

# **ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра взрывного дела

## ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2021

УДК 622.235 (073)

**ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ:** Методические указания к лабораторным работам для студентов специальности 21.05.04 / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *В.Н. Ковалевский, А.В. Мысин*. СПб, 2021. 52 с.

В методических указаниях изложена теоретическая часть работ, а также руководство по выполнению лабораторных работ, с целью ознакомления студентов с основными закономерностями явления взрыва, с методикой экспериментальных исследований и способами обработки и анализа результатов измерений. Указания предназначены для выполнения лабораторных работ, а также для проверки уровня освоения пройденного материала по дисциплине «Теория детонации взрывчатых веществ» студентами специальности 21.05.04 Горное дело.

Научный редактор доц. *В.И. Чернобай*

Рецензент: к.т.н. *Таламанова О.Н.* (ООО «Институт Гипроникель»)

© Санкт-Петербургский  
горный университет, 2021

## **ТЕОРИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

*Методические указания к лабораторным работам  
для студентов специальности 21.05.04*

Сост. *В.Н. Ковалевский, А.В. Мысин*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой  
взрывного дела

Ответственный за выпуск *В.Н. Ковалевский*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 04.06.2021. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 3,0. Усл.кр.-отг. 3,0. Уч.-изд.л. 2,7. Тираж 75 экз. Заказ 537.

Санкт-Петербургский горный университет  
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета  
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

## ВВЕДЕНИЕ

Методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов специальности 21.05.04 «Горное дело».

Настоящие методические указания содержат теоретические сведения для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Теория детонации взрывчатых веществ» и список рекомендуемой литературы.

*Цель учебной дисциплины:* дать будущему специалисту совокупность знаний в области теории детонации и горения промышленных ВВ и основных законов механики и термодинамики при расчетах параметров газовых систем; представление о физической сущности формирования поверхностей разрыва и соответствующих моделях для реальных процессов, ознакомить с методами расчета и регистрации параметров детонационных волн удлинённых зарядов промышленных ВВ.

В результате у студента формируются теоретические знания и практические навыки для правильного выбора методов расчета термодинамических параметров при взрывных химических превращениях различных промышленных ВВ, и оценке их влияния на детонационные характеристики ВВ при их взрыве в различных условиях.

*Основные задачи учебной дисциплины:*

- дать теоретические основы детонационных свойств при создании рецептур промышленных ВВ; основы технологии их приготовления; состав, взрывчатые и технологические свойства основных промышленных и инициирующих ВВ; ассортимент современных промышленных ВВ и СИ и технологии их эффективного и безопасного применения при различных методах взрывных работ и способах взрывания;

- выработать умение грамотно выбирать ВВ и СИ с учетом их детонационных свойств для различных горнотехнических условий производства взрывных работ, других производственных, технических и экономических факторов и требований безопасности; оценивать экономическую эффективность применения промышленных ВВ;

- получить представления о перспективах создания в России и зарубежных странах новых типов ВВ.

Взрывчатые вещества как высококонцентрированный источник энергии способны при взрыве совершать за весьма короткие промежутки времени значительную работу. В связи с этим взрывные работы широко применяют в различных отраслях народного хозяйства. Многообразие условий применения и широкий диапазон технических требований к промышленным ВВ обуславливает различия их по химическому составу, физическим и взрывным свойствам, поэтому ассортимент промышленных ВВ довольно обширен.

Взрывные работы обладают повышенной опасностью, так как они связаны с применением чувствительных к внешним воздействиям средств взрывания и взрывчатых веществ. Эффективность и безопасность взрывных работ во многом зависят от типа ВВ, который правильно может быть выбран лишь в том случае, если известны свойства ВВ и связь между ними.

Знание закономерностей взрывного процесса имеет большое значение для управления взрывом и его механическим действием в различных условиях.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### Определение чувствительности взрывчатого вещества к удару

**Цель:** получить сравнительную оценку чувствительности ВВ к удару и выявить степень опасности при обращении с ними, а также определить возможность применения их при механизированных способах зарядания.

**Общие сведения.** Согласно тепловой теории разогрев ВВ при ударе по заряду приводит к быстрой экзотермической реакции. Тепло, выделяющееся при ударе, в большинстве случаев недостаточно для разогрева ВВ до температуры вспышки. Но энергией удара можно нагреть отдельные локальные участки в массе ВВ до температуры его воспламенения. Тепловая теория, описывающая возникновение взрыва за счет разогрева локальных очагов, получила название теории горячих точек. При ударе или ином динамическом воздействии в ВВ возникают напряжения. Так как в твердом ВВ всегда имеются неоднородности, в малых его объемах могут возникнуть пики напряжений. В этих объемах и появляются горячие точки, являющиеся наиболее вероятными очагами возникновения взрыва.

Причинами возникновения горячих точек являются адиабатическое сжатие небольших газовых включений, трение твердых частиц - высокоплавких примесей и вязкий разогрев при быстром течении в жидких ВВ. Последняя причина является основной при возбуждении взрыва в результате механического воздействия.

Согласно нетепловой теории взрыв происходит в результате активации молекул ВВ (без тепловой стадии) и разрушения химических связей под действием относительного сдвига молекул. Но этот механизм эффективен в основном при действии ударных волн, чего не бывает при простом механическом воздействии.

Чувствительность ВВ к удару в лабораторных условиях определяют на копрах. Характеристикой чувствительности ВВ к удару обычно служит энергия удара, необходимая для возбуждения взрыва.

В связи с тем, что возникновение взрыва при ударе имеет вероятностный характер, опыты при одной и той же энергии удара производят многократно.

В качестве характеристики чувствительности ВВ обычно применяют следующие параметры:

- 1) частоту возникновения взрывов при постоянном весе груза и высоте падения;
- 2) минимальную высоту падения груза, при которой происходит взрыв;
- 3) минимальную высоту падения груза, при которой взрывы возникают во всех опытах.

Испытания проводят согласно ГОСТ 4545-88. Установка



Рис. 1.1. Вертикальный копер К-44-II.

1 – направляющие; 2 – держатель груза; 3 – груз; 4 – штемпельный прибор с навеской ВВ; 5 – наковальня

состоит из массивной наковальни, укрепленной на фундаменте, на которую устанавливают роликовый приборчик с навеской испытуемого ВВ (рис 1.1). Падающий груз копра при помощи специального держателя может быть закреплен на необходимой высоте, измеренной специальной линейкой. Спуск затвора держателя производится дистанционно. В установке предусмотрено также приспособление, позволяющее улавливать груз при отскоке.

Для испытаний используют штемпельные приборчики, отвечающие ГОСТ 2065-43 (рис.1.2). Приборчик состоит из направляющей муфты с полированными внутренними стенками, поддона и двух роликов со снятыми фасками, отличающимися высокой степенью постоянства своих механических свойств и точностью размеров. Ролики должны иметь строго параллельные торцевые поверхности.

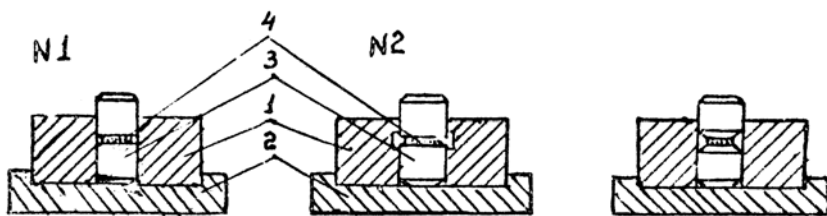


Рис. 1.2. Штемпельные приборчики  
1- муфта; 2- поддон; 3- ролики; 4-; навеска ВВ

Диаметр роликов 10 мм, радиус притупления кромки роликов 0,1 мм. Ролики свободно скользят внутри муфты и выполняют роль бойка и наковальни. Между роликами помещается навеска ВВ. В лабораторных условиях испытания на чувствительность производят навесками ВВ массой 0,05 г. Груз массой 10 кг сбрасывается с высоты 25 см.

Наполнение роликовых приборчиков ВВ производится следующим образом. Открытую коробку с испытуемым ВВ помещают на кальку и с помощью бумажного совка насыпают ВВ в мерку, которую держат над коробкой. Избыток вещества, находящегося выше краев мерки, ребром бумажного совка снимают в коробку. Из мерки ВВ всыпают в муфту и вставляют верхний ролик. Так заполняют все приборчики и приступают к испытаниям. Испытания необходимо проводить в защитных очках при включенной вентиляции. Перед началом испытаний необходимо ознакомиться с устройством копра и убедиться в исправности его спускового механизма. После этого устанавливают держатель груза (с подвешенным к нему грузом) на заданной высоте. Затем помещают на центр наковальни копра роликовый приборчик с испытуемой навеской и закрепляют обоймой. Нажимая кнопку держателя, сбрасывают груз. После каждого испытания направляющие муфты и ролики промывают в ацетоне. В тех случаях, когда после отказа произойдет заклинивание роликов в муфтах, разборка приборчиков производится на ручном прессе.

#### **Порядок выполнения лабораторной работы:**

1. Подобрать необходимое число приборчиков, тщательно проверяя состояние их рабочих поверхностей. Ролики и муфты очи-



стиль от следов смазки или остатков ВВ ацетоном или спиртом и вытереть насухо.

2. На аналитических весах взвесить необходимое число навесок ВВ по 0,05-0,005 г. Навеску равномерно распределить между роликами штемпельного приборчика и поставить приборчик в поддон на наковальню копра.

3. Груз массой 10 кг установить на высоте 25 см, нажав спусковой механизм затвора, опустить груз на верхний ролик приборчика. Повторить опыт 25 раз, фиксируя высоту отскока груза в таблице:

№ опыта	Тип ВВ	$H_1$ , м	$H_2$ , м	Взрыв или отказ	$x$ , %	A

4. Рассчитать частоту взрывов  $x = a \cdot 100 / 25$ , где  $a$  - количество взрывов из 25 параллельных испытаний.

О взрыве навески ВВ судят по звуковому эффекту, вспышке и дымообразованию. Если удар не сопровождается перечисленными признаками, то считают, что произошел отказ.

5. Определить энергию, поглощаемую ВВ при ударе:

$$A = (1 - H_2 / H_1) \cdot P \cdot H, \quad (1.1)$$

где  $H$  - высота падения груза на приборчик, м;  $H_1$ ,  $H_2$  - высота отскока груза, падающего с высоты  $H$  на приборчик без ВВ и с ним (в случаях отказа), м;  $P$  - вес груза, Н.

*При выполнении работы необходимо соблюдать следующие меры предосторожности:*

1. Количество испытуемого ВВ в одной пробе не должно превышать 0,05 г.

2. В случае отказов с роликов и муфты тщательно счищают ВВ в бумажную коробочку и после окончания испытаний передают лаборанту для уничтожения.

3. Работу приводят в защитных очках.

