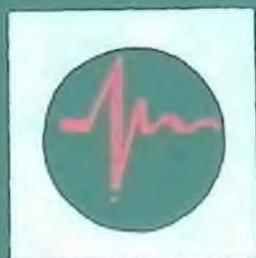


М.Ф. ДРУКОВАНЫЙ  
Л.Ф. ПЕТРЯШИН  
В.П. ВИЛОКОНЬ  
Г.В. КУЗНЕЦОВ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
РЕГИСТРАЦИИ  
ДЕЙСТВИЯ  
ВЗРЫВА  
В ГОРНЫХ  
ПОРОДАХ**



Книга должна быть возвращена не  
позже указанного здесь срока

Количество предыдущих выдач \_\_\_\_\_

03-1071

703

ЭГН и

резюме

Р

77 20052

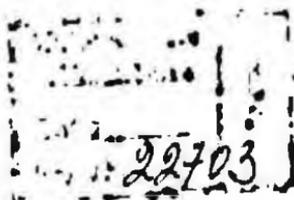
ИНСТИТУТ ГЕОТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ АН УССР

622,235

М54

М. Ф. ДРУКОВАНЫЙ,  
Л. Ф. ПЕТРЯШИН,  
В. П. БИЛОКОНЬ,  
Г. В. КУЗНЕЦОВ

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА  
РЕГИСТРАЦИИ  
ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА  
В ГОРНЫХ  
ПОРОДАХ**



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКОВА ДУМКА» КИЕВ—1971



Непрерывная регистрация быстрых кратковременных процессов осуществляется с помощью специальных приборов, которые по принципу действия можно разделить на два типа. К первому относятся оптические приборы—фотоаппараты и киносъёмочные камеры. Ко второму—электрические приборы—магнитоэлектрические и электроннолучевые осциллографы. Необходимо, однако, заметить, что приборы первого типа занимают при регистрации однократных процессов доминирующее положение, так как они позволяют получить объективный документ, который может храниться длительное время и изучаться лицами, отдалёнными пространством и временем от зафиксированного на изображении явления. К тому же на фотографическом изображении регистрируется одновременно большое количество объектов и их деталей в пределах больших углов, значительно превышающих весьма ограниченный угол зрения глаза человека.

Приборы второго типа при регистрации взрывных процессов требуют специальных дополнительных устройств (датчиков), которые преобразовывают изменение регистрируемого процесса в пропорциональное изменение электрического тока. Документом для исследователя является осциллограмма, которую получают с помощью приборов первого типа. Для правильного выбора регистрирующей аппаратуры необходимо знать ее возможности и принцип действия.

### 1. Камеры для скоростной киносъёмки

С помощью фотографического изображения можно измерять размеры объектов и величин смещений, а также интенсивности излучения объектов. Весьма ценным свойством фотографического метода является возможность регистрации изображений с чрезвычайно короткими выдержками, обеспечивающими съёмку отдельных фаз быстротечных явлений.

Наибольший интерес представляет возможность обратного изменения масштаба времени, т. е. замедленного представления на экране быстрых, кратковременно протекающих процессов, не воспринимаемых человеческим глазом. Следует отметить, что

материалы, получаемые в результате скоростной киносъемки, интересны не столько с точки зрения получения на экране общей картины быстротечного процесса в замедленном, доступном для восприятия виде, сколько с точки зрения получения количественных характеристик зарегистрированного на пленке движения путем покадрового анализа.

Разработанные и выпускаемые в СССР съемочные камеры для скоростной киносъемки можно разделить на два типа. Камеры первого типа позволяют получать прерывистую покадровую регистрацию, в результате которой на пленке образуется серия последовательных кадров. Камеры второго типа предназначены для непрерывной скоростной фоторегистрации снимаемого процесса с получением развернутого изображения без деления на кадры; в отдельных случаях такое изображение может быть напечатано в виде серии последовательных кадров и спроектировано на экран с помощью кинопроектора.

Камеры первого типа отечественного производства можно подразделить на три группы. К первой группе съемочных камер, которые близки к обычным киносъемочным аппаратам, относятся скоростные камеры с прерывистым движением пленки, осуществляемым с помощью скачкового грейферного механизма. Благодаря тому что кинопленка в момент экспонирования в кадровом окне неподвижна, изображение, полученное этими камерами, высококачественное. Практическим пределом частоты съемки камерами с прерывистым движением пленки с помощью грейферного механизма является величина, не превышающая 250—300 кадров в секунду.

У камер второй группы (с так называемой оптической компенсацией) частота съемки приблизительно 12—15 тыс. кадров в секунду. В этих камерах пленка при съемке движется непрерывно, а оптическое изображение периодически в течение времени экспонирования каждого последовательного кадра перемещается в ту же сторону и с той же скоростью, что и пленка. Благодаря этому практически можно избежать смазывания изображения на пленке. В качестве оптических компенсаторов чаще всего применяются вращающиеся многогранные стеклянные призмы или зеркальные барабаны. К камерам этой группы относятся скоростная киносъемочная камера СКС-1.

К третьей группе относятся многообъективные съемочные камеры, в которых изображение на последовательных кадрах образуется с помощью ряда одинаковых оптических систем, работающих поочередно. Съемка производится на движущуюся или неподвижную пленку. Эти камеры характеризуются разнообразием и сложностью оптических систем и затворов. Частота съемки может достигать нескольких десятков миллионов кадров в секунду.

В съёмочных камерах второго типа—скоростных фоторегистраторах—происходит непрерывное относительное перемещение оптического изображения и фотографического слоя, в результате чего изображение получается развернутым. Размер регистрируемого изображения в направлении развертки выбирается минимальным, что обеспечивает возможность получения достаточной разрешающей способности. Это достигается путем экспонирования сквозь узкую щель, расположенную перпендикулярно к направлению развертки. Скорость развертки в камерах достигает 4000 м/сек.

