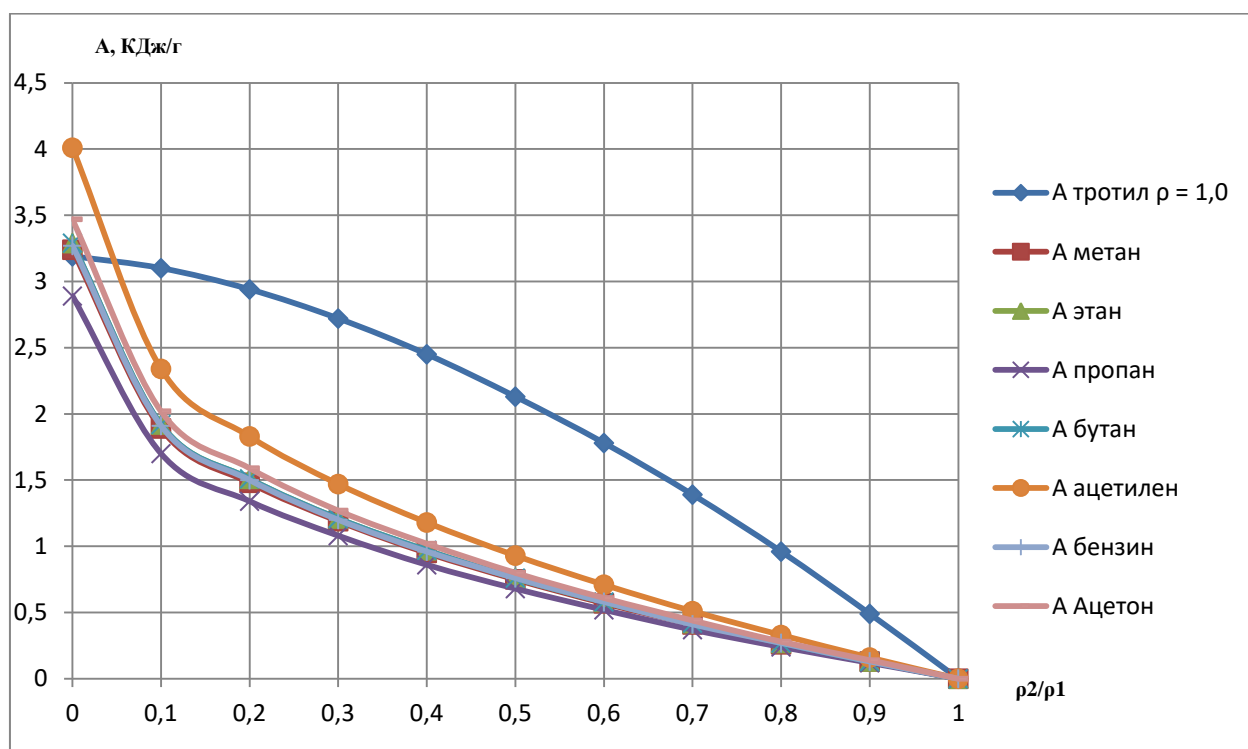


Рис. 5.1. Зависимость работы взрыва ПД исследуемых веществ от степени расширения ρ_2/ρ_1 .

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 плотности, стремящейся к нулю, 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).

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 $3,19 \text{ кДж/г}$.

В случае с конденсированными ВВ, как было отмечено выше, мера максимального роста работоспособности приходится на начало адиабатического расширения, а именно на первые 10% расширения ПД, далее идет плавное снижение роста работоспособности. В случае с паровоздушными смесями максимальный рост приходится на последние 10% расширения ПД. Вероятно, это связано с физическими свойствами паровоздушных смесей.

Имея значения работы взрыва паровоздушной смеси на всех стадиях расширения из точек Жуге до расширения плотности, стремящейся к нулевому значению, было определено максимальное значение работоспособности данного продукта через показатель работоспособности тротила, т.е. через тротиловый эквивалент. Согласно [96] значение тротилового эквивалента может быть рассчитано по (29) и (30).

На рис. 5.2. приведены значения отношений работоспособности исследуемых взрывчатых смесей к работоспособности тротила. Как видно на рис. 5.2. максимальное значение тротилового эквивалента приходится к концу расширения ПД и лежит в пределах от 0,9 до 1,25 в зависимости от исследуемой смеси. Однако при степени расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$ наблюдается скачок, что говорит об аномальном энерговыделении, затем небольшое снижение работоспособности и плавный рост. Значения тротилового эквивалента в этой точке колеблется от 0,24 до 0,33, в зависимости от паровоздушной смеси. В работе [106] предложена формула для определения тротилового эквивалента

конденсированных ВВ, при которой максимальное значение приходится на плотность расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$.

Представляет интерес применить данный метод расчета для паровоздушных смесей и сравнить полученный результат с классическим методом определения тротилового эквивалента по формуле (30).