4. Перед каждым сбрасыванием груза следует предупреждать работающих в комнате о предстоящем взрыве командой: “Внимание, пуск!”

**Контрольные вопросы.**

1. Что называется взрывчатым веществом, взрывом, чувствительностью взрывчатого вещества?

2. Какие существуют виды начального импульса?

3. Виды механических воздействий на ВВ.

4. Влияние на чувствительность ВВ внешних факторов:  
а) температуры; б) механических примесей.

5. Влияние на чувствительность химических свойств ВВ:  
а) химической структуры; б) числа заместителей и их расположения.

6. Влияние на чувствительность ВВ физических характеристик ВВ: а) размеры кристаллов; б) агрегатное состояние; в) полиморфная форма; г) плотность.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

### Определение чувствительности ВВ к трению на копре К-44-III

**Цель:** количественная оценка чувствительности ВВ к трению на маятниковом копре К-44-III. Необходимость определения чувствительности ВВ к трению обусловлена требованиями техники безопасности при производстве и применении ВВ.

**Общие сведения.** У подавляющего большинства ВВ при повышении температуры чувствительность к механическим воздействиям повышается. Это объясняется тем, что повышение начальной температуры уменьшает количество тепла, необходимого для нагрева ВВ до такой температуры, при которой может возникнуть очаг разогрева.

Большое влияние оказывают примеси инертных веществ в составе ВВ. Некоторые примеси, их называют сенсibiliзаторами, повышают чувствительность к механическим воздействиям. Это вещества, обладающие высокой температурой плавления, высокой твердостью, низкой теплопроводностью (песок, стекло, окись магния и др.). Флегматизаторы снижают чувствительность к механическим воздействиям (парафин, воск, масла, полимеры). Для них характерны низкая температура плавления, большая теплоемкость и хорошая теплопроводность. Флегматизаторы вводятся во ВВ в расплавленном состоянии. Действие их основано на образовании тонкой пленки вокруг кристаллов ВВ, которая сглаживает острые углы и грани. За счет этого значительно уменьшается сила трения между кристаллами и снижается чувствительность.

В условиях производства и применения ВВ механическое воздействие на них чаще всего оказывается в виде трения, поскольку ВВ чаще подвергается не нормальному удару, а скользящему, вызывающему трение между частицами ВВ или между ними и поверхностями соударяющихся тел.

Количественная оценка чувствительности ВВ к трению на копре К-44- III (рис.2.1) осуществляется боковым ударом маятника по одному из двух роликов, между которыми зажата навеска ВВ.

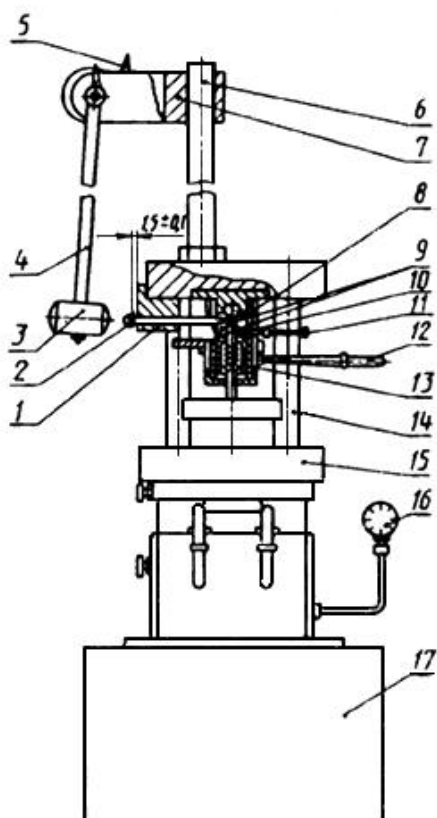


Рис. 2.1. Схема копра К-44-III и его внешний вид  
 1 - направляющая шпильки-ударника; 2 - шпилька-ударник; 3 - груз маятника; 4 - рычаг маятника; 5 - спусковой крючок; 6 - стойка маятниководержателя; 7 - маятниководержатель; 8 - камера; 9 - ролик; 10 - муфта; 11 - выталкиватель роликового прибора; 12 - рукоятка, опускающая муфту роликового прибора; 13 - корпус прибора; 14 - стойка прибора; 15 - пресс гидравлический; 16 - манометр; 17 - фундамент

В основном узле копра (рис.2.2) навеска ВВ имеется между двумя стальными роликами. Пуансон, связанный с поршнем гидравлического прессы, передает давление через нижний ролик на слой

ВВ. При ударе падающего груза-маятника по ударнику верхний (подвижный) ролик перемещается в направлении, показанном стрелкой, подвергая навеску ВВ воздействию быстрого сдвига.

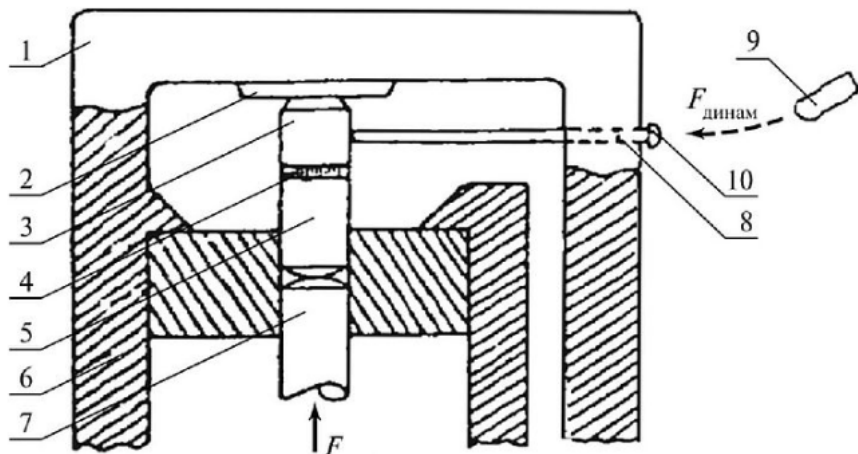


Рис. 2.2. Устройство рабочего узла копра

1 - кронштейн; 2 - упор; 3 - верхний ролик; 4 - навеска ВВ; 5 - нижний ролик; 6 - муфта; 7 - поршень; 8 - шток; 9 - груз; 10 - головка штока

Сила трения растет с увеличением нормального давления на навеску ВВ, создаваемого поршнем гидравлического пресса. При этом увеличивается вероятность возникновения эффективных очагов разогрева, возможность распространения горения и, в конечном счете, вероятность возникновения взрыва.

Как и при действии нормального удара, возникновение взрыва от скользящего удара имеет вероятностный характер. Если давление прижатия меньше некоторой характерной для данного ВВ величины, частота возбуждения взрыва  $\chi=0$ . При увеличении давления прижатия частота возникновения взрывов в серии параллельных опытов растет и при некотором значении давления становится равной 100 %. Испытания проводят с постоянным грузом. Энергию удара можно менять, изменяя высоту падения (угол отклонения) маятника.

Чувствительность испытуемого ВВ лучше всего характеризовать, построив полную кривую в координатах: частота взрывов  $x$  - давление прижатия  $p$  (5-6 точек по 10 опытов для каждой при постоянной высоте падения маятника). В качестве меры чувствительности можно принять критическое давление, при котором частота взрывов достигает определенного значения (50 или 100 %). На приборе К-44-III можно определить чувствительность к трению ВВ (инициирующих или вторичных), порохов и пиротехнических составов. При исследовании новых ВВ рекомендуется проводить их испытания параллельно с хорошо изученными ВВ близкой чувствительности.

Сравнительные испытания относительной чувствительности к трению различных ВВ, порохов и пиротехнических составов чаще всего проводят сбрасыванием груза с одинаковой высоты и с постоянным углом отклонения маятника, равным  $90^\circ$ .

Однако в случае испытания высокочувствительных ВВ, характеризующихся малыми величинами работы трения, и, следовательно, малыми усилиями нормального прижатия вблизи нижних пределов, при сбрасывании груза весом в 15 Н при угле в  $90^\circ$  происходит смещение ролика по инерции, значительно превышающее принятое условиями испытаний смещение (2 мм). Это вызывает усиление частоты взрывов вблизи нижних пределов.

Для малочувствительных взрывчатых смесей и пиротехнических составов, обладающих большим коэффициентом внешнего трения, при сбрасывании груза с углом  $90^\circ$  и под высоким давлением, наоборот, не обеспечивается сдвиг ролика на величину 2 мм.

Для создания сопоставимых условий для этих групп ВВ, порохов и пиротехнических составов испытания проводят с постоянным весом груза (15 Н) и различными углами сбрасывания. Угол сбрасывания в зависимости от давления прижатия  $p$  устанавливается согласно таблице 2.1.

Гидравлический пресс копра К-44-III (рис.2.1), работает от масляного насоса, который имеет два цилиндра и два поршня различных диаметров.

Таблица 2.1

**Соотношения давления гидравлического пресса (по манометру) с давлением прижатия навески БВВ и углом сбрасывания маятника, обеспечивающим постоянное значение сдвига (1,5 мм)**

Давление гидравлического пресса (по манометру), МПа	Давление прижатия навески БВВ, МПа	Угол сбрасывания маятника, градус
0,24	29,42	28
0,32	39,23	32
0,40	49,03	34
0,49	58,84	38
0,57	68,65	41
0,66	78,45	43
0,72	88,26	46
0,81	98,06	48
0,97	117,68	53
1,14	137,29	57
1,30	156,91	60
1,46	176,52	64
1,62	169,13	67
1,78	215,75	69
1,94	235,36	73
2,11	254,97	76
2,27	274,58	78
2,43	294,20	80
2,59	313,81	82
2,76	333,43	83
2,92	353,04	84
3,08	372,65	85
3,25	392,27	86
3,65	441,30	88
4,05	490,33	91
4,46	539,36	93
4,87	588,39	95
5,27	637,43	97
5,67	686,46	100

Для создания давления до  $(10-20) \cdot 10^5$  Па пользуются поршнем большого диаметра; когда нужно создавать более высокое давление, работают поршнем меньшего диаметра. В корпусе копра имеется окно для установки роликового приборчика и штанга, приспособленная для выталкивания роликового приборчика после испытания. Сдвиг подвижного (верхнего) ролика происходит под действием ударника, по головке которого наносится удар грузом, закрепленным на маятнике. Спуск груза осуществляется с помощью рукоятки шептала.

Для испытания применяют роликовые приборчики, отвечающие ГОСТ 2065-43. Ролики должны иметь строго параллельные торцевые поверхности. Диаметр роликов 10 мм, радиус притупления кромки роликов 0,1 мм. Обработка торцевых поверхностей не ниже V8.

До начала испытаний подбирают необходимое число роликовых приборчиков, которые очищают от следов смазки или остатков ВВ, промывают в ацетоне и вытирают насухо. Устанавливают нужный угол фиксации маятника (высоту падения груза).