Наиболее приемлемы для исследования взрывных процессов камеры СКС-1М, ССКС-3 и СФР. Их основные характеристики приведены в табл. 1. В этих камерах удачно выбран диапазон частот съемки, что позволяет применять их для изучения скорости детонации зарядов ВВ, сдвижения отбиваемой горной массы, развития полей напряжений в оптически активных материалах, развития трещин и т. п.

Таблица 1

Основные характеристики скоростных камер

Камера	Киноплёнка	Формат кадра, мм	Частота съёмки, кадры в секунду	Общее число получаемых кадров	Длина заряжаемой плёнки, м	Примечание
СКС-1М	16-миллиметровая 2×8 мм	7,5×10,4	150—4000	До 3900	30	С четырехгранной призмой С восьмигранной призмой
		3,75×5,1 или 3,75×10,4	300—8000	До 7800	30	
ССКС-3	16-миллиметровая	7,5×10,4	20 000— 250 000	До 800	8	Камера ждущего типа
СФР (лу- па време- ни)	35-милли- метровая	Круг диа- метром 5 или 10 мм	25 000— 2,5 млн.	60 или 240	1,6	С вращающимся зеркалом и двумя сменными линзовыми венцами
СФР (фо- торегист- ратор)	35-милли- метровая	25×375	150—3750 м/сек	—	1,6	Выпускается в трех вариантах с объективами с различными фокусными расстояниями

Скоростная киносъемка—не технический прием, а исследовательский метод. Ее следует рассматривать как некоторый процесс, начинающийся с постановки задач и заканчивающийся оформлением результатов. Этот процесс условно разделяется на три периода: подготовительный, съёмочный, послесъёмочный (табл. 2).

Таблица 2

## Процесс исследовательских кино съемок

Период	Этап	Относительная трудоемкость, %	Содержание работы
Подготовительный	Изучение объекта	10—15	Ознакомление с задачами исследований и техникой эксперимента (испытание). Формулирование задач съемок. Изучение технических характеристик и фотографических свойств объекта. Проведение прикидочных, пробных съемок. Предварительная наметка методики съемок и анализа
	Разработка методики	10—15	Конкретизация методики съемок и анализа. Проведение пробных съемок объекта или макета для уточнения методики. Составление окончательной методики программы проведения съемок
	Подготовка объекта, аппаратуры и технических средств	30—40	Изготовление принадлежностей для съемки и расшифровка фильма. Испытание камеры, обработка приемов освещения, подбор пленки. Подготовка объекта или макета. Пробная расшифровка и уточнение операторских расчетов. Уточнение программы проведения кино съемок
Съемочный	Съемка	10—15	Выполнение съемок по намеченной программе, лабораторная обработка пленки, кинопросмотры. Ведение съемочного протокола
Послесъемочный	Анализ материалов	15—20	Подготовка снятого материала. Кинопросмотры. Покадровая расшифровка. Анализ полученных данных и составление документации (графики, таблицы, описательные характеристики)
	Оформление результатов	10—15	Составление и утверждение технического отчета. Монтаж и оформление научного киноотчета. Производство лабораторных и других работ, связанных с киноотчетом (изготовление надписей, озвучивание и т. п.)

При проведении скоростных кино съемок для получения точных результатов прежде всего необходимо решить вопрос о выборе оптимальной частоты смены кадров. Для этого следует определить геометрические параметры и траекторию движения объекта и предварительно установить скорость движения. Кроме того, необходимо охарактеризовать объект с точки зрения светотехнических его характеристик, что позволит найти правильную экспозицию.

Скоростная кино съемка часто сочетается с регистрацией параметров изучаемых процессов с помощью электрических датчи-

ков и осциллографа. Осциллографирование быстропотекающих процессов и скоростная киносъемка дополняют друг друга.

Схемы включения киносъемочной и регистрирующей аппаратуры могут быть различными, но в принципе все они сводятся к использованию общего генератора частоты в качестве датчика сигналов времени. Опыт показывает, что при съемках камерами СКС-1 генератор частоты нужно включать в то мгновение, когда транспортируемая пленка уже приобрела рабочую скорость. Поэтому необходимо, чтобы управление регистрирующей и съемочной аппаратурой при исследовании быстропотекающих процессов было автоматизировано, т. е. производилось от пульта управления, имеющего соответствующие реле с регулировкой интервалов запаздывания или опережения.

## 2. Магнитоэлектрические осциллографы

При исследовании быстропеременных процессов непрерывная регистрация их осуществляется с помощью осциллографов, указатель которых одновременно является и пишущим органом. Изменения во времени измеряемой величины преобразуются в соответствующий поворот указателя. При этом инерционные свойства указателя накладывают определенные ограничения на частотное воспроизведение процесса. При частотах свыше 100 *гц* непригодны «жесткие» (стрелочные) указатели, а свыше 1000 *гц* — указатели с жидкой струей. Для записи более высоких частот пригодны только световые и электронные лучи, которые образуются и фокусируются специальными оптическими устройствами. В зависимости от типа пишущего органа и, следовательно, принципа действия осциллографы можно подразделить на две основные группы: светолучевые (магнитоэлектрические) и электроннолучевые (катодные).