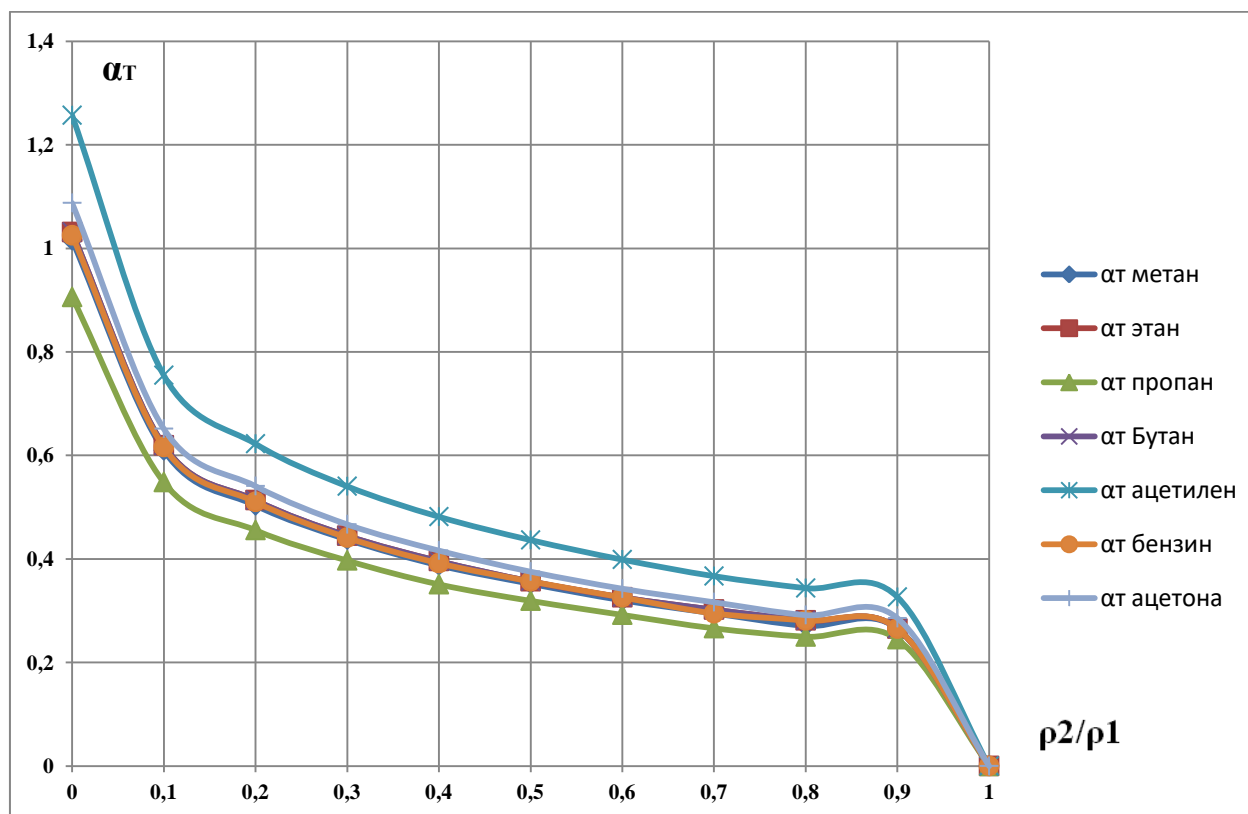


Рис. 5.2. Зависимость значения отношений работоспособности исследуемых взрывчатых смесей к работоспособности тротила.

В таблице 5.2. приведены значения тротилового эквивалента исследуемых взрывчатых смесей рассчитанных по (29) и (30). Видно неплохое совпадение полученных результатов.

Выше было отмечено, что для конденсированных ВВ максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к плотности расширения ПД,

стремящейся к нулю, а к плотности расширения $\rho_2/\rho_1 = 0,9$, и была предложена следующая формула расчета тротилового эквивалента:

$$a_T = \frac{u_{1k-1}^2 \cdot k \cdot (1 - 0,9^{k-1})}{0,49} \quad (33)$$

где a_T – тротиловый эквивалент;

где u_1, u_1^2 – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ;

k – показатель адиабаты продуктов взрыва;

0,49 кДж/г – работа ПД тротила при $\rho_2/\rho_1 = 0,9$.

В таблице 5.2. приведены результаты расчета исследуемых взрывчатых смесей данным методом. Видно, что данный метод хорошо подходит не только для расчета тротилового эквивалента конденсированных ВВ, но и для паровоздушных взрывчатых смесей.

В качестве теоретического расчета параметров детонации остаточного продукта в конкретной железнодорожной цистерне, был проведен хроматографический анализ состава проб паровоздушной смеси. Анализ 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. Причем данное значение отвечает стехиометрическому соотношению компонентов.

Для прогнозирования параметров процесса детонации, как выше было отмечено, необходимо определить скорость детонации, детонационную теплоту взрыва и давление ударной волны.

Для определения скорости детонации можно воспользоваться уравнением (32) или следующими уравнениями, предложенные в работе [56]:

$$D = \left(\frac{p_H}{p_0}\right)^3 C_0 \quad (34)$$

$$D = 1,2 C_0 + 1,76 U \quad (35)$$

где $\frac{p_H}{p_0}$ - отношение плотностей в зоне химической реакции и начальной;

C_0 - скорость звука в продуктах детонации;

U – массовая скорость.