Ударник выдвигают настолько, чтобы он не мешал установке роликового приборчика в гнездо корпуса. Внутреннее гнездо корпуса прибора очищают чисток тряпочкой, смоченной в ацетоне и протирают насухо. Рукоятка съемника перед опытом должна находиться в крайнем правом положении. Рукоятка выталкивателя роликового приборчика должна быть полностью выдвинута.

Для испытания взвешивают на весах нужное число навесок ВВ по  $0,2 \pm 0,005$  г. При данном усилии нормального прижатия навески ВВ и соответствующем ему угле сбрасывания маятника производят по 25 параллельных испытаний. Расчет частот взрывов производят по формуле, приведенной в работе 1.

В следующем испытании усилие нормального прижатия изменяют в соответствии с изменением угла  $\alpha$  и вновь производят 25 параллельных испытаний до полного построения зависимости в координатах: частота взрывов в процентах - давление нормального прижатия в паскалях.



## **Порядок выполнения лабораторной работы:**

1. Включить вытяжную вентиляцию;  
2. В штемпельный приборчик между торцами роликов поместить навеску испытуемого ВВ и разровнять поворотом верхнего ролика без особых усилий. Приборчик с навеской ВВ поставить на полочку и протолкнуть через окно в корпус прибора на подаватель. Убедиться, что приборчик дошел до упора;

3. Закрывать вентиль насоса и подачей масла в гидравлический пресс поднять плунжер. Подачу масла в пресс производят, поднимая и опуская рукоятки поршней. Плунжер нажимает на пуансон, который поднимает подаватель с роликовым приборчиком до тех пор, пока верхний ролик не будет прижат к упору прибора. Затем прессуют испытуемое вещество до нужного давления, фиксируемого манометром. При расчете давления, которому подвергается навеска, учитывают, что диаметр плунжера прессы в 11 раз больше диаметра ролика. Давление на ВВ поэтому в 121 раз больше давления, измеренного манометром. По достижении нужного давления, приоткрывая вентиль, снизить давление до 1 МПа;

4. Повернуть рукоятку съемника по часовой стрелке до упора! Лапки съемника захватывают муфту роликового приборчика и опускают ее вниз. Таким образом, верхний ролик, навеска испытуемого ВВ и часть нижнего ролика оказываются, выше верхнего среза муфты.

Поворот рукоятки съемника без снятия давления приводит к поломке лапок и выводу из строя всего прибора;

5. После опускания муфты давление вновь поднять до нужной величины.

6. Вдвинуть ударник в отверстие направляющей колодки, чтобы нижний срез шляпки находился на расстоянии 4-5 мм от торца колодки. Подняв маятник на заданный угол, зафиксировать его положение. Нажатием на рукоятку шептала освободить маятник. При падении маятника его груз, ударяясь о головку ударника, проталкивает его до упора в направляющую колодку. Ударник, перемещаясь, сдвигает верхний ролик по слою ВВ на постоянную величину (2 мм).

При ударе тонкий слой навески ВВ, зажатой между роликами, подвергается внешнему трению. При этом фиксируется взрыв или отказ испытуемого вещества. За взрыв принято считать разложение ВВ, сопровождающееся звуковым эффектом, выделением дыма или следами разложения на рабочей поверхности ролика в виде законченности.

7. Открыть вентиль насоса. При этом опустятся плунжер и пуансон, верхний конец которого выйдет из направляющей муфты роликового приборчика. Ручку съемника повернуть до упора против часовой стрелки. Выдвинуть, наполовину ударник из направляющей колодки. Штемпельный приборчик, нажав на выталкиватель, переместить с подавателя на полочку, извлечь из корпуса прибора и заменить следующим приборчиком, после чего продолжить испытания.

8. Результаты испытаний записать в таблицу:

№ опыта	Тип ВВ	H <sub>1</sub> , м	H <sub>2</sub> , м	Взрыв или отказ	x, %	A

9. После испытаний штемпельные приборчики промыть в растворителе.

При испытаниях следует соблюдать меры предосторожности, указанные в работе 1. Единственное отличие в том, что количество испытуемого ВВ в одной пробе не должно превышать 0,02 г.

#### **Контрольные вопросы.**

1. В чем заключается сущность определения чувствительности ВВ к трению?
2. Какие существуют методы оценки чувствительности к трению?
3. Какие приборы применяются при определении чувствительности к трению?
4. Можно ли определить чувствительность к трению для современных БВВ? Если можно, то каким образом?
5. Устройство копра К-44-III.
6. Методика работы на копре К-44-III.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

### Определение скорости детонации фотографическим способом

**Цель:** экспериментальное определение скорости детонации конденсированных ВВ.

**Общие сведения.** Согласно гидродинамической теории передача детонации обусловлена распространением по ВВ ударной волны, которая возбуждает за своим фронтом интенсивную химическую реакцию, поддерживающую постоянство параметров волны и стационарный характер детонационного процесса в целом.

Сжатие исходного вещества ударной волной происходит настолько быстро, что химический состав его не успевает измениться. Химическая реакция начинается и протекает в уже сжатом веществе и сопровождается выделением энергии, с которым связано повышение температуры и последующее расширение продуктов реакций.

Скорость детонации является одной из основных характеристик ВВ. Точные значения скорости детонации, получаемые опытным путем, используются для вычисления других параметров взрывчатого превращения и служат показателем, отражающим взрывчатое действие ВВ при его практическом применении. Вследствие этого экспериментальное определение скорости детонации имеет важное значение.

Детонация ВВ сопровождается свечением фронта детонационной волны, распространяющейся по заряду. Это явление и используется для изучения скорости детонации сверхскоростными кинокамерами с зеркальной разверткой, позволяющими подводить съемку в режимах непрерывной развертки светящегося изображения и покадровой съемки. В работе скорость детонации измеряется в режиме непрерывной развертки изображения.

На принципиальной схеме наиболее широко применяемого скоростного фоторегистра СФР (рис.3.1) заряд ВВ расположен перпендикулярно к плоскости чертежа. Малый объектив проецирует изображение исследуемого процесса на плоскости с вертикальной регулируемой щелью, которая выделяет из этого изображения узкую полоску. Большой объектив с помощью вращающегося зеркала фо-

кусирует изображение этой плоскости на фокальной поверхности с неподвижно фотопленкой.

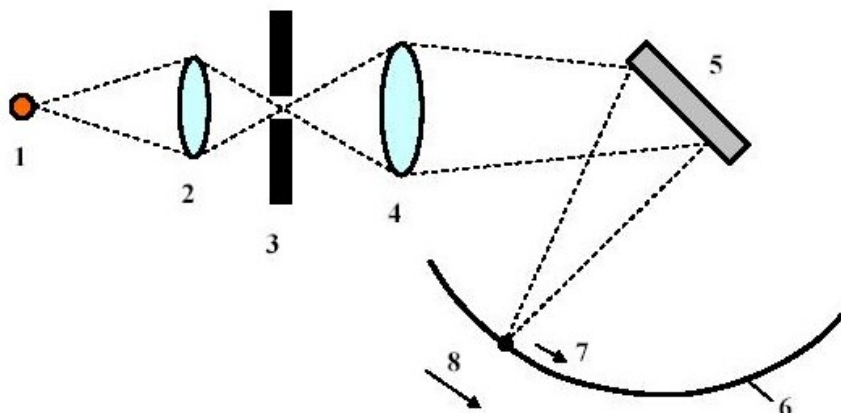


Рис.3.1. Принципиальная оптическая схема фоторегистра СФР в режиме нейтральной развертки

1 – заряд ВВ, расположенный перпендикулярно к плоскости чертежа; 2 – объектив; 3 – щелевая диафрагма; 4 – объектив; 5 – вращающееся зеркало; 6 – фотопленка; 7 – направление вращения зеркала; 8 – направление перемещения изображения

При вращении зеркала световая полоска, вырезанная из изображения процесса, перемещается вдоль фокальной поверхности, экспонируя пленку. Благодаря сочетанию движения изображения по пленке с движением самого процесса на пленке образуется линия, наклон которой определяет скорость детонации заряда (рис. 3.2).

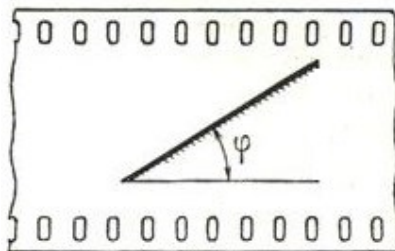


Рис.3.2. Изображение процесса детонации, получаемое на фоторазвертке

Средняя скорость детонации:

$$D = \frac{v}{\beta} \operatorname{tg} \varphi \quad (3.1)$$

где  $v$  - скорость развертки изображения;  $\beta$  - коэффициент поперечного увеличения системы, равный отношению длины изображения на пленке к длине заряда;  $\varphi$  - угол наклона касательной к кривой фотogramмы.

Чтобы получить значения скорости детонации на различных участках заряда, например в случае неустановившегося режима детонации, можно разбить длину заряда на участки и угол наклона  $\varphi$  определять для каждого из них отдельно.

### Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Включить в сеть пульт управления СФР (скоростной фоторегистратор), прогреть 10 мин.

2. Зарядить камеру СФР фотопленкой:

1) повернуть до отказа против часовой стрелки рукоятку 7 крышки (рис.3.3);

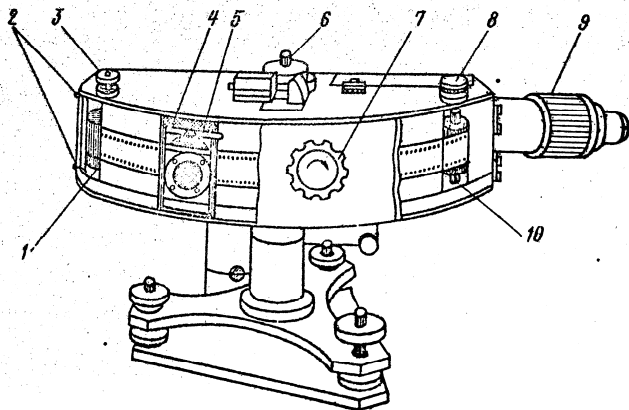


Рис.3.3. Общий вид камеры СФР

1 и 10 – гнезда кассет; 2 – замок крышки; 3 и 8 – рукоятки;  
4 - объектив; 5 – рукоятка рамки; 6 – ключ; 7 – рукоятка крышки;  
9 – кольцо входного объектива

2) отжать навстречу друг другу замки 2 крышки и поворотом против часовой стрелки откинуть крышку на петлю, а затем снять ее;

3) оттянуть вверх до отказа рукоятку 3 и установить кассету в гнездо 1. Слегка поворачивая по ходу часовой стрелки, опустить рукоятку 3 до щелчка на фиксаторе;

4) вытянуть из кассеты конец пленки длиной, большей фокальной рамки на 30-80 мм (рукоятка 3 при этом должна вращаться против хода часовой стрелки, что свидетельствует о правильной зарядке кассеты);

5) зарядить наматывающую катушку;

6) оттянуть вверх до отказа рукоятку 8 и установить наматывающую катушку в гнездо 10; слегка поворачивая рукоятку 8 против хода часовой стрелки, опустить ее до щелчка в фиксаторе;

7) вращением рукоятки 8 натянуть пленку так, чтобы она прижалась к фокальной рамке.