**Светолучевые осциллографы.** В отечественных светолучевых осциллографах применяются три вида гальванометров (рис. 1). Однако практическое значение в настоящее время имеют только два вида гальванометров, выполненных по магнитоэлектрическому принципу: петлевой (рис. 1, а) и рамочный (рис. 1, б). Между полюсами магнита петлевого гальванометра натянута в виде петли тонкая металлическая нить из немагнитного сплава, обладающего высокими механическими свойствами. Вследствие взаимодействия магнитного поля и тока, протекающего по ветвям петли, последние прогибаются в разные стороны и наклеенное на них зеркальце поворачивается на угол, пропорциональный (при малых углах) току, протекающему по петле. Петлевые гальванометры изготавливаются только с высокими частотами собственных колебаний (1000—20 000 *гц*), так как петлевая конструкция измерительной системы затрудняет возможность изготовле-

ния низкочастотных высокочувствительных гальванометров для осциллографов. Для получения наибольшего угла поворота зеркала, а следовательно, и наибольшей для данного гальванометра чувствительности зеркальце следует наклеивать на петлю в той области, которая расположена между опорными порожками, и в середине магнитного зазора.

В том случае, когда необходима особо высокая чувствительность измерительной системы к току, применяют обычный гальванометр магнитоэлектрической системы с рамкой на растяжках.

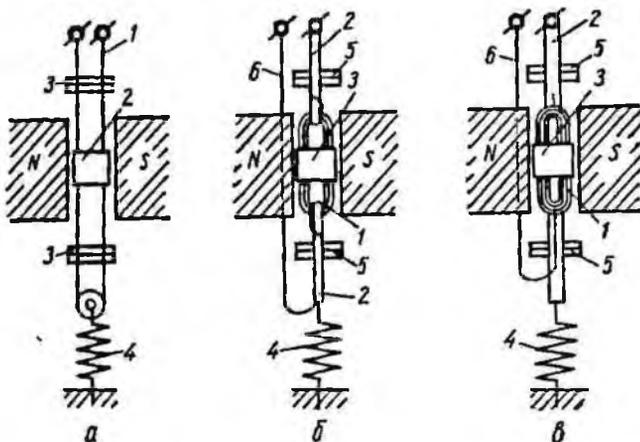


Рис. 1. Схемы гальванометров, используемых в осциллографах: а — петлевой (1 — тонкая металлическая лить; 2 — зеркальце; 3 — опорные порожки; 4 — натяжная пружинка); б — рамочный (1 — рамка; 2 — растяжки; 3 — зеркальце; 4 — натяжная пружинка; 5 — опорные порожки; б — соединительный проводник); в — рамочный со сплошной растяжкой (1 — рамка; 2 — сплошная растяжка; 3 — зеркальце; 4 — натяжная пружинка; 5 — опорные порожки; б — соединительный проводник).

На рис. 1, б показана схема гальванометра с многовитковой рамкой из тонкой изолированной медной или алюминиевой проволоки, укрепленной на двух металлических растяжках, удерживающих ее в среднем, нулевом положении. Ток, протекающий по виткам рамки гальванометра, взаимодействуя с полем постоянного магнита, заставляет рамку поворачиваться вместе с наклеенным на нее зеркальцем на угол, пропорциональный измеряемому току. Так как рамка достаточно жесткая и при поворотах не деформируется, зеркальце можно приклеивать в любом месте рамки или даже на растяжке, в непосредственной близости к рамке. Гальванометры с рамкой, укрепленной на двух растяжках, изготавливаются с частотой собственных колебаний 1—2000 и даже 5000 гц.

Для достижения высокой частоты собственных колебаний рамочного гальванометра (5000—10 000 гц и выше) необходимо

иметь легкую рамку с малым моментом инерции, подвешенную на очень жестких растяжках. Эту технически трудную задачу удалось решить путем использования сплошной скользко угодной жесткой растяжки, на которую наклеивается легкая малопрочная рамка (рис. 1, в). Для лучшей балансировки поворотной измерительной системы рамка делится на две части и наклеивается по обе стороны растяжки. В этой конструкции измерительной

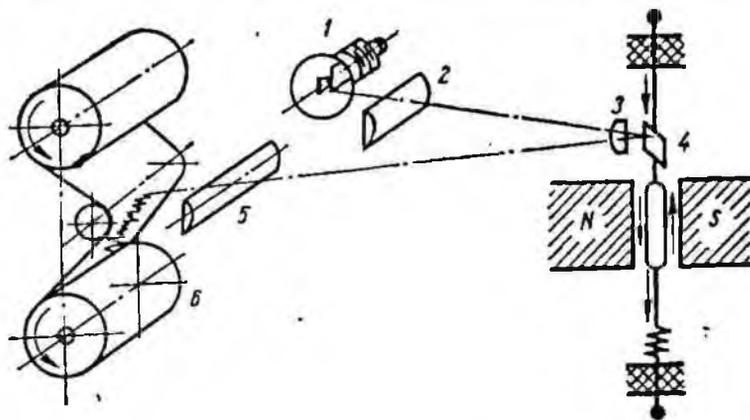


Рис. 2. Принципиальная схема современного светолучевого осциллографа: 1 — лампа накаливания с тонкой прямой спиралью; 2 — цилиндрический конденсатор; 3 — сферическая линза; 4 — зеркальный гальванометр; 5 — цилиндрическая линза; 6 — фотолента.

системы рамочного Гальванометра зеркальце может также наклеиваться в любом месте рамки или на растяжке в непосредственной близости от рамки.

Возможность укрепления зеркальца вне рабочего магнитного зазора (на растяжке возле рамки) без потерь чувствительности гальванометра позволила создать миниатюрные рамочные гальванометры, группируемые в блоки с общими постоянными магнитами. Создание миниатюрных высокочувствительных рамочных гальванометров с широким диапазоном собственных частот, группируемых в блоки с общими постоянными магнитами, позволило разработать легкие портативные осциллографы, удобные для использования в различных условиях.