Результаты расчета скоростей детонации паровоздушной смеси на основе гидродинамического уравнения, динамического метода и уравнения ударной адиабаты представлены в таблице 5.3. Усреднение всех трех методов расчета дало наиболее близкие значения к экспериментальным результатам, которое было заимствовано с работы [107] и представлено в таблице 5.3.

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 заимствованы с работы [108] и представлены в таблице 5.3.

Таблица 5.3.

Параметры детонации и значения тротилового эквивалента исследуемой паровоздушной смеси.

Горю- чее	% горю- чего	$Q_{эксп}$ кДж/кг	D (32) м/с	D (34) м/с	D (35) м/с	D ср. м/с	D [107] м/с	U (38) м/с	P (37) МПа	a_T (30) Клас- сичес- кий метод	a_T (0,9) (33)
C_3H_8	6	2801	1802,6	1957	1877,5	1879	1870	897,7	2,23	0,27	0,24

Зная значения теплоты взрыва 1 кг паровоздушной смеси, было определено значение теплоты взрыва всей массы исследуемого продукта.

$$Q_{взр} = \rho * Q_{эксп} * V, \quad (36)$$

где ρ – плотность паровоздушной смеси;

$Q_{эксп}$ - теплота взрыва одного кг паровоздушной смеси;

V – объем паровоздушной смеси.

$$Q_{взр} = 269\,815,4 \text{ кДж.}$$

Для решения инженерных задач взрывного дела и для анализа поражающего фактора, на основании полученных данных было определено давление ударной волны паровоздушной смеси и вычислено значение тротилового эквивалента.

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

$$P = p * D * U; \quad (37)$$

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

$$U = \frac{D}{k+1}; \quad (38)$$

Полученные результаты массовой скорости и давления представлены в таблице 5.3.

Для определения тротилового эквивалента было использовано два метода - классический (30) и предложенный выше (33).

Полученные значения приведены в таблице 5.3, а расчетная мощность взрыва всей массы паровоздушной смеси составила 25,184 кг в тротиловом эквиваленте.

Авторами работы [109] был предложен безопасный способ транспортировки и хранения таких продуктов, который заключается в принудительном заполнении объема данной цистерны инертными газами, тем самым перевозимый продукт флегматизируется. Флегматизация может быть осуществлена за счет введения в паровоздушную смесь инертных компонентов.

Вопросы, связанные с изучением влияния разбавления паровоздушных смесей в зоне взрывоопасных концентраций горючего компонента инертными добавками (флегматизаторами) занимались многие учебные заведения и отраслевые НИИ. В результате накоплен обширный экспериментальный материал по влиянию различных «флегматизаторов» на составы взрывоопасных углеводородных (метан, пропан и др.) смесей с воздухом, а так же разработан стандартный способ определения минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора и минимального безопасного содержания кислорода.

Для примера на рис. 5.3. приведена общая для метана и пропана зависимость изменения концентрационного предела распространения пламени от содержания разных флегматизаторов в смеси [110,111].



Рис.5.3. Зависимость концентрационного предела распространения пламени от содержания флегматизатора в смеси.

Линии: 1 – бромистый метил; 2 – тетрагхлорметан; 3 – двуокись углерода; 4 – водяной пар; 5 – азот; 6 – гелий; 7 – аргон.

Смеси находящиеся внутри кривых на рис. 5.3. (в «полуострове воспламенения»), относятся к взрывоопасным, а концентрация флегматизатора в пике «полуострова» соответствует минимальной флегматизирующей концентрации флегматизатора и позволяет рассчитать минимальное безопасное содержание кислорода [112].

Одним из ключевых факторов при выборе инертного газа в качестве флегматизатора является их стоимость. Существуют несколько способов получения данных продуктов. Известно, что в последние годы наиболее

современными являются мембранные установки, принцип работы которых основан на разделении газов. Такие установки дают возможность получать газ чистотой до 99,9 %. Стоимость мембранных установок значительная, однако стоит отметить, что себестоимость получения инертного газа с использованием данного оборудования в промышленных масштабах является низкой. В таблице 5.4. представлен анализ цен инертных газов полученных с использованием мембранных установок, принцип которых основан на разделении газов.

Таблица 5.4.

Анализ цен инертных газов.

№ пп	Газ	Масса	Цена, \$
1	Азот (N ₂)	тонна	113,29
2	Углекислый газ (CO ₂)	тонна	129,47
3	Аргон (Ar)	тонна	137,56

Как видно из таблицы 5.4. 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 сливно-наливными вентилями данный газ, имея меньшую молярную массу по сравнению с воздухом и большинством легких углеводородов, не смещает паровоздушную смесь, находящуюся в устойчивом равновесии. Данную паровоздушную смесь он лишь разбавляет до нижнего концентрационного предела 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 (CO₂), т.к. его получают на мембранных установках разделения воздуха как побочный

продукт получения чистого кислорода, азота и аргона. Данный газ за счет своей массы выталкивает 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.