3. Включить лампу подсветки. Развернуть зеркало прибора так, чтобы видеть изображение щели на пленке. Зеркало вращается с помощью ключа для поворота зеркала 6.

Установить лупу прибора так, чтобы корпус ее плотно прижался к фокальной рамке, а вертикальная линия на стекле проходила примерно через центральную ось щели и закрепить ее поворотом рукоятки 5 слева направо. Вращением объектива 4 добиться резкого изображения вертикального штриха на стекле лупы. Не передвигая лупы, поставить рукоятку рода работ в положение "О".

4. Установить заряд во взрывную камеру. Наблюдая в лупу, провести коррекцию установки заряда: вертикальная линия на стекле должна проходить через ось заряда. Вращением кольца 9 входного объектива добиться резкого изображения заряда.

Поставить рукоятку рода работ в положение "Щ", наблюдая в лупу. Заряд должен полностью перекрывать щель. Снять лупу с фокальной рамки, повернув рукоятку 5 справа налево. Надеть крышку камеры на петли и повернуть по ходу часовой стрелки до защелкивания замков 2 (проверить запираение замков, оттягивая крышку в обратном направлении). Повернуть до отказа ручку 7 крышки по ходу часовой стрелки. Отключить лампу подсветки.

5. Проверить наличие защитных стекол, после чего закрыть защитную крышку взрывной камеры.

6. "Разогнать" двигатель до нужной частоты вращения и произвести инициирование заряда ВВ. Включить вентилятор для откачки газов из взрывной камеры.

7. Проявить фотопленку (рис.3.4).



Рис.3.4. Фоторегистрограмма взрыва заряда порошкообразного тэна.  
а) – с зазором в плексиглазе; б) – форма и развитие процесса детонации;

8. Обработать результаты измерений:

1) рассчитать скорость движения изображения по пленке. Т.к. она равномерна, то

$$v = \omega \cdot r \quad (3.2)$$

где  $v$  – линейная скорость движения изображения;  $\omega$  – угловая скорость вращения зеркала;  $r$  – радиус развертки,  $r = 239$  мм.

Учитывая, что  $\omega = 2 \cdot \pi n$  (здесь число  $n$  – число оборотов зеркала,  $\text{мин}^{-1}$ ), скорость движения изображения по пленке

$$v = 4 \cdot \pi n r \quad (3.3)$$

2) используя прибор "Polilux", определить  $\varphi$  - угол наклона касательной к кривой фотограммы (угол между засвеченной линией к перфорации пленки);

3) учитывая, что коэффициент поперечного сечения фоторегистра СФР-2М  $\beta = 0,5$ , по формуле (3.1) определить скорость детонации испытуемого заряда ВВ.

4) определить максимальную относительную погрешность определения скорости детонации

$$\delta = \pm \left( \frac{\Delta v}{v} + \frac{2\Delta\varphi}{\sin 2\varphi} + \frac{\Delta\beta}{\beta} \right) \quad (3.4)$$

где  $\Delta v$  – относительная погрешность измерения скорости развертки для СФР,  $\Delta v \leq 0,1\%$ ;  $\Delta\beta$  – максимальная относительная погрешность измерения увеличения изображения,  $\Delta\beta \leq 0,2\%$ ;  $\Delta\varphi$  – максимальная относительная погрешность измерения угла наклона,  $\Delta\varphi \leq 0,2\%$  (ошибка измерения угла  $\varphi$  минимальна при наклоне линии засветки, близком к  $45^\circ$ ).

#### **Контрольные вопросы.**

1. Методы определения скорости детонации ВВ?
2. Дайте определение понятию детонация взрывчатого вещества. Пересжатая и недосжатая детонация.
3. От каких параметров зависит скорость детонации?
4. В чем заключается отличие ударной от детонационной волны?
5. Поясните принципиальную оптическую схему камеры СФР-2М.
6. Для определения каких параметров ВВ необходимо знать скорость детонации взрывчатого вещества?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

### Определение температуры детонационного фронта электронно-оптическим методом

**Цель:** изучить методику измерений параметров горения, детонации и количественно определить температуру детонационного фронта конденсированных ВВ.

**Общие сведения.** Знание температуры взрыва необходимо для ряда термодинамических расчетов. Температура взрыва является также одним из основных параметров, определяющих опасность применения ВВ в угольных шахтах при наличии метано - или пылевоздушных смесей. Измерение температуры продуктов детонации принципиально важно для обоснованного построения уравнения состояния высокоплотных газов, образующихся при детонации конденсированных ВВ.

Температура продуктов детонации во фронте детонационной волны может быть измерена только оптическими методами, что обусловлено быстротечностью процесса, а также высокими значениями температур и давлений, возникающими при детонации.

Для определения температуры взрыва конденсированных ВВ оптическим методом существует несколько методик, основанных на применении закона излучения.

Наиболее распространенными методами измерения температур являются радиационный, яркостный и цветовой. В первом случае измеряется интегральная энергия, излучаемая нагретым телом, во втором сравниваются монохроматические яркости излучения исследуемого тела и эталонного источника, в третьем исследуется распределение энергии по спектру излучения.

Для абсолютно черного тела спектральная яркость выражается формулой Планка:

$$E_{\lambda T} = c_1 \cdot \lambda^{-5} \left( e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1} \quad (4.1)$$

где  $E_{\lambda T}$  – спектральная плотность потока излучения, испускаемого

в единицу телесного угла с единицы площади излучающего тела, т.е. излучательная способность тела, Вт/см<sup>2</sup>;  $c_1$  и  $c_2$  - константы,  $c_1 = 3,71 \cdot 10^{16}$  Вт·м<sup>2</sup>,  $c_2 = 0,01438$  м·К;  $\lambda$  - длина волны, м;  $T$  - температура абсолютно черного тела, К.

Если  $\lambda \cdot T < c_2$ , то зависимость (4.1) можно заменить приближенным законом Вина:

$$E_{\lambda T} \cdot d\lambda = \left( c_1 \cdot \lambda^{-5} \right) \cdot e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \cdot d\lambda \quad (4.2)$$

Если  $\lambda \cdot T < 0,31 \cdot 10^2$  м·К, то ошибка в определении  $E_{\lambda \cdot T}$  меньше 1 % по сравнению со спектральной яркостью, вычисленной по формуле (4.1).

Очевидно, что отношение яркостей при двух температурах можно записать в виде:

$$\ln \frac{\lambda_1 \cdot T_1}{E_{\lambda_1 T_2}} = \frac{c_2}{\lambda} \cdot \left( \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (4.3)$$

Если измерять отношение яркостей в двух точках спектра при одной температуре, то:

$$\ln \frac{E_{\lambda_1 T}}{E_{\lambda_2 T}} = 5 \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} - \frac{c_2}{T} \cdot \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda_1 \cdot \lambda_2} + \ln \frac{\Delta \lambda_1}{\Delta \lambda_2} \quad (4.4)$$

где  $\Delta \lambda$  – участок длин волн, пропускаемый монохроматором.

Для перехода от яркостной  $T_{\lambda}$  и цветовой  $T_{\lambda}$  температур к истинной температуре  $T_{\lambda}$  необходимо знать коэффициент испускания тепла  $\varepsilon_{\lambda}$ .

Яркостная температура тела по определению есть температура черного тела, излучательная способность которого равна излучательной способности рассматриваемого тела. Она может быть определена из закона Кирхгофа:

$$E_1(\lambda_1 T_{\lambda}) = \varepsilon_{\lambda} \cdot E_{\lambda_1} \cdot T_u \quad (4.5)$$

где  $E_1(\lambda_1 T_{\lambda})$  - спектральная яркость излучающего тела.

Используя закон Вина, найдем:

$$\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_y} = \left( \frac{\lambda}{c_2} \right) \cdot \ln \varepsilon_\lambda \quad (4.6)$$

полагая, что в диапазоне температур  $T_H - T_Y$  коэффициент  $\varepsilon_\lambda$  не зависит от  $T$ .

Цветовая температура характеризует относительный ход спектрального распределения, т.е. в графическом изображении - его наклон. Цветовая температура - это температура черного тела, которой соответствует то же относительное спектральное распределение, что и у исследуемого тела. Тогда:

$$\frac{1}{T_u} - \frac{1}{T_y} = \left( \frac{\lambda}{c_2} \right) \cdot \ln \frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} \quad (4.7)$$

Для серого тела  $\varepsilon_\lambda$  не меняется с длиной волны, поэтому для него цветовая температура совпадает с истинной, а яркостная отличается от нее.

В работе используется метод, заключающийся в применении соотношения (4.2) к измеренным излучательным способностям тела для двух длин волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ .

Отношение:

$$\frac{\varepsilon_{\lambda_1}}{\varepsilon_{\lambda_2}} = \frac{\lambda_2^5 \cdot \varepsilon_{\lambda_1} \cdot e^{\frac{c_2}{\lambda_1 T}}}{\lambda_1^5 \cdot \varepsilon_{\lambda_2} \cdot e^{\frac{c_1}{\lambda_1 T}}} \quad (4.8)$$

где  $\varepsilon_{\lambda_1}$  и  $\varepsilon_{\lambda_2}$  - величины, характеризующие светимости серых тел, которые могут зависеть как от  $\lambda$ , так и от  $T$ .

Преобразуя формулу (4.8), получим:

$$\ln R = \frac{A}{T} + B \quad (4.9)$$

где  $R = \frac{E_{\lambda_1}}{E_{\lambda_2}}$ ;  $A$  и  $B$  постоянные, определяемые выбором дли-

ны волны и величиной радиационной константы:  $c_2$ .

$$A = c_2 \cdot \left( \frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1} \right); B = \ln \cdot \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5.$$

Обычно источник света наблюдают при двух или более известных значениях температуры и строят зависимость  $\ln R$  от  $1/T$ , дающую тарировочную кривую (рис.4.1). Эта тарировочная кривая может быть экстраполирована на всю область значений измеряемых температур.

В качестве прибора, выделяющего из спектра излучения участки с длиной волн  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$ , в работе используются интерференционные светофильтры, в качестве приемников излучения - фотоумножители. Измерения производятся при  $\lambda_1 = 0,404 \cdot 10^{-6}$  м и  $0,801 \cdot 10^{-6}$  м с шириной пропускания  $10^{-8}$  м. В установке используются фотоумножители ФЭУ-18А и ФЭУ-22, которые преобразуют световую энергию на выбранных участках спектра в электрические аналоги регистрируемые осциллографом типа С1-33, Tektronix.