Наиболее распространенная принципиальная оптическая схема современных светолучевых осциллографов показана на рис. 2. Как видно из схемы, осциллограф состоит из таких узлов: измерительного устройства; источника света и оптики; регистрирующего устройства, выполненного в виде фотокамеры с приспособлением для протяжки фотобумаги или пленки, и дополнительных устройств для визуального наблюдения за результатами

измерения; отметчика времени; устройства для управления измеряемым процессом; управляющего устройства для фотоленты (привод, регулировка скорости); дистанционного управления; приспособления, предотвращающего неполадки при эксплуатации и неправильную расшифровку осциллограмм (указание записи фотоленты, сигнализация ее движения, нумерация и обозначения осциллограмм).

Успех применения осциллографа для точных измерений помимо правильной настройки оптики зависит в значительной степени от выбора вибраторов и от обработки и анализа осциллограмм.

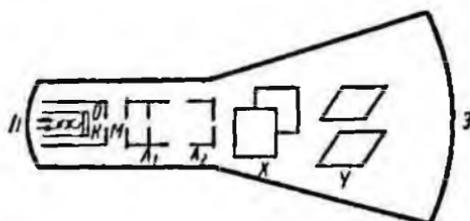


Рис. 3. Схема устройства ЭЛТ.

не ясна и требуется значительная затрата труда, иногда даже дополнительные испытания, чтобы получить правильное истолкование снятой осциллограммы. Однако такие случаи крайне редки.

К недостаткам светолучевых осциллографов следует отнести то, что вследствие инерционности измерительного устройства область их применения ограничена верхним пределом диапазона звуковой частоты. Это ограничение способны преодолеть лишь электроннолучевые осциллографы.

Электроннолучевые осциллографы. Для того чтобы понять работу этих осциллографов, рассмотрим основные физические явления и законы, на основании которых разработаны принципы действия электроннолучевой трубки (ЭЛТ), являющейся основной частью осциллографа.

ЭЛТ представляет собой стеклянную запаянную колбу, внутри которой находится несколько металлических электродов (рис. 3). В узком конце колбы располагаются электронная пушка, устройство для формирования и управления электронным лучом. Электронная пушка включает в себя катод, модулятор и фокусирующее устройство, состоящее из двух электродов, называемых анодами. Катод является источником электронов и представляет собой никелевый электрод *K*, покрытый специальным оксидным слоем *O* с подогревателем *H* из вольфрамовой нити. Модулятор *M*, или цилиндр Венельта (названный по имени его изобретателя), является управляющим электродом. Подавая на него отрицательное по отношению к катоду напряжение и изменяя это напряжение, можно регулировать количество электронов,

пролетающих через отверстие в цилиндре Венельта по направлению к анодам, вплоть до полного прекращения (запирания) электронного потока. Электроды  $A_1$  и  $A_2$ , также имеющие форму цилиндров с отверстиями в дне, называются первым и вторым анодами. Их роль заключается в ускорении движения электронов и фокусировании их на экране трубки (дне колбы) Э. Для того чтобы электроны, пробегая путь от катода до экрана, не сталкивались с молекулами воздуха, в трубке создано разрежение воздуха, или вакуум. С уменьшением давления воздуха до  $10^{-6}$  мм рт. ст. средняя длина пути, пробегаемого электроном без столкновения с молекулами воздуха, увеличивается до сотен метров. Это значит, что при расстоянии между катодом и анодом 30—50 мм столкновения между электронами и молекулами воздуха почти не происходит и луч может распространяться без помех.

Поскольку электронный луч невидим, необходимо окрасить след его движения по экрану электроннолучевой трубки. Для этой цели применяются специальные составы (люминофоры), которыми покрывают экран. Электронный луч, пробегая по такому экрану, на некоторое время вызывает его свечение. Излучение люминофоров содержит световые волны различных длин, т. е. оно имеет определенный спектр и воспринимается глазом как свечение различных оттенков. Для визуального наблюдения явлений, записанных электронным лучом на экране, наиболее удобная окраска — зеленая. Обычным люминофором, используемым для получения зеленого свечения, является так называемый виллемит (ортосиликат цинка). При фотографировании приходится учитывать, что максимальная чувствительность обычной фотоэмульсии находится в области синей части спектра, поэтому экран также должен давать максимум спектрального излучения в синей части спектра. Наиболее распространенным люминофором, удовлетворяющим этому условию, является сульфид цинка с добавкой серебра.

Отклоняющая система электроннолучевой трубки обеспечивает возможность изображать зависимость одной величины от другой в прямоугольной системе координат, наиболее широко распространенной на практике. Электронный луч может быть отклонен как магнитными, так и электрическими полями. При отклонении луча магнитным полем на двух противоположных сторонах горловины трубки помещают две катушки, через которые проходит отклоняющий ток. В осциллографии магнитное отклонение встречается только в особых случаях.

Для отклонения луча электростатическим полем служат отклоняющие пластины, размещенные сразу же за вторым анодом таким образом, чтобы в то время, когда на отклоняющих пластинах нет напряжения, электронный луч проходил между ними. Обе пары пластин располагают одну за другой и ориентируют

так, чтобы отклонение луча этими парами происходило во взаимно перпендикулярных направлениях. Если подавать напряжение, изменяющееся по закону  $y$ , на первую пару пластин, а на вторую пару пластин—напряжение, изменяющееся по известному закону  $x$ , то движение луча по экрану опишется зависимостью  $y=f(x)$ . По аналогии с прямоугольной системой координат пластины первой пары вызывают отклонение луча по вертикали (по оси  $Y$ —ординате) и называются вертикально отклоняющими.

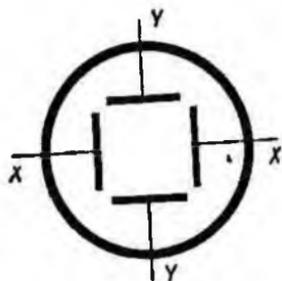


Рис. 4. Схемное обозначение ЭЛТ ( $Y\bar{Y}$  — вертикально отклоняющие пластины;  $X\bar{X}$  — горизонтально отклоняющие пластины).