Авторами [109] было предложено техническое решение, в результате которого железнодорожная цистерна рис. 5.4. 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.

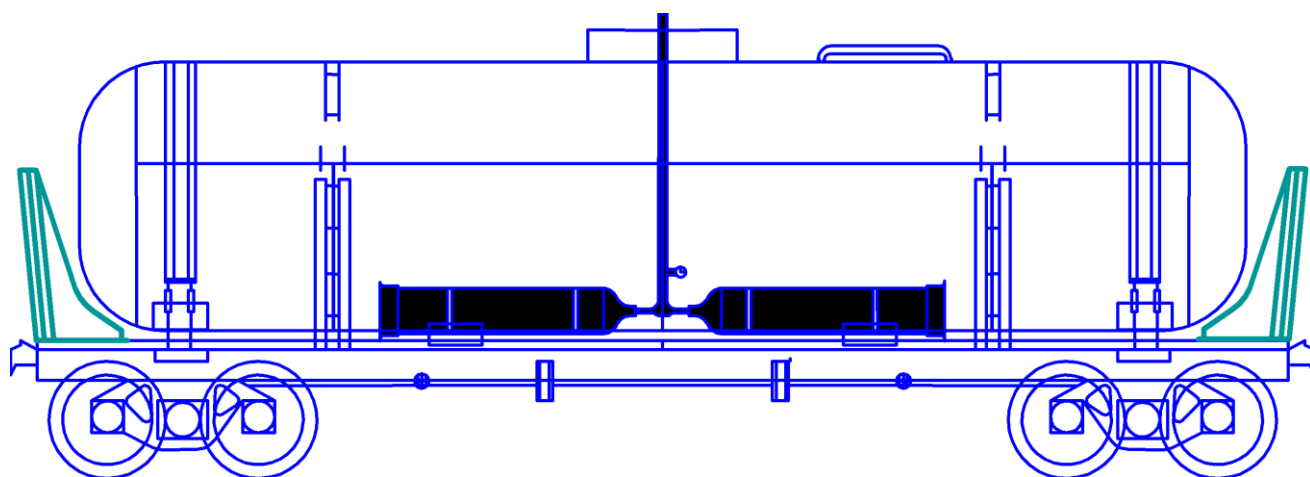


Рис. 5.4. Железнодорожная цистерна, оборудованная дополнительной системой безопасности.

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 вентиль. После опустошения четырех баллонов данный вентиль перекрывается, а объем котла цистерны остается полностью заполненным инертным газом CO_2 .

В результате проведенного анализа, методов определения параметров детонации паровоздушных смесей, на основе гидродинамического уравнения, динамического метода и уравнения ударной адиабаты показано, что усреднение трех методов расчета дает наиболее близкие значения к экспериментальным результатам. В данной главе был определен тротиловый эквивалент при взрыве пропана с воздухом разными методами, в том числе классическим. Зафиксировано, что максимальное энерговыделение происходит при отношении плотностей конечной к начальной равной $0,9$. На конкретном примере произведен расчет тротилового эквивалента при взрыве оставшихся продуктов в железнодорожной цистерне. Автором предложена обобщенная формула расчета тротилового эквивалента в виде $a_T = \frac{u_{1k-1}^2 \frac{k}{k-1} (1-0,9^{k-1})}{0,49}$. На основании проведенного анализа технических характеристик рассматриваемых инертных газов предложен безопасный способ транспортных операций за счет заполнения свободного пространства вагона цистерны углекислым газом.

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 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 $\sim 3\%$.

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 инициирования 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.

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.

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 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Recommendations on the transport of dangerous goods. Model Regulations. Volume I. Seventeenth revised edition. United Nations. New York and Geneva, 2011. – 429 p.
2. Андросюк В.Н. Перевозка взрывчатых материалов по железным дорогам / В.Н. Андросюк, В.М. Рудановский // М. Маршрут, 2003. – 442с.
3. Кармолин А.Л. Безопасная перевозка взрывчатых веществ железнодорожным транспортом / А.Л. Кармолин, А.Д. Чернюгов, Ю.Н. Коршунов // М. Транспорт, 1992. – 383с.
4. Крючков А.А. Организация перевозок опасных грузов различными видами транспорта / А.А. Крючков, Н.М. Жаворонков // М. Недра, 1968. – 343с.
5. Андросюк В.Н. Опасные грузы. Справочник / В.Н. Андросюк // М. Маршрут, 2004. – 232с.
6. The Hazardous Materials Regulations. U.S. Department of Transportation Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration Washington. – 30 p.
7. Ministry of transport. Transporting Dangerous Goods Safely An industry guide October 2008. ISBN 978-0-478-07236-5.
8. The Training Material on “Dangerous Goods Handling (All modes)” has been produced under Project Sustainable Human Resource Development in Logistic Services for ASEAN Member States with the support from Japan-ASEAN Integration Fund (JAIF). Copyright Association of Southeast Asian Nations (ASEAN) 2014. – 29 p.
9. РД 15-73-94. Правила безопасности при перевозке опасных грузов железнодорожным транспортом.
10. Правила безопасности и порядок ликвидации аварийных ситуаций с опасными грузами при перевозке их по железным дорогам. Утв. МЧС РФ и МПС РФ от 31 октября, 25 ноября 1996 г. № 9-733/3-2, ЦМ – 407.
11. Аттетков А.В. О возможности разложения гетерогенных ВВ во фронте слабой ударной волны / А.В. Аттетков, В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. 1987. №4 С. 113-123.