Рассмотрим оптическую схему установки (рис.4.2). Светящийся фронт детонации при взрыве заряда фокусируется конденсором на входную щель приемника. Светоделительная призма дает изображение входной щели на катодах фотоумножителей. Участки спектра  $\Delta\lambda_1$  и  $\Delta\lambda_2$  вырезаются интерференционными светофильтрами 2а и 2б. Тарировка прибора выполняется с помощью ленточной вольфрамовой лампы. Температура лампы меняется от 1500 до 2700 К.

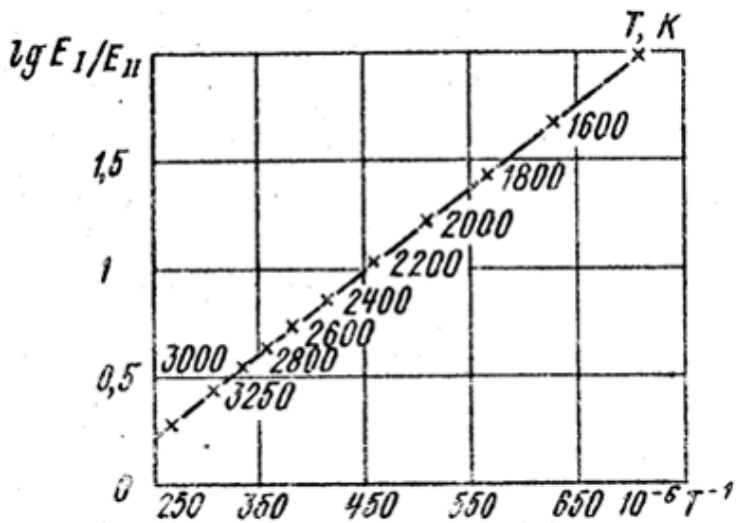


Рис.4.1 Зависимость относительного спектрального распределения энергии от температуры (тарировочная кривая)

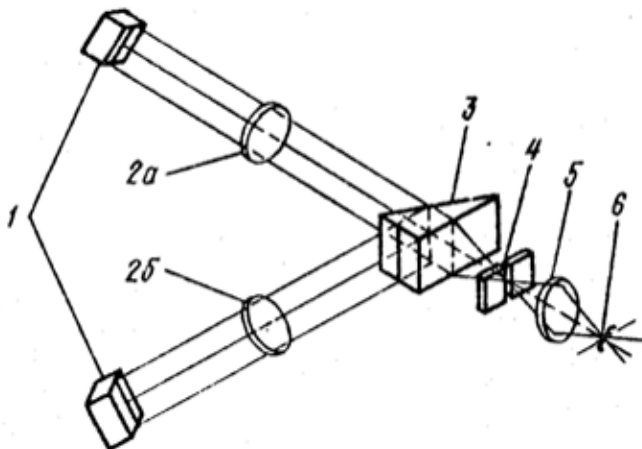


Рис.4.2 Оптическая схема установки:  
 1-фотоумножители; 2а,б-интерференционные светофильтры;  
 3-светоделительная призма; 4 - входная щель приемника; 5- конденсор; 6- светящийся фронт детонационной волны.

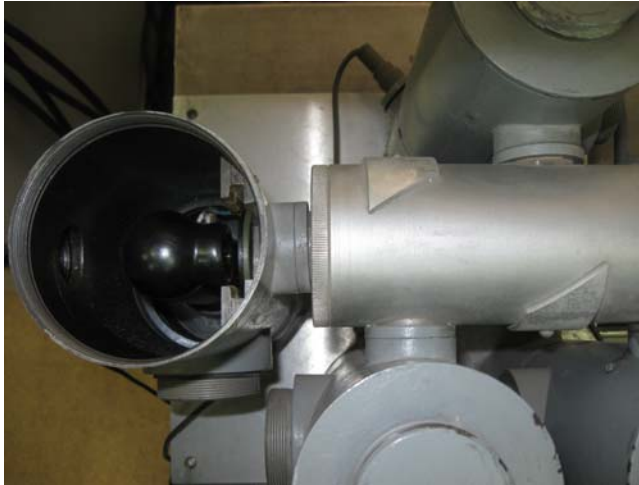


Рис.4.3 Оптическая система установки для измерения температуры



Рис. 4.4 Установка для измерения температуры:  
1-фотоумножители; 2 - прерыватель светового излучения;  
3- конденсор; 4-взрывная камера

### Порядок выполнения лабораторной работы:

1. Включить в сеть 220 В электронные приборы, необходимые для проведения работы и дать им прогреться в течение 10 мин.

2. Подготовить к работе осциллограф. Установить длительность развертки, равной 3 мкс на деление; ослабление по 1 и 2 каналам 1:100; произвести фокусировку и установить нужную яркость по лучам 1 и 2 каналов.

3. Включить тарировочную ленточную банд-лампу и установить по паспорту соответствующий минимальной цветовой температуре ток.

4. Перемещая фокусирующую линзу, добиться резкого изображения нити ленточной банд-лампы на входной щели фотоумножителей. Включить модулятор света и высокое напряжение прибора ВС-22, Изменяя лимбом входную щель в пределах 0,2-0,4 мм, добиться четких, не ограниченных электронно-лучевой трубкой тарировочных импульсов на экране осциллографа.

5. Заснять на фотопленку осциллограммы тарировочных импульсов, изменяя ток через банд-лампу, для температур 2000, 2100, 2200, 2300, 2400, 2500, 2600 °С.

6. Поместить во взрывную камеру заряд ВВ.

7. Установить лимб входной щели на отметку 0,05 мм, а заданные делители на входе осциллографа на отметку 1В. Произвести взрыв.

8. Проявить отснятую фотопленку или провести оцифровку.

9. Обработать результаты измерений с помощью компаратора определить амплитуды тарировочных импульсов по 1 и 2 каналам и амплитуды, полученные в результате взрыва заряда. Заполнить таблицу 4.1.

Таблица 4.1

#### Результаты измерений

Т, °С	Делитель на С 1-33		E <sub>1</sub> ·E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub> /E <sub>2</sub>	lg E <sub>1</sub> /E <sub>2</sub>
	1 канал	2 канал			
Банд-лампа					
2000					
2100					
2200					

T, °C	Делитель на С 1-33		E <sub>1</sub> ·E <sub>2</sub>	E <sub>1</sub> /E <sub>2</sub>	lg E <sub>1</sub> /E <sub>2</sub>
	1 канал	2 канал			
Банд-лампа					
2300					
2400					
2500					
2600					
Взрыв					
1					
2					

### Контрольные вопросы.

1. Поясните работу оптической системы установки.
2. Устройство установки по измерению температуры детонационного фронта.
3. Последовательность работы с осциллографом Tetronix.
4. Методы измерения температур.
5. Что характеризует цветовая температура?



## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

### Измерение скорости кумулятивной струи с помощью фоторегистра СФР-2М

**Цель:** Экспериментальное определение параметров движения кумулятивной струи при взрыве зарядов направленного действия.

**Общие сведения.** Кумулятивный эффект - существенное повышение местного действия взрыва кумулятивных зарядов по сравнению с обычными зарядами - проявляется при использовании зарядов, имеющих на одном из концов кумулятивную выемку и инициируемых с противоположного конца. Кумулятивный эффект можно во много раз увеличить, если кумулятивную выемку покрыть тонкой металлической облицовкой (рис.5.1).

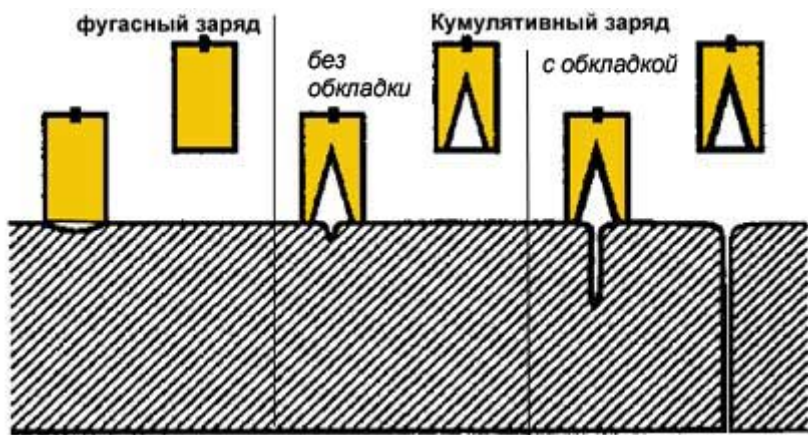


Рис.5.1 Действие взрыва на преграду

При наличии выемки без облицовки детонационная волна подходит к ее поверхности под некоторым углом, при этом основная часть энергии поверхностного слоя заряда при его разлете излучается внутри достаточно малого угла  $2\gamma$  (рис.5.2), образуя сходящиеся потоки продуктов детонации.

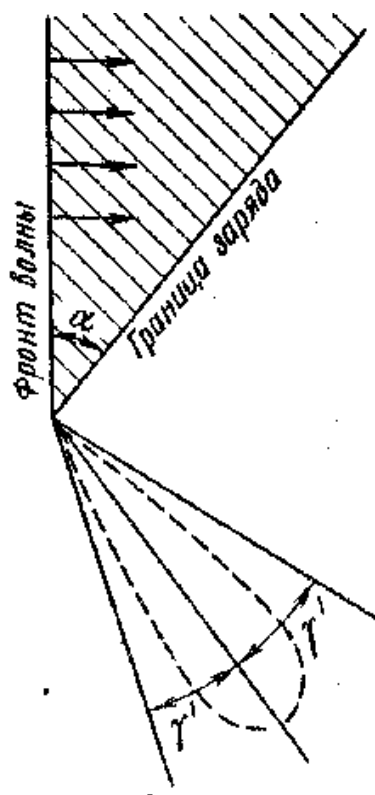


Рис.5.2. Разлет продуктов детонации с косога среза

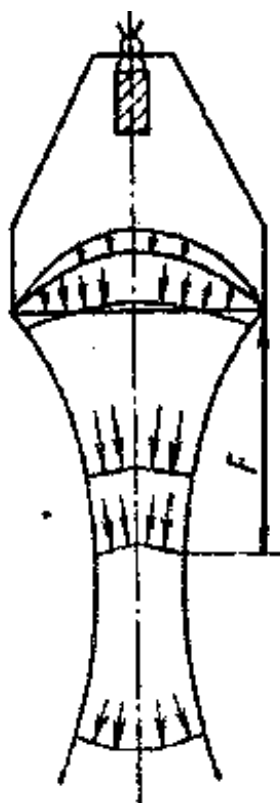


Рис.5.3. Формирование кумулятивной струи

Повышение эффективности заряда с кумулятивной выемкой, таким образом, обусловлено пространственной концентрацией продуктов взрыва, соударяющихся в сходящемся потоке на оси заряда и образующих при этом струю, обладающую большой скоростью и высокой плотностью, которые превышают скорость и плотность продуктов детонации, разлетающихся в других направлениях. На некотором расстоянии  $F$  от заряда происходит наибольшее уплотнение струи продуктов взрыва, эта точка называется кумулятивным фокусом. Вследствие быстрого расширения газообразных продуктов

взрыва плотность их на расстояниях, больших фокусного, очень быстро падает до сравнительно малой величины, и кумулятивная струя вырождается (рис.5.3).