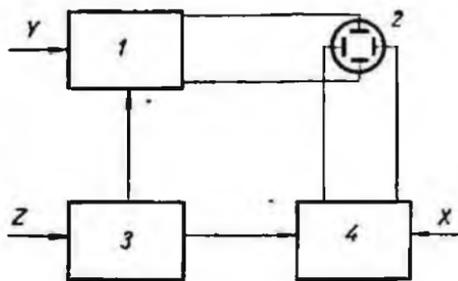


Рис. 5. Блок-схема электроннолучевого осциллографа.

1 —  $Y$ -усилитель; 2 — ЭЛТ; 3 —  $Z$ -блок синхронизации; 4 — генератор развертки и  $X$ -усилитель.

няющими. Пластины второй пары вызывают отклонение луча по горизонтали (по оси  $X$ —абсциссе) и называются горизонтально отклоняющими.

В измерительных схемах с применением ЭЛТ обычно применяются только отклоняющие пластины (рис. 4). Остальные электроды, служащие для регулировки яркости, фокусировки и т. д., в таких схемах не указаны.

Из принципа действия осциллографической трубки следует, что положение электронного луча, а следовательно, и светящегося пятна на экране однозначно определяется напряжением, приложенным к обоим парам отклоняющих пластин. Следовательно, электронный осциллограф по существу представляет собой прибор, реагирующий на напряжение. Такой вывод справедлив лишь для осциллографических трубок с отклонением электронного луча в электростатическом поле, так как в трубках с отклонением электронного луча магнитным полем положение пятна на экране зависит от тока, протекающего через отклоняющие катушки. Однако этот тип электроннолучевых трубок, за чрезвычайно редким исключением, не используется на практике.

Почти полная безынерционность электронного осциллографа (за исключением области самых высоких частот) и незначитель-

ный отбор мощности из измерительной цепи делают этот прибор незаменимым при разнообразных исследованиях.

Кроме основного измерительного устройства—электроннолучевой трубки осциллограф включает в себя блок питания, по крайней мере, один усилитель для вертикального отклонения по оси  $Y$  и блок развертки. Последний чаще всего связан с горизонтальной разверткой по оси  $X$  (рис. 5). Блок питания дает напряжения (переменные и постоянные), необходимые для работы ЭЛТ и вспомогательных блоков, а также высокое напряжение для ЭЛТ.

На этой схеме показано также устройство для синхронизации, разрешающее синхронизировать частоту развертки по выбору: или напряжением от усилителя 4, или подключаемым внешним напряжением, или же напряжением питающей сети. В новых конструкциях приборов всегда имеется возможность управлять срабатыванием развертки—однократным, периодическим или ждущим. При этом скорость развертки может устанавливаться постоянной и не зависящей от периода измеряемого напряжения.

Получение осциллограмм напряжения, с достаточной достоверностью отображающих изучаемый процесс, возможно лишь при условии соблюдения известных мер предосторожности. Так, конечное входное сопротивление электронного осциллографа накладывает известные ограничения на применение данного прибора при осциллографировании напряжения источников с большим внутренним сопротивлением. На практике при исследовании медленных процессов всегда можно достичь правильного соотношения этих сопротивлений, а именно, чтобы входное сопротивление осциллографа было намного больше внутреннего сопротивления источника. Значительно сложнее обстоит дело с быстропеременными процессами. Применение катодного осциллографа при исследовании таких процессов ограничено величиной собственной емкости отклоняющих пластин и подводящих проводов. Величина этой емкости задана для данной конструкции трубки, и единственным способом расширения диапазона применений осциллографа при исследовании кратковременных процессов является уменьшение сопротивления участка той или иной схемы, напряжение на котором должно быть исследовано, так как для правильного воспроизведения формы исследуемого напряжения постоянная времени измерительной цепи (произведение емкости отклоняющих пластин на упомянутое выше сопротивление) должна быть существенно меньше длительности исследуемого процесса.

В тех случаях, когда даже непосредственное подключение измеряемого напряжения к отклоняющим пластинам не удовлетворяет требованиям исследователя вследствие того, что внутреннее сопротивление источника измеряемого напряжения слишком велико и, следовательно, слишком велика постоянная вре-

мени измерительной цепи, к благоприятным результатам может привести включение промежуточного катодного повторителя. Применение такой схемы целесообразно потому, что катодный повторитель может работать при большом входном сопротивлении, выходное сопротивление его достаточно низко. Таким образом, катодный повторитель позволяет исследовать источники быстропеременных напряжений, обладающих большим внутренним сопротивлением, причем отклоняющие пластины осциллографа оказываются присоединенными к достаточно низкому выходному сопротивлению. Кроме того, применение катодного повторителя позволяет в значительной степени устранить вредное влияние емкости, шунтирующей источник исследуемого напряжения.

Таблица 3  
Величины поправок, вносимых при измерениях

L, см	h, см			
	2	4	6	8
20	0,57	2,3	4,9	8,6
40	0,41	1,7	3,5	6,2
80	0,32	1,2	2,8	4,9
100	0,25	1,2	2,6	4,7
200	0,25	1,0	2,3	4,1

Процесс осциллографического исследования не завершается получением на экране осциллографической трубки траектории электронного луча, отображающей с требуемой степенью точности ход исследуемого явления. Для облегчения обмера и обработки осциллограмм, а также для сохранения документального материала, они в большинстве случаев фотографируются. Особенно существенно фотографирование при исследовании однократных быстропеременных сигналов. Этот завершающий этап осциллографического исследования должен быть выполнен с предельной тщательностью, чтобы в процессе фотографирования не возросла погрешность измерения. Дело в том, что при фотографировании с экрана осциллографической трубки возникают искажения, учет которых имеет некоторый смысл при точном обмере снимком осциллограмм. Эти искажения обусловлены тем, что фотографирование всегда производится с кривой поверхности экрана на плоскую поверхность фотопластинок или пленок. Учет необходимой поправки может быть выполнен на основании несложных геометрических построений. Порядок поправки может быть оценен с помощью табл. 3. В ней указаны вычисленные ве-

личины поправки в процентах, которые надлежит прибавлять к измеренному на снимке значению отклонения при различных расстояниях  $L$  от объектива до экрана и различных отклонениях  $h$ . Таблица дана для трубки с радиусом кривизны экрана, равным 30 см.