12. Афанасьев Г.Т. Инициирование твердых ВВ ударом / Г.Т. Афанасьев, В.К. Боболев // М. Наука. 1968. 174с.
13. Дубовик А.В. Чувствительность жидких взрывчатых систем к удару / А.В. Дубовик, В.К. Боболев // М. Наука. 1978. 232с.
14. Хасаинов Б.А. Вязкопластический механизм образования горячих точек в твердых гетерогенных ВВ / Б.А. Хасаинов, А.А. Борисов, Б.С. Ермолаев и др. // Детонация. Вып. 2. Черноголовка. 1981.
15. Yang Li. Preparation, crystal structure, thermal decomposition and explosive properties of a novelty energetic compound [Cu (1,1' – azobis (1,3,4 - triazole))₃(ClO₄)₂·H₂O]_n / Li Yang, Wu Bidong // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2013. P 113.
16. Zhang T.L. The Estimation of Critical-Temperatures of Thermal-Explosion for Energetic Materials Using Nonisothermal DSC / T.L. Zhang, R.Z. Hu, Y. Xie // Thermochim. Acta, 1994, 244, 171-176.
17. Ramaswamy A.L. Mesoscopic Approach to Energetic Material Sensitivity / A.L. Ramaswamy // J. Energ. Mater. 2006, 24, pp. 35-65.
18. Афанасьев Г.Т. Чувствительность ВВ к механическим воздействиям и способы флегматизации / Г.Т. Афанасьев, В.К. Боболев, И.А. Карпучин // Взрывное дело. М., 1963.
19. Кедринский В.К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели. Новосибирск: Изд. СО РАН. 2000. -435с.
20. Садовский М.А. Механические действия воздушных ударных волн взрыва по данным экспериментальных исследований / М.А. Садовский // Физика взрыва №1. М.: 1952. С. 22-110.
21. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. М.: Наука. 1967.
22. Андреев С.Г. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. // М. Физматлит. Изд. 3-е. 2002. -656с.
23. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды / К.П. Станюкович // М., Наука, 1971, -856с.

24. Tarver C.M. Multiple Shock Initiation of LX-17 / C.M. Tarver, T.M. Cook, P.A. Urtiev // The 10-th Intern. Deton. Symp. USA, Boston, 1993.
25. Hans-Jürgen Fahl. Dynamics of Explosive Fumes / Hans-Jürgen Fahl // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2008. P 16.
26. Recommendations on the Transport of Dangerous Goods, Manual of Tests and Criteria Fifth revised edition. United Nations. New York and Geneva, 2009. – 450 p.
27. Тютяев А.В. Метод определения чувствительности жидких взрывчатых веществ к удару / А.В. Тютяев, В.П. Требунских, А.С. Должиков и др. // XVII Харитоновские чтения. Сборник тезисов, докладов. Саров 2015. С. 44-45.
28. Лоскутова Л.А. Определение скорости быстропротекающих процессов. Методические указания. / Л.А. Лоскутова, А.П. Егоров, А.С. Козлов // Санкт – Петербург 2002г. - 17с.
29. Кривченко А.Л. Определение и расчет параметров детонации зарядов ВВ. Методические указания. / А.Л. Кривченко, И.А. Башарина, Д.А. Кривченко // Самара 2008г. -31с.
30. Альтшулер Л.В. Применение ударных волн в физике высоких давлений / Л.В. Альтшулер //УФН. 1965. Т.85, №2. С. 197-258.
31. Альтшулер Л.В. Развитие в России динамических методов исследования высоких давлений. / Л.В. Альтшулер, Р.Ф. Трунин, В.Д. Урлин и др. // УФН.1999. Т.169, №3.
32. Дубовик А.С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. / А.С. Дубовик // М.: Наука. 1984. -320с.
33. Зельдович Я.Б. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. 2-е изд./ Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер // М.: Наука. 1976.
34. Килер Р. Ударные волны в конденсированных средах / Р. Килер, Е. Ройс // Физика высоких плотностей энергии. Под ред. П. Кальдиролы, Г. Кнопфеля. Пер. с англ. // М.: Мир, 1974.