В случае заряда с облицованной кумулятивной выемкой наиболее существенным процессом является образование струи, однако картина при этом в значительной степени меняется. Металлическая облицовка обжимается под действием продуктов взрыва, элементы ее последовательно захлопываются с образованием тонкой металлической струи, обладающей большей скоростью, причем последняя образуется исключительно за счет течения металла, прилегающего к внутренней поверхности облицовки, что является следствием быстрого соударения ее элементов в момент захлопывания.

Во внутреннем слое в основном концентрируется энергия облицовки. Наружный слой ее образует компактную массу, так называемый пест, скорость движения которого на порядок меньше скорости головной части струи. Через некоторое время за счет различных скоростей движения струя отрывается от песта, а еще через некоторое время под влиянием градиентов скоростей происходит ее разделение на отдельные частицы.

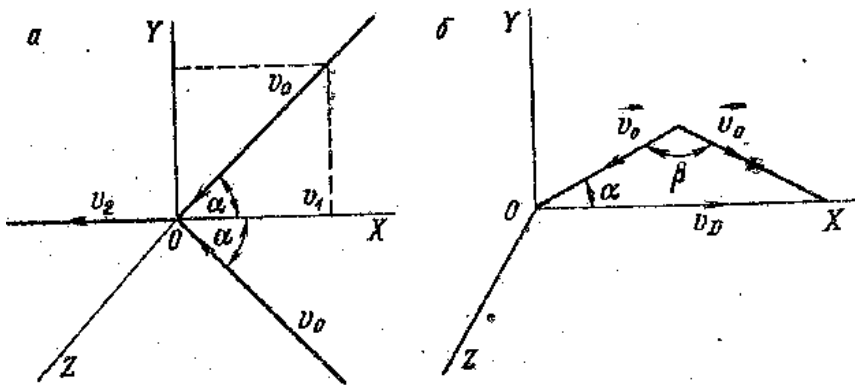


Рис.5.4 Соударение струй: а – точка пересечения струй неподвижна; б – точка пересечения струй движется вдоль плоскости

Хорошей основой для описания явления кумуляции является гидродинамическая теория сходящихся струй. Рассмотрим законы движения несжимаемой жидкости при схождении двух одинаковых плоских струй, движущихся под углом  $\alpha$  к оси  $X$  (рис.5.4.а). При столкновении струй со скоростью  $v_0$  и общим расходом жидкости в единицу времени  $m_0$  образуются две струи, расходящиеся в противоположных направлениях со скоростями  $v_1$  и  $v_2$  и расходами жидкости  $m_1$  и  $m_2$  п. Законы сохранения массы, импульса и кинетической энергии дают следующие соотношения ( $v_2 < 0$ ):

$$m_1 + m_2 = 0; \quad m_1 v_1 - m_2 v_2 = m_0 v_0 \quad (5.1)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = -m_0 v_0 \cdot \cos \alpha; \quad \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_0 v_0^2}{2} \quad (5.2)$$

из которых следует:

$$v_1 = -v_2 = v_0;$$

$$\frac{m_1}{m_0} = \frac{1}{2}(1 - \cos \alpha) = \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad \frac{m_2}{m_0} = \frac{1}{2}(1 + \cos \alpha) = \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

Мы рассматривали неподвижную точку пересечения струй. Пусть теперь она движется вдоль оси  $X$  в положительном направлении со скоростью  $v_D$ . Это соответствует движению точки схлопывания элементов облицовки при ее обжатии под действием детонационной волны и продуктов взрыва, а также движению облицовки как целого под действием расширяющихся продуктов взрыва. Величина  $v_D$  в линейном заряде с облицованной выемкой на торце определяется скоростью детонации  $D$ .

В этом случае скорости струй, движущихся направо и налево ( $v_2 < 0$ ),

$$u_1 = v_1 + v_D; u_2 = v_2 + v_D \quad (5.3)$$

а скорости падающих струй определяются соотношением (рис.4.б)

$$u_0^2 = v_0^2 + v_D^2 - 2v_0 v_D \cos \alpha$$

Угол  $\beta$ , определяющий направление движения исходных струй в новой системе координат, неподвижной по отношению к точке пересечения струй, определяется соотношением:

$$\sin \beta = \frac{v_D}{u_0} \sin \alpha$$

При заданных  $u_0$ ,  $\alpha$  и  $\beta$  в общем случае:

$$v_0 = u_0 \frac{\sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}; \quad v_D = u_0 \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} \quad (5.4)$$

$$u_1 = u_0 \frac{\sin \beta + \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha};$$

$$u_2 = u_0 \frac{\sin \beta - \sin(\alpha + \beta)}{\sin \alpha}$$

Для определения скорости кумулятивной струи при взрыве кумулятивного заряда в работе используются сверхскоростной фоторегистр СФР-2М, работающий в режиме лупы времени, в сочетании с теневой установкой ИАБ-451 и система импульсивной подсветки ИФК-20000.

Для получения наглядной картины истечения кумулятивной струи и определения ее скорости необходимо расположить во взрывной камере кумулятивный заряд так, чтобы его ось была перпендикулярна оптической оси установки ИАБ-451.

Инициировать заряд необходимо с торца. Для успешной съемки необходимо предусмотреть отсекку разлета продуктов взрыва детонатора, установив перед торцом детонатора преграду с отверстием, равным диаметру заряда. Покадровую съемку производить со скоростью  $10^6$  кадров в секунду.

### **Порядок выполнения лабораторной работы:**

1. Установить камеру СФР-2М для съемки в поле оптической теневой установки ИАБ-451. Кассету с фотопленкой поместить в камеру. Установить заряд во взрывной камере так, чтобы основная часть поля съемки приходилась на зону истечения кумулятивной струи.

2. Включить в сеть переменного тока 220 В пульт управления камерой СФР-2М, систему подсветки и блок синхронизации. Проверить по контрольно-измерительным приборам пульта управления работу агрегатов и правильность установки съемки.

3. Провести съемку, перекрутить пленку в кассету и проявить пленку.

4. Переснять с фотопленки на миллиметровую бумагу последовательность формирования и движения во времени фронта кумулятивной струи. Заполнить таблицу:

Отсчет времени с момента инициирования заряда ВВ, мкс	Расстояние между положением фронта головной части струи на данный момент времени и положением оболочки заряда ВВ до взрыва, мм	Расстояние между положением фронта головной части песта на данный момент времени и положением оболочки заряда ВВ до взрыва, мм

По данным таблицы построить годографы скоростей движения кумулятивной струи и песта.

### Контрольные вопросы.

1. Каков механизм действия кумулятивных зарядов?
2. Что называется фокусным расстоянием кумулятивной струи?
3. В каких случаях применяются кумулятивные заряды?
4. Что такое «ударное ядро»? Каким образом оно формируется?
5. Типы и виды кумулятивных выемок? Какие металлы применяются чаще всего при изготовлении КЗ?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

### Определение пробивного действия кумулятивных зарядов с помощью фоторегистра СФР-2М

**Цель:** изучение сравнительного действия зарядов с металлической облицовкой кумулятивной выемки и без нее при разрушении преград, моделирующих горные породы.

**Общие сведения.** Согласно гидродинамической теории кумуляции скорость струи  $v$  и скорость проникновения ее в преграду и связаны уравнением:

$$\frac{\alpha \rho_c (v - u)^2}{2} = \frac{\rho_{II} u^2}{2} + \sigma \quad (6.1)$$

в котором левая часть и первый член в правой части уравнения определяют динамические давления Бернулли на границе раздела в струе и преграде,

$$P_C = P_{II} = \rho_c \frac{(v - u)^2}{2} = \rho_{II} \frac{u^2}{2}$$

где  $\lambda$  - коэффициент,  $\lambda > 1$  для сложных жидких струй при невысокой скорости их частиц,  $\lambda > 2$  при очень высокой скорости частиц струй;  $\rho_c$  и  $\rho_{II}$  - плотности струи и преграды соответственно;  $\sigma$  - динамический предел прочности материала преграды;  $P_C$  и  $P_{II}$  - динамические давления в струе и в преграде соответственно.

Приращение импульса  $\delta J$ , создающее приращение проникновения  $\delta L$  за время  $\delta t$ , определяется по уравнению:

$$\delta J = \frac{\lambda \rho_c (v - u)^2 A_0 \delta \cdot t}{2} = P A_0 \delta \cdot t \quad (6.2)$$

где  $P$  – эффективное давление удара;  $A_0$  – площадь поперечного сечения элемента струи.

Пусть эффективная площадь сечения преграды, противодействующая струе после прекращения инерционного растекания, равна  $A'$ . Тогда  $A' \sigma' = P A_0$ , где  $\sigma'$  - предел статической прочности материала преграды. Из предыдущих уравнений следует, что:

$$A \cdot (P_n + \sigma) = A_0 \cdot P$$

где  $P_{II} = 0,5 \rho_{II} u^2$ .

Если давление инерционного потока  $P_{II}$  велико по сравнению с пределом прочности материала преграды  $\sigma$ , то:

$$\delta J = \frac{\lambda \rho_c (v_0 - u_0)^2 A_0 \delta \cdot t}{2} = \frac{\rho_{II} u_{II}^2 A \delta \cdot t}{2} \quad (6.3)$$

где индексом 0 обозначены элементы струи и преграды в момент удара;  $u_{II}$  – скорость поперечного растекания материала преграды в момент времени  $t$ .

При этом предполагается сохранение "динамического давления". Если величиной  $\sigma$  нельзя пренебречь, выражение (6.3) будет иметь вид:

$$\delta J = \frac{\lambda \rho_c (v_0 - u_0)^2 A_0 \delta \cdot t}{2} = \left( \frac{\rho_{II} u_{II}^2}{2} + \sigma \right) A \delta \cdot t \quad (6.4)$$

В начальный период проникновения струи в преграду, когда скорость соударения струй существенно не меняется, уравнение (6.4) можно проинтегрировать с учетом динамики воронкообразования. Обозначив  $r$  - радиус воронки в момент  $t$ ,  $u_0$  - скорость проникновения струи, уравнение (6.4) можно записать так:

$$\frac{\lambda \rho_c (v_0 - u_0)^2 A_0 \delta \cdot t}{2} = \left( \frac{\rho_{II} u_{II}^2}{2} + \sigma \right) A \delta \cdot t = \left[ \frac{\rho_{II} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2}{2} \right] A \delta \cdot t \quad (6.5)$$

Принимая для непрерывной струи  $\lambda = 1$ , пренебрегая влиянием прочности (в первом приближении даже для твердых материалов прочность мала по сравнению с давлением Бернулли до тех пор, пока площадь поперечного сечения  $A_0$  близка к конечной площади  $A$ ) и учитывая, что  $A_0/A = (r_0/r)^2$ , из уравнения (6.5) получим уравнение:



$$\frac{\rho_{II}}{2} \left( \frac{dL^2}{dt} \right) \left( \frac{r_0}{r} \right)^2 = \frac{\rho_{II}}{2} \left( \frac{dr}{dt} \right)^2 \quad (6.6)$$

в котором  $L$  – глубина проникновения;  $r$  – радиус пробойны;  $r_0$  – радиус струи.