Для исследования однократных процессов во времени наиболее целесообразно применение однократных (ждуших) временных разверток. При фотографической регистрации однократных процессов яркость пятна на экране осциллографической трубки имеет решающее значение. Она должна быть такой, чтобы на данном негативном материале исследуемый процесс вызывал достаточное почернение. Это почернение при данных условиях съемки зависит от скорости, с которой светящееся пятно перемещается по экрану трубки. Необходимо учитывать, что предельно высокие скорости записи могут быть получены, когда спектральный состав свечения экрана осциллографа соответствует спектральной чувствительности фотопластинок или пленок. Скорость записи тем выше, чем выше чувствительность пленок, соответствующая спектральному составу свечения экрана. Кроме того, важна не только геометрическая светосила объектива, но и качество его изготовления, количество отражающих поверхностей, степень его исправности и т. д. Наконец, процесс проявления и фиксирования существенно влияет на повышение контраста, а следовательно, на повышение скорости записи.

Измерить скорость записи легко при фотографировании синусоидального колебания, развернутого однократно. Наибольшая скорость записи имеет место в точках перехода осциллограммы через нулевую линию:

$$v_{\max} = A\omega \cdot 10^{-6}, \quad (I.1)$$

где  $v_{\max}$ —максимальная скорость записи синусоидального колебания, км/сек;  $A$ —амплитуда синусоидального колебания, мм;  $\omega$ —круговая частота, гц.

Фотографирование осциллограмм однократных процессов при необходимости наблюдения за сравнительно быстрыми и нерегулярными изменениями в течение длительного промежутка времени может осуществляться также путем съемки их на движущийся негативный материал. Для этого целесообразно применять трубки с коротким послесвечением экрана. В противном случае будет сфотографировано и послесвечение экрана, и на осциллограмме появится тянучка (размыв).

Простейшим методом фотографирования осциллограмм на движущийся негативный материал является качание, или «простреливание» фотопластинок в фокальной плоскости объектива. Для простреливания пластинок предложен ряд конструкций, в которых кассета помещается на подвижных салазках. Эти салазки натягивают пружину, освобождаемую с помощью того или

нного спускового устройства. При этом салазки начинают перемещаться с довольно большой скоростью перед щелью, на которую падает свет через объектив. Одновременно замыкается контакт для синхронизации исследуемого явления.

В барабанных камерах светочувствительная бумага или пленка накладывается на барабан, вращающийся вокруг оси, расположенной параллельно оси явления. Скорость движения пленки  $v_L$  (м/сек) определяется диаметром  $D$  (мм) барабана и скоростью его вращения  $n$  ( $\frac{1}{\text{мин}}$ ):

$$v_L = \frac{\pi D n}{6 \cdot 10^4} \quad (1.2)$$

Существуют конструкции барабанных камер, в которых скорость достигает 100 м/сек при диаметре 200 мм. Скорость вращения барабана обычно контролируется механическими или электрическими тахометрами. Кроме того, барабанные камеры снабжены специальным затвором, открывающимся на время, равное продолжительности одного оборота барабана. Нередко в конструкции таких затворов предусмотрена синхронизация момента открытия затвора с таким положением барабана относительно луча осциллографа, при котором в этот момент освещается как раз место стыка пленки.

В камерах с движущейся пленкой последняя протягивается с постоянной скоростью в фокальной плоскости объектива. В таких камерах не удастся достичь скоростей развертки, которые возможны в камерах барабанного типа. Однако они имеют серьезные преимущества в тех случаях, когда осциллографические исследования проводятся в течение длительного периода времени, так как длина пленки может быть выбрана весьма большой. Это невозможно в барабанных камерах вследствие ограниченности диаметра барабана.

При фотографировании камерами с движущимся негативным материалом в подавляющем большинстве случаев используется только отклонение луча в направлении оси явления (ось  $Y$ ). При этом работает лишь незначительная часть экрана, что приводит к его быстрому «утомлению» и выгоранию. С целью предохранения экрана рекомендуется применять такие схемы, которые позволяют отпирать электронный луч осциллографической трубки лишь на время экспозиции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бибер Л. А. и Элькин Д. Ю. М. — Электричество, 1958, 10.
2. Бибер Л. А. — Электричество, 1960, 3.
3. Борисевич Е. С. — Приборостроение, 1956, 10.