35. Похил П.Ф. Методы исследования процессов горения и детонации / П.Ф. Похил, В.М. Мальцев, В.М. Зайцев // М.: Наука. 1969. -301с.
36. Саламандра Г.Д. Фотографические методы исследования быстропротекающих процессов / Г.Д. Саламандра // М.: Наука. 1974.
37. Сысоев Н.Н. Применение импульсной интерферометрии к исследованию отражения ударных волн / Н.Н. Сысоев, Ф.В. Шугаев // Высокоскоростная фотография и метрология быстропротекающих процессов. Сб. тез. докл. М. 1981. -124с.
38. Уртъев П.А. Диагностика ударно-волновых процессов / П.А. Уртъев // Химическая физика. 1993. №5.
39. Воробьев А.А. Использование катушек Гельмгольца в электромагнитном методе / А.А. Воробьев, А.Н. Дремин, Л.И. Савин и др. // Физика горения и взрыва. 1983. №4 С. 146-149.
40. Хейс Б. Приборы для научных исследований. 1981. №4. С. 92-102.
41. Košík P., Hadzik J., Wilk Z. Electromagnetic method in determination detonation parameters of ammonium nitrate explosives / P. Košík, J. Hadzik, Z. Wilk // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2015. P.68.
42. Zygmunt B. Detonation Parameters of Mixtures Containing Ammonium Nitrate and Aluminum / B. Zygmunt // Central European Journal of Energetic Materials, 2009, 6 (1), pp.57-66.
43. Трунин Р.Ф. Исследования экстремальных состояний конденсированных веществ методом ударных волн. Уравнение Гюгонио. / Р.Ф. Трунин // Саров 2006. -287с.
44. Дремин А.Н. Детонационные волны в конденсированных средах / А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов и др. //М. Наука 1970. -164с.
45. Одинцов А.Б. Сжиженные нефтяные газы и техника безопасности / А.Б. Одинцов // Грозный Чеч.-Инг. кн. изд-во 1959.
46. Бартенева С.С. Детонационные покрытия в машиностроении / С.С. Бартенева, Ю.П. Федько, А.И. Григоров. // Машиностроение 1982. -216с.
47. Орленко Л.П. Физика взрыва / Л.П. Орленко // Физматлит. 2004 –832с.

48. Ou Y.X. Explosives / Y.X. Ou // Beijing Institute of Technology Press, 2006.
49. Щетинков Е.С. Физика горения газов. / Е.С. Щетинков // М. Наука. 1965. -739с.
50. Миллер С.А. Ацетилен, его свойства, получение и применение. / С.А. Миллер // Ленин. отд. Химия. 1969. – 679с.
51. Андреев К.К. Теория взрывчатых веществ / К.К. Андреев, А.Ф. Беляев // М. Оборонгиз. 1960. -572с.
52. Зельдович Я.Б. Теория детонации / Я.Б. Зельдович, А.С. Компанец // М. Гос. изд-во технико-теоретической лит-ры. 1955. -268с.
53. Дремин А.Н. Открытия в исследовании детонации молекулярных конденсированных взрывчатых веществ в XX веке / А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва. 2000. №6 С. 31-44.
54. Трофимов В.С. Неидеальная детонация конденсированных ВВ. Автореф. докт. дисс. ИХФ АН СССР. Черноголовка 1983.
55. Cowperthwaite M. Single shock curve buildup and a hydrodynamic criterion for shock initiation of detonation / M. Cowperthwaite // Seventh Intern. Colloq. Gasdyn. Explos. and React. Syst. Gottingen, 1979. P. 269 - 281.
56. Кривченко А.Л. Некоторые особенности и расчет параметров детонации разбавленных ВВ. / А.Л. Кривченко // Химическая физика. 1993. Т 12, №5 – С. 698 – 700.
57. ГОСТ 4545-88. Вещества взрывчатые бризантные. Методы определения характеристик чувствительности к удару.
58. Друкованный М.Ф. Некоторые особенности детонации гранулированных ВВ / М.Ф. Друкованный, В.М. Комир, В.И. Билоконь и др. // Взрывное дело. 1971. №70/27. С. 5-9.
59. Данчев П.С., Исследование детонации водонаполненных ВВ / П.С. Данчев, В.П. Ветлужских, Е.П. Попков и др. // Взрывное дело. 1971. №70/27. С. 18-22.