Проинтегрировав уравнение (6.6), найдем соотношение:

$$r^2 = 2 \cdot r_0 \cdot L + r_0^2,$$

представляющее собой уравнение параболы с действительными корнями, соответствующими только положительным значениям  $r$  и  $r_0$ . Для определения пробивного действия кумулятивного заряда удобным моделирующим материалом является органическое стекло. Оно сохраняет прозрачность при прохождении волн сжатия и становится непрозрачным при воздействии волн разрежения и растягивающих напряжений.

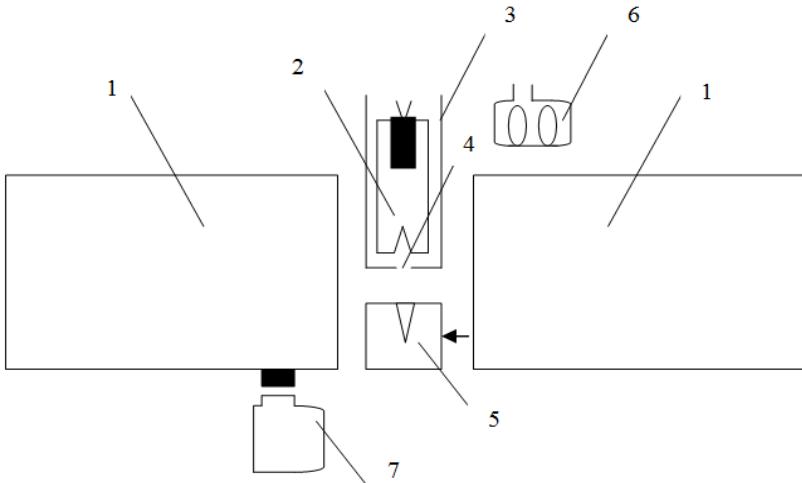


Рис.6.1 Схема экспериментальной установки: 1 – оптическая теньевая установка ИАБ-451, 2 – кумулятивный заряд, 3 – цилиндрический экран, 4 – отверстие, 5 – блок испытываемого материала, 6 – лампа ИФК-20000, 7 – сверхскоростной фоторегистр СФР-2М.

Съемка картины формирования струи при взрыве кумулятивного заряда и проникновения ее в блок органического стекла позволяет визуально наблюдать и анализировать процесс взаимодействия кумулятивной струи с преградой (рис.6.1).

Фотосъемка производится сверхскоростным фоторегистром СФР-2М, работающим в режиме лупы времени, в сочетании с теневой установкой ИАБ-451. Подсветка объекта съемки осуществляется импульсной лампой ИФК-20000.

Кумулятивный заряд (см. рисунок 6.1) располагают на фокусном расстоянии от блока органического стекла размером 150 x 150 x 80 мм в проходящем пучке света, формируемом лампой подсветки ИФК-20000 и теневой установкой ИАБ-451. Для отсечки продуктов взрыва заряд устанавливают в цилиндрический экран с отверстием диаметром 10 мм, позволяющим кумулятивной струе беспрепятственно формироваться. Съемка производится со скоростью  $10^6$  кадров в секунду.

### **Порядок выполнения лабораторной работы:**

1. Установить камеру СФР-2М для съемки в поле оптической теневой установки ИАБ-451. Кассету с фотопленкой установить в камеру, обеспечив легкую протяжку пленки вдоль фокальной плоскости. Установить блок органического стекла и заряд во взрывную камеру с таким расчетом, чтобы в поле съемки полностью находился блок органического стекла и головная часть заряда.

2. Включить в сеть переменного тока 220 В пульт управления камерой СФР-2М, систему подсветки, блок синхронизации. Проверить по контрольно-измерительным приборам пульта управления работу агрегатов и правильность установки съемки.

3. Произвести съемку пробивания органического стекла кумулятивным зарядом без облицовки. Проявить отснятую пленку.

4. Повторив пп.1-3, произвести съемку пробивания органического стекла кумулятивной струёй заряда с металлической облицовкой.

5. Спроецировать изображение пленки на экран и проанализировать формирование волн сжатия и разрежения, движение кумулятивных струй при взрыве зарядов с облицовкой и без облицовки

кумулятивной выемки. Описать последовательность пробивания органического отекла этими зарядами.

6. Перенести с пленки на миллиметровую бумагу последовательность формирования и движения фронтов волн сжатия и кумулятивных струй при взрыве исследуемых зарядов и заполнить таблицу:

Отсчет времени с момента инициирования ВВ, мкс	Расстояние между положением фронта волны сжатия на данный момент времени и положением оболочки заряда ВВ до взрыва, мм		Расстояние между положением фронта головной части струи на данный момент времени и положением оболочки заряда ВВ до взрыва, мм	
	Заряд ВВ без облицовки	Заряд ВВ с облицовкой	Заряд ВВ без облицовки	Заряд ВВ с облицовкой

7. По данным таблицы построить годографы скоростей движения волн сжатия и кумулятивных струй в блоках органического стекла и определить глубину их разрушения.

### **Контрольные вопросы.**

1. Краткое изложение теории действия кумулятивных зарядов.
2. Как определяется глубина проникания КС в преграду по гидродинамической теории кумуляции?
3. Каков механизм взаимодействия кумулятивной струи с хрупкими материалами?
4. Построение годографа скорости движения волн сжатия и кумулятивных струй в блоках органического стекла.
5. От каких параметров кумулятивного заряда зависит глубина проникания КС?
6. Классификация кумулятивных зарядов.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7

### Определение максимального давления взрыва угольной пыли в рамках заданного диапазона дисперсности

**Цель:** Научиться определять максимальное давление взрыва угольной пыли заданной дисперсности с помощью 20-литровой сферической взрывной камеры.

**Общие сведения.** При изучении комплекса вопросов, связанных со взрывами угольной пыли, в нормативах и технической литературе рассматриваются частицы размерами до 841-850 мкм. В Правилах безопасности США, Австралии и др. угледобывающих стран к взрывоопасной пыли относятся частицы, проходящие через сито №20 (841 мкм), к витающей пыли относятся частицы, проходящие через сито №200 (74 мкм). В РФ к термину «взрывчатая пыль» относят частицы до 850 мкм. С учетом принятых обозначений к понятию «взрывчатая пыль» отнесены частицы  $d_e \leq 841 \div 850$  мкм.

Взрывное горение угольных частиц возможно только в аэрозольном состоянии. Для аэрозолей предусмотрены следующие показатели пожаровзрывоопасности:

- нижний концентрационный предел распространения пламени или воспламенения (НКПР);
- максимальное давление взрыва ( $P_{max}$ )
- скорость нарастания давления при взрыве ( $dP/dt$ );
- минимальная энергия зажигания ( $W_{min}$ );
- минимальное взрывоопасное содержание кислорода (МВСК)

**Экспериментальный метод определения максимального давления взрыва аэрозолей в 20-литровой камере.** Полномасштабные взрывные эксперименты являются крайне трудоемкими и дорогостоящими. Так расход специально подготовленной угольной пыли в разных взрывах составляет от 0,4 до 8 кг на погонный метр штрека. Для 400-метровой взрывной выработки необходимо подготовить и разместить до 3,5 тонн угольной пыли с заранее определенным дисперсным составом. Для снижения трудозатрат и увеличения количества проводимых испытаний показатели взрывоопас-

ности определяют в сферических взрывных камерах (СВК) объемом 20 л. Рассматриваемая в настоящей работе методика основана на материально-технической части, которая включает в себя лабораторный комплекс, основными блоками которого являются СВК и система управления и сбора данных схематически представленные на рис. 7.1.

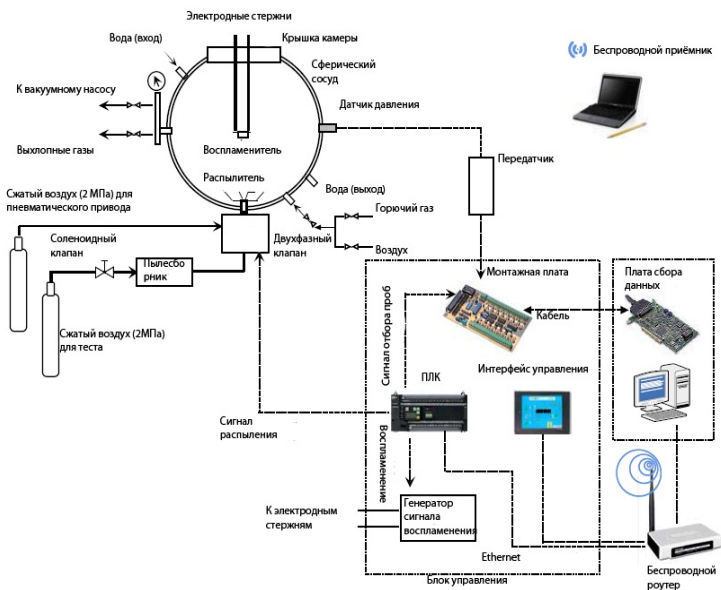


Рис. 7.1. Схема лабораторной установки

В блоке управления (БУ) установлен программируемый логический контроллер (ПЛК), генератор сигнала воспламенения, панель данных давления и пользовательский интерфейс. Он (БУ) соединен с компьютером через Ethernet кабели. Изменение давления во взрывной камере переводится в электрический сигнал датчиком давления и передающим устройством, записывается системой сбора данных и сохраняется в памяти компьютера. Чувствительность датчиков давления – 0,021 кПа. Оболочка камеры двухслойная. Для поддержания постоянной температуры внутрь камеры заливается вода; возможно применение и другого хладагента. На одной из сто-

рон СВК находится смотровое окно для визуального наблюдения за процессом воспламенения гибридной смеси внутри камеры. СВК оборудована клапанами (входные и выходные соединения) для откачки воздуха, удаления продуктов горения, слива/налива хладагента и т.п.

Мультифазный клапан подачи пыли/воздуха установлен под дном испытательной камеры и используется для контроля над процессом рассеяния пыли. Реле давления установлено внутри стенки сосуда и используется для определения динамического давления взрыва пыли. Структура соединения крышки с камерой аналогична таковой на промышленных и лабораторных автоклавах. Манипуляции с крышкой может производить один человек. Рассеивающее сопло установлено на дне камеры и используется для равномерного рассеяния пыли в камере. Общий вид 20 л СВК показан на рис. 7.2.