4. Борисевич Е. С. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, 3.
5. Борисевич Е. С. — Изв. АН СССР, серия геофиз., 1957, 4.
6. Борисевич Е. С. — Приборостроение, 1960, 2.
7. Бурьянов Б. П. Магнитоэлектрический осциллограф. Госэнергоиздат, М., 1952.
8. Виженчук И. М. и др. Электроннолучевой осциллограф и его применение в измерительной технике. Гостеориздат, М., 1957.
9. Высокоскоростная кинофотосъемка в науке и технике. Сб. переводов статей под редакцией П. Г. Тагера. ИЛ, М., 1955.
10. Горбачев В. М., Уваров Н. А., Усенко Л. Д. — ПТЭ, 1961, 3.
11. Кудряшов Н. Н. Киносъемка в науке и технике. «Искусство», М., 1960.
12. Лаврентьев В. И., Пель В. Г. Скоростная киносъемка камерой СКС-1. «Искусство», М., 1963.
13. Мильштейн В. Н. Энергетические соотношения в электронизмерительных приборах. Госэнергоиздат, М., 1960.
14. Сахаров А. А. Высокоскоростная киносъемка. Госкиноиздат, М., 1950.
15. Светолучевые осциллографы. Физические основы, конструкция, метрологические свойства, практическое применение. «Энергия», М., 1965.
16. Соболевский А. Г. Электроннолучевой осциллограф. Госэнергоиздат, М., 1959.
17. Современный катодный осциллограф. Сборник статей, ч. I. ИЛ, М., 1951.
18. Современный катодный осциллограф. Сборник статей, ч. II. ИЛ, М., 1953.
19. Стекольников И. С. Импульсная осциллография и ее применение. Изд-во АН СССР, М., 1949.
20. Стекольников И. С. Электронная осциллография кратковременных процессов. Госиздат, М., 1952.
21. Успехи научной фотографии, т. VI. Труды совещания по высокоскоростной фотографии и кинематографии. Изд-во АН СССР, М., 1959.
22. Харченко Р. Р. — Приборостроение, 1959, 4.
23. Харченко Р. Р. — Электричество, 1954, 6.
24. Черный И. А. — Оптико-механическая промышленность, 1957, 3.
25. Чех И. Осциллографы в измерительной технике. Конструкция и применение современных электроннолучевых осциллографов. «Энергия», М., 1965.

Термодинамические вопросы, возникающие при расчете скорости детонации твердых ВВ, весьма сложны. Благодаря работам Л. Д. Ландау и К. П. Станюковича в решении этих вопросов достигнуты существенные результаты. Л. Д. Ландау и К. П. Станюкович впервые уподобили состояние продуктов детонации конденсированного ВВ кристаллической решетке твердого тела. Они показали, что в продуктах взрыва конденсированных ВВ при плотности, превышающей  $1 \text{ г/см}^3$ , основной частью давления является упругое давление, зависящее только от плотности продуктов взрыва, но не от их температуры. Однако и после указанных работ мы не вычисляем скорость детонации из независимых данных, а лишь используем измеренную скорость детонации для получения сведений о состоянии продуктов взрыва при высоких давлениях.

Зная уравнение состояния продуктов взрыва, можно решить ряд задач о их движении во время и после детонации заряда. Эти задачи постепенно подводят нас к теоретическому расчету механического разрушительного действия ВВ.

Минимальное нижнее и особенно максимальное верхнее значения скорости детонации являются характерными ее пределами для определенного типа ВВ данной плотности. Скорость детонации достигает максимального значения только тогда, когда превращение ВВ в зоне реакции совершается полно и без потерь энергии вследствие преждевременного разброса. На полноту превращения ВВ влияет целый ряд факторов: природа ВВ, его плотность, степень дисперсности, диаметр заряда, прочность и вид оболочки, величина начального импульса.

Детонирующие ВВ промышленного назначения разделяются на два основных типа—нитроглицериновые и аммиачноселитренные. Наряду с применением химических веществ, содержащих кислород и горючее в одной молекуле, применяют также механические смеси различных веществ. Подбирая различным образом компоненты ВВ и улучшая кислородный баланс, можно получить ВВ с максимальной мощностью. Содержание кислорода при этом должно быть достаточным, чтобы окислить практически весь углерод и водород до углекислого газа и воды, которая при таких высоких температурах находится в виде пара. Связанный

азот, входящий в состав нитрогрупп, при взрыве выделяется в виде свободного азота, внося свой вклад в окончательный объем газообразных продуктов детонации. Избыток кислорода в ВВ нежелателен, так как приводит к потере мощности и образованию вредных окислов азота. Недостаток кислорода уменьшает возможный объем газов и приводит к таким отрицательным явлениям, как образование окиси углерода.

Для большинства ВВ существует оптимальная плотность, при которой его детонация проходит наиболее полно и устойчиво. Оптимальная плотность имеет верхний и нижний пределы, за которыми детонация проходит неустойчиво или совсем затухает. При этом замечено, что с увеличением плотности (в пределах устойчивого распространения детонации) скорость детонации существенно возрастает.

На практике высокая скорость детонации достигается приготовлением гомогенной смеси из тонкоизмельченных компонентов. Чем тоньше измельчены компоненты, тем легче они вступают в реакцию друг с другом и тем больше общая поверхность, по которой идет реакция в любой момент времени. Данный фактор существенно повышает восприимчивость ВВ к детонации.

Способность ВВ к детонации зависит от условий его применения. В заряде ВВ, имеющем форму длинного цилиндра, детонация неограниченно распространяется вдоль цилиндра лишь в том случае, если его диаметр больше так называемого критического диаметра заряда; при меньшем диаметре детонация затухает.

Ю. Б. Харитон наиболее просто и наглядно сформулировал условие возможности распространения детонации: время химической реакции ВВ должно быть меньше времени разлета продуктов детонации. Время разлета равно  $d/c$ , где  $d$ —диаметр заряда,  $c$ —скорость звука. Таким образом, условие возможности детонации имеет вид  $\frac{d}{c} > \tau$ , а для критического диаметра  $d_{кр} = c\tau$ .

Эта формулировка не претендует на количественную строгость. В формулах могут содержаться безразмерные множители, зависящие от теплоты активации реакции, величина которых в несколько раз больше или меньше единицы.

Детонацию зарядов промышленных ВВ возбуждают с помощью вспомогательного инициирующего заряда, чувствительно к капсулю-детонатору. Возбуждающая способность инициирующих веществ по отношению к одному и тому же ВВ не одинакова. Чем больше скорость детонации этого вещества и меньше период ускорения взрыва (т. е. время нарастания скорости процесса до номинальной величины), тем больше его возбуждающая способность.