60. Бахтин Г.А. Исследование детонации водонаполненных ВВ на основе нагретого раствора аммиачной селитры / Г.А. Бахтин, В.Л. Коган // Взрывное дело. 1971. №70/27. С. 23-28.
61. Баранов Е. Г. О детонационных свойствах водонаполненных ВВ с невзрывчатым сенсibilизатором / Е. Г. Баранов, В.М. Низовкин, А.П. Шестаков // Взрывное дело. 1973. №74/31. С.44 – 46.
62. Ветлужских В.П. Исследование свойств водонаполненных ВВ, технологии их приготовления и заряжания на карьерах. Дис. канд. техн. наук. 1975. -151с.
63. Романов А.И. Исследование условий возбуждения детонации гранулированных и водонаполненных ВВ / А.И. Романов, И.В. Кирис, Б.А. Игнатъев и др. // сборник «Использование взрыва в народном хозяйстве». 1970. Ч.1. С. 135-145.
64. Ващенко В.И. Энергия взрыва водонаполненного гексогена / В.И. Ващенко, В.Н. Матюшин, В.И. Пепекин и др. // Физика горения и взрыва. 1971. Т. 3. С. 429-432.
65. Апин А.Я. О полном использовании энергии взрыва / А.Я. Апин, Н.Ф. Велина, Ю.А. Лебедев // ПМТФ. №5. 1962. С. 96-106.
66. Апин А.Я. О критических диаметрах зарядов ВВ и скорости детонации гексогена / А.Я. Апин, Н.Ф. Велина // Взрывное дело. М. Недры. №63/20. 1967. С. 5-37.
67. Mazurek M. Phlegmatisation of an explosive in an aqueous suspension / M. Mazurek, K. Mazurek // Patent № WO2014204374 A1. 2014.
68. Варфоломеев Д.А. Исследование профилей детонационных волн флегматизированного тэна / Д.А. Варфоломеев, К.Ф. Гребенкин, А.Л. Жеребцов и др. // XVII Харитоновские чтения. Сборник тезисов, докладов. Саров 2015. С. 92-93.
69. Bouma R. Impact Testing of RDX; the Effect of Crystal Quality / R. Bouma, A. Heijden, A. Boluijt // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2008. P. 11.

70. Bouma R. Microscopic characterization of defect structure in RDX crystals/ R. Bouma, W. Duvalois // *Journal of Microscopy*. Volume 252, Issue 3 December 2013. PP 263–274.

71. Шведов К.К. Инициирование детонации ударной волной в водонаполненном гранулированном тротиле. /К.К. Шведов, А.Н. Дремин, А.Л. Кривченко и др. // *Физика горения и взрыва*. 1974. Т4. С. 561-568.

72. Котомин А.А. Детонационная способность водных суспензий взрывчатых веществ / А.А. Котомин, С.А. Душенюк, А.В. Васильев и др. // XVII Харитоновские чтения. Сборник тезисов, докладов. Саров 2015. С. 45-47.

73. Васильев А.В. Критические диаметры детонации водных суспензий взрывчатых веществ / А.В. Васильев, С.М. Яковлев, А.А. Котомин и др. // Сборник тезисов III научно-технической конференции молодых ученых. Санкт-Петербург 2015. С. 15.

74. Kotomin A. A. Detonability of Aqueous Suspensions of Explosives / A. A. Kotomin, S. A. Dushenok, Ya. I. Zaporozhchenko // *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2016, Vol. 89, No. 6, pp. 975–979.

75. Зыгмунт Б. Инициирование ударными волнами детонации водонаполненных ВВ с различной структурой зерна / Б. Зыгмунт // *Физика горения и взрыва*. 1980. Т4. С. 89 – 93.

76. Апин А. Я. Протекание реакции в детонационной волне смесевых взрывчатых веществ /А. Я. Апин, И. М. Воскобойников, Г. С. Соснова // ПМТФ. №5. 1963. С. 115-117.

77. Апин А. Я. Об особенностях возрастания скорости детонации смесевых ВВ с увеличением диаметра заряда /А. Я. Апин, Г. В. Димза// Доклады АН СССР.-1970.-Т. 192.-№4. С.850-852.

78. De Longueville Y. Initiation of several condensed explosives by a given duration shock wave / de Longueville Y, Fauquignon C., Moulard H. // *Ibid*. P. 105-114.

79. Воскобойников И.М. Разложение взрывчатых веществ в детонационных и ударных волнах. Автореф. докт. дисс. М. 1971. - 28 с.

80. Воскобойников И.М. Расчет давлений инициирования взрыва гомогенных взрывчатых веществ ударной волной // И.М. Воскобойников, В.М. Богомолов, А.Я. Апин. // Физика горения и взрыва. 1968. Т.1. С. 45-49.
81. Кривченко А.Л. Исследование детонационных характеристик систем гексоген – наполнитель / А.Л. Кривченко, К.К. Шведов, А.Н. Дремин и др. // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 4. С. 463-470.
82. Бергман Л. Ультразвук и его применение в науке и технике / Л. Бергман // М. Изд. Иностранной литературы. 1957. -726с.
83. Кривченко А. Л. Метод расчета параметров детонации конденсированных взрывчатых веществ / А.Л. Кривченко // Физика горения и взрыва. 1984. Т.3. С.83-86.
84. Дремин А.Н. Инициирование детонации ударными волнами в насыпных зарядах ВВ / А.Н. Дремин, С.А. Колдунов, К.К. Шведов. Физика горения и взрыва. 1971. Т1. С. 103–111.
85. Шведов К.К. Влияние агрегатного состояния и структуры заряда на разложение тротила в ударных волнах / К.К. Шведов, А.Н. Дремин // Горение и взрыв. IV симпозиум по горению и взрыву. 1977. С.440-446.
86. Foan G. C. Shock initiation in Gap Test configurations / G. C. Foan, G. D. Coley // Proc. Of the Seventh Symp. (Intern.) on Detonation. 1981. P. 278-284.
87. Колдунов С.А. Разложение пористых ВВ под действием ударных волн / С.А. Колдунов, К.К. Шведов, А.Н. Дремин // Физика горения и взрыва. Т. 2, 1973. С. 295-304.
88. Шведов К.К. Влияние природы наполнителя на разложение наполненных систем тротила и гексогена в ударных и детонационных волнах / К.К. Шведов, А.Л. Кривченко, В.Н. Сальников // Физика горения и взрыва. 1978. Т5. С. 127-131.
89. Афанасенков А. Н. Критическое давление инициирования взрывчатых веществ / А. Н. Афанасенков, В. М. Богомолов, И. М. Воскобойников // Взрывное дело. 1970. N68/25С. 68–92.