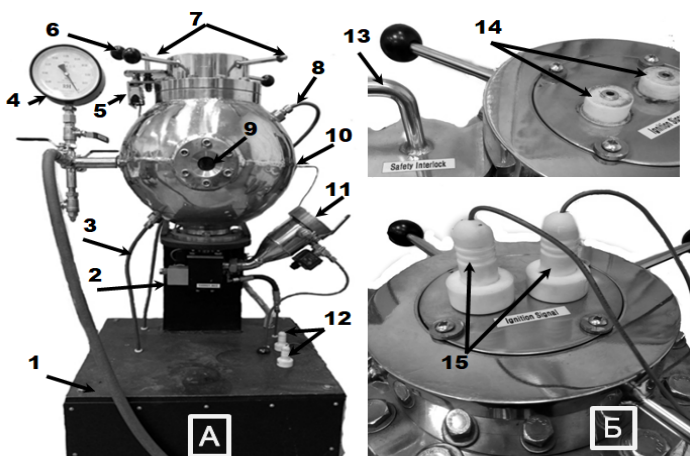


Рис. 7.2. А. Внешний вид 20-литровой взрывной камеры (слева); Б. Увеличенный фрагмент запорной крышки (справа), со снятыми и подсоединенными кабелями зажигания:

1 - основание (стойка); 2 - мультифазный клапан подачи пыли/воздуха; 3 - вывод рециркуляционной воды; 4 - вакуумметр; 5 - предохранительная задвижка; 6 и 13 - ручка замка безопасности предохранительной задвижки; 7 - поворотные ручки крышки камеры; 8 - ввод для рециркуляционной воды; 9 - смотровое окно; 10 - ввод датчика давления;

11 - сосуд для образцов пыли (сосуд предварительной компрессии); 12 - контакты проводов зажигания в снятом положении; 14 - выход токопровода на поверхность запорной крышки; 15 - контакты проводов зажигания в подсоединенном к токопроводам состоянии.

В случае исследования образцов каменноугольной пыли необходимо знать следующие ее параметры: зольность, выход летучих и влажность. Эти параметры можно определить, проведя входной контроль. Иницилирующее устройство включает в себя навеску химического воспламенителя, общей массой 2,4 г, размещаемого в рабочей емкости. Каждое устройство при электровоспламенении выделяет 10 кДж энергии. Давление, создаваемое двумя такими воспламенителями составит  $P_{\text{воспл}} = (0,19 \pm 0,01)$  МПа.

### **Порядок проведения лабораторной работы.**

1. Запустить программное обеспечение *ExTest* на компьютере, соединенным с блоком управления лабораторной установки.

2. Войти на вкладку «*File*» в открывшемся диалоговом окне выберите «*New test*». Второй способ открытия новой карты испытаний заключается в непосредственном нажатии на панели инстру-

ментов значка  «*Create a new test card*».

3. Заполнить карту испытания. В пустые ячейки карты (диалоговые информационные окна) необходимо ввести для каждого конкретного испытания концентрацию пыли и концентрацию кислорода в воздухе, температуру и влажность воздуха окружающей среды. При этом поля “*Test Standard*” и “*Test Device*” выставляются по умолчанию.

4. После заполнения карты испытаний необходимо нажать на кнопку «*Start Test*», появится интерфейс сбора данных в ожидании триггерного сигнала.

5. Взвесить образец угольной пыли и поместить его в сосуд предварительной компрессии, плотно завинтить крышку сосуда.

6. Прикрутить пиротехнические воспламенители к концам электродных стержней верхней крышки основной камеры сгорания.

7. Закрыть основную крышку установки. Завинтить её до упора и установить блокировку (*Safety Interlock*) в основное положение. Наверху этой крышки к разъемам электродов необходимо подключить кабели зажигания.

8. Закрыть запорные вентили выхлопного крана и крана ввода газа и открыть вентиль вакуумного крана. Включить вакуумный насос. Когда стрелка вакуумметра остановится на  $-0,065$  МПа закрыть вентиль вакуумного крана и отключить насос. Подождать около 3 секунд, затем установить значение вакуумметра на  $-0,06$  МПа с помощью вентилей выхлопного крана.

9. Убедиться (еще раз проверить) в закрытии крана вакуумметра и закрытии остальных вентилей.

10. На лабораторном блоке управления нажать кнопку подготовки сжатого воздуха (*Prepare Gas*) для впрыска пыли внутрь камеры (рис. 3 кнопка 2). Кнопка «*Prepare Gas*» автоматически отключится, когда давления достигнет заданного уровня (*Setting Pressure*).

Заданные значения и готовность установки к работе можно увидеть на панели блока управления экспериментальной установкой (см рис. 7.3 а. кнопки управления и 7.3 б. индикаторы).



Рис. 7.3. Увеличенные фрагменты панели блока управления взрывной камерой:



а.) установленные значения и кнопки управления: 1 - циркуляция воды; 2 - сжатый газ;

3 - инициирования воспламенителей; б.) индикаторы готовности: 4 - питание установки,

5 - циркуляция воды, 6 - сосуд предварительной компрессии (при достижении заданных 2 МПа загорается зеленым цветом), 7 - инициирование, 8 и 9 - индикаторы готовности установки для воспламенения (перед воспламенением должны быть активны)

12. Нажать кнопку «*Manual Trigger*» на интерфейсе сбора данных программы *ExTest*, после чего сразу нажать на кнопку зажигания (*Ignite*) на панели пользовательского интерфейса (см. рис. 7.3 кнопка 3).

13. Открыть выхлопной клапан для выравнивания давления в сосуде с атмосферным давлением и включить вытяжку, после чего нужно снять крышку установки и тщательно очистить её внутреннюю часть с помощью воздушного компрессора.

Если избыточное давление ( $P_{изб}$ ) превысило созданное воспламенителем давление ( $P_{воспл}$ ) на 0,02 МПа, то считается, что взрыв угольной пыли произошёл.

После успешного воспламенения программа «*ExTest*» автоматически выведет кривую давления-времени по данному испытанию см. рис.7.4. и позволит получить исходные данные для дальнейшей их обработки и графической визуализации см. рис.7.5.

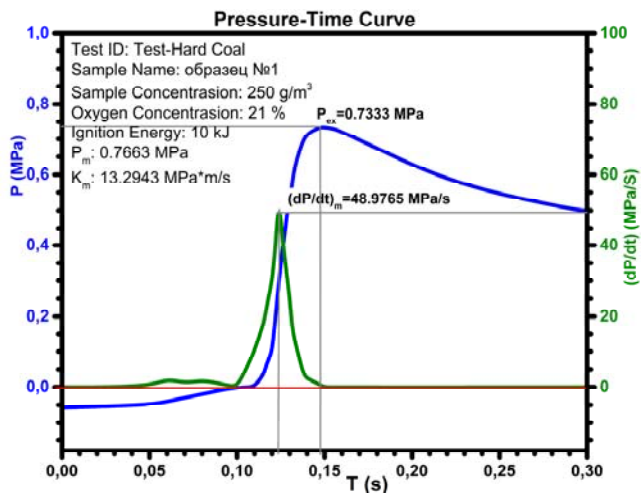


Рис. 7.4. Кривая давления-времени образца № 1.

С помощью полученных, прикладным программным комплексом ExTest, по результатам эксперимента массива данных, построить суммарный график зависимости динамики изменения давления взрыва от дисперсионного состава. Пример на рис. 2.8.

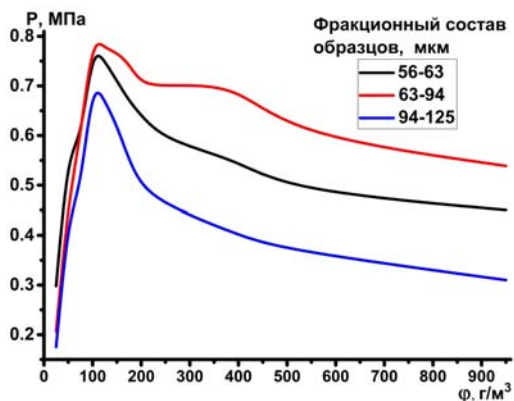


Рис. 7.5. График зависимости изменения давления взрыва от концентрации пылевоздушной смеси в объеме взрывной камеры установки.

### **Контрольные вопросы**

1. Зачем необходимо знать эффективные параметры предохранительной среды?
2. Назовите гипотезы, согласно которым происходит горение и взрыв пылевоздушной среды.
3. Дайте определение понятия давление взрыва.
4. Что такое скорость нарастания давления при взрыве? Где применяется данная характеристика?
5. Дайте определения понятий ингибитор и флегматизатор. В чем заключается различие между ними?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### Основная литература

1. *Андреев С.Г.* Физика взрыва / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум и др. М., Физматлит, 2004. 823 с.
2. *Кутузов Б.Н.* Технология и безопасность изготовления и применения ВВ на горных предприятиях. / Б.Н. Кутузов, Г.А. Нишпал -М.:МГГУ, 2004. 255 с.
3. *Орленко Л.П.* Физика взрыва и удара. - М.: Физматлит, 2006. 220 с.
4. *Парамонов Г.П.* Теория детонации промышленных взрывчатых веществ. / Г.П. Парамонов, Ю.И. Виноградов, В.А. Артемов, В.Н. Ковалевский. СПб, СПГГИ, 2004. 102 с.

### Дополнительная литература

5. *Дубнов Л.В.* Промышленные взрывчатые вещества. / Л.В. Дубнов, Н.Р. Бахаревич, А.И. Романов. - М.: Недра, 1988. 322с.
6. *Зельдович Я.Б.* Математическая теория горения и взрыва. - М.: Наука, 1980. 412 с.
7. *Кук М.А.* Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра. 1980. 279 с.
8. *Турчанинов И.А.* Основы механики горных пород. / М.А. Иофис, Э.В. Каспарян. М.: Недра. 1977. 488 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Лабораторная работа №1 Определение чувствительности взрывчатого вещества к удару .....	5
2. Лабораторная работа №2 Определение чувствительности ВВ к трению на копре К-44-III .....	10
3. Лабораторная работа №3 Определение скорости детонации фотографическим способом .....	18
4. Лабораторная работа №4 Определение температуры детонационного фронта электронно-оптическим методом.....	24
5. Лабораторная работа №5 Измерение скорости кумулятивной струи с помощью фоторегистра СФР-2М .....	32
6. Лабораторная работа №6 Определение пробивного действия кумулятивных зарядов с помощью фоторегистра СФР-2М .....	38
7. Лабораторная работа №7 Определение максимального давления взрыва угольной пыли в рамках заданного диапазона дисперсности.....	43
Библиографический список.....	51