90. Соловьев В.С. Некоторые особенности ударно – волнового инициирования взрывчатых веществ / В.С. Соловьев // Физика горения и взрыва. 2000. Т. 36. №6 С. 65-76.
91. Долгобородов А.Ю. Ударное сжатие растворов четыреххлористого углерода и гексана / А.Ю. Долгобородов // Химическая физика. 1998. Т.17.№12. С.49-57.
92. Воскобойников И.М. Скорости звука и температуры на изоэнтропах ударносжатых четыреххлористого углерода и бромформа / И.М. Воскобойников, А.Ю. Долгобородов // Детонация. Черноголовка: ОИХФ АН СССР. 1989. С.91-94.
93. Долгобородов А.Ю. Влияние физико-химических превращений на распространение ударных волн в конденсированных веществах. Автореф. докт. дисс. М. 2008. - 46 с.
94. Кобылкин И.Ф. Ударные и детонационные волны. Методы исследования / И.Ф. Кобылкин. В.В. Селиванов, В.В. Соловьев и др. // М. Физматлит. Изд. 2-е. 2004. -376с.
95. Николаевский В.Н. Гидродинамический анализ ударных адиабат гетерогенных смесей веществ / В.Н. Николаевский // Прикладная механика и техническая физика. ТЗ. 1969. С. 82-88.
96. Дубнов Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов // М. Недра 1988. - 360с.
97. Bajić Z. Study of using thermochemical calculations for determination of TNT equivalent of CHNO explosives / Z. Bajić, J. Bogdanov // New Trends in Research of Energetic Materials, Czech Republic, 2009. P. 8.
98. Bajić Z. Blast Effects Evaluation Using TNT Equivalent / Z. Bajić, J. Bogdanov, R. Jeremić // Scientific Technical Review. №3, 2009. pp. 50-53.
99. Беляев А.Ф. О полной работе взрыва / А.Ф. Беляев // Физика взрыва №2. М.: Издательство АН СССР. 1953. С. 27.
100. Шведов К.К. Об определении работоспособности ВВ / К.К. Шведов // Физика горения и взрыва. 1984. Т. 20. №3 С. 60-64.

101. Андреев С.Г. Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. // М. Физматлит. Т. 1. 2002. -824с.
102. Баум Ф.А. Физика взрыва / Ф.А. Баум, Л.П. Орленко, К.П.Станюкович и др. // М. Наука. 1975. -704с.
103. РД 31.11.81.43-83. Правила перевозки сжиженных газов наливом специализированными судами – газовозами.
104. ГОСТ 14920-79. Газ сухой. Метод определения компонентного состава.
105. Балаганский И.А. Действие средств поражения и боеприпасов / И.А. Балаганский, Л.А. Мержиевский // Новосибирск. НГТУ. 2004. -406с.
106. Кривченко А.Л. О методах определения тротилового эквивалента водонаполненного гексогена по уточненным методикам / А.Л. Кривченко, И.А. Клюстер, О.М. Васильева // Вестн. Самар. Гос. Техн. Ун-та. Сер. Технические науки №2 (46). 2015. С. 134-137.
107. Гейдон А. Ударная труба в химической физике высоких температур / А. Гейдон, И. Герл // М. Мир. 1966. -428с.
108. РБГ – 05 – 039 – 96. Руководство по анализу опасностей аварийных взрывов и определению параметров их механического воздействия.
109. Кривченко А.Л. Железнодорожная цистерна / А.Л. Кривченко, И.А. Клюстер // Патент РФ RU № 130939U1. 2013.
110. Монахов В.Т. Методы исследования пожарной безопасности веществ / В.Т. Монахов // М., Химия, 1972, -416с.
111. Водяник В.И. Взрывозащита технологического оборудования / В.И. Водяник //М., Химия, 1991, 256 с.
112. ГОСТ 12.1.044-89. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения.
113. Солоухин Р.И. Ударные волны и детонация в газах / Р.И. Солоухин // Физматгиз. 1963. -175с.
114. Шоршоров М.Х. Физико-химические основы детонационно-газового напыления покрытий / М.Х. Шоршоров, Ю.А. Харламов. // М. Наука. 1978. -224с.

115. Wang G.X. Theoretical Investigation on Pyrolysis Mechanism and Impact Sensitivity of Nitro Derivatives of Benzene and Aminobenzenes / G.X. Wang, X.D. Gong, H.M. Xiao // *Acta Chim. Sinica*, 2008, 66, pp. 711-716.