Из изложенного выше ясно, что скорость детонации зависит от множества факторов. Поэтому при проведении экспериментов необходимо строго их учитывать, а при выяснении влияния какого-либо из этих факторов на скорость детонации необходимо соблюдать условия идентичности, т. е. сохранения постоянства всех остальных факторов.

Все методы измерения скорости волн можно разделить на две группы в зависимости от того, измеряется ли средняя скорость на данном участке заряда или осуществляется непрерывное измерение скорости в процессе распространения детонации по заряду.

Средняя скорость волны на определенных участках заряда измеряется путем регистрации тех моментов времени, в которые фронт волны проходит мимо соответствующих датчиков, расположенных в заряде. Обычно эти датчики представляют собой простые, но достаточно чувствительные устройства, которые очень быстро реагируют на приход фронта детонационной волны, вырабатывая при этом электрический сигнал. Интервал времени, соответствующий расстоянию между сигналами соседних датчиков (импульсами напряжения), поступающими от двух или больше датчиков, можно измерить либо с помощью электронного хронографа, либо с помощью осциллографа. Каждый из этих методов позволяет проводить измерение интервалов времени с точностью до 0,1 мксек и даже точнее.

Существенные преимущества перед этими методами регистрации скорости детонации взрывчатых веществ имеют методы непрерывной ее записи. Эти преимущества состоят в том, что явления регистрируются безынерционно и не вносятся ошибки, связанные с наличием датчиков. Запись ведется непрерывно и можно определять не средние, а истинные значения скорости процесса. Непрерывная регистрация скоростей детонации основана на использовании физических явлений, сопровождающих взрыв. Во вторую группу указанных методов входят оптические методы, которые осуществляются разветкой световых явлений, возникающих при их распространении. В тех случаях, когда нельзя применить оптические методы, применяются специальные датчики сопротивления. В этих случаях изменение сопротивления датчика осуществляется переключением ионизационным промежутком при прохождении фронта детонационной волны. Интересен метод непрерывной регистрации скорости детонации, который основан на отражении микроволн, посылаемых передатчиком от фронта детонационной волны. В этом методе используется эффект Доплера.

В методах второй группы применяется более совершенная аппаратура. Она сложнее и, естественно, дороже применяемой в методах первой группы.

## 1. Измерение интервалов времени электронными хронографами

Простейшим измерителем времени является прибор, в котором за измеряемый интервал времени происходит зарядка или разряд емкости через эталонное сопротивление. Принцип работы его можно проиллюстрировать схемой, приведенной на рис. 6. До начала измерения переключатель находится в положении 1 и конденсатор  $C$  заряжается до потенциала батареи  $U$ . В момент начала измеряемого интервала переключатель  $\Pi$  ставят в поло-

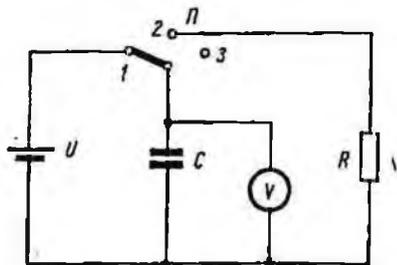


Рис. 6. Схема для измерения интервалов времени по показаниям вольтметра.

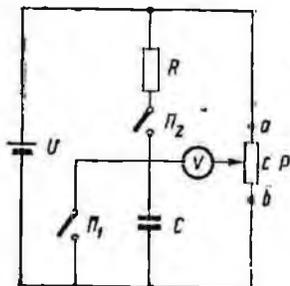


Рис. 7. Схема  $RC$  для измерения интервалов времени с потенциометром.

жение 2, и конденсатор разряжается через сопротивление  $R$ . В конце интервала переключатель переводят в положение 3, и конденсатор отключается. Напряжение на конденсаторе после переключения в положение 2 определяется из выражения

$$u = Ue^{-\frac{t}{RC}} \quad (\text{II.1})$$

Если напряжение на конденсаторе измерено в положениях 1 и 3, то время, в течение которого переключатель находится в положении 2, будет

$$T = -RC \ln \frac{u_2}{U}. \quad (\text{II.2})$$

При этом считается, что в случае применения высокоомных (ламповых или электростатических) приборов вольтметр не разряжает конденсатора.

Этот простой принцип в несколько измененном виде был применен в приборе для измерения интервалов времени (рис. 7). Напряжение на конденсаторе не измеряется, а сравнивается с положением движка потенциометра, включенного на ту же батарею, что и цепь  $RC$ . Перед началом измерения переключатели

$\Pi_1$  и  $\Pi_2$  замкнуты. Измерение начинается при размыкании переключателя  $\Pi_1$  и оканчивается при размыкании переключателя  $\Pi_2$ . Движок потенциометра  $P$  устанавливается в положение, при котором вольтметр показывает ноль. В этой схеме конденсатор при измерении заряжается, а не разряжается, и для определения неизвестного времени следует пользоваться зависимостью

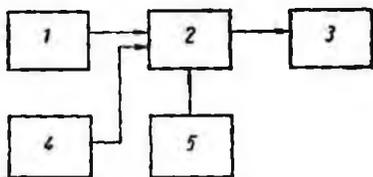


Рис. 8. Блок-схема электронного хронографа:

1 — схема пуска; 2 — счетчик импульсов; 3 — цифровой индикатор; 4 — схема останова; 5 — кварцевый генератор.

$$T = -RC \ln \left( 1 - \frac{u}{U} \right). \quad (II.3)$$

При линейном потенциометре уравнение можно представить в виде

$$\begin{aligned} T &= -RC \ln \left( 1 - \frac{cb}{ab} \right) = \\ &= -RC \ln \frac{ac}{ab}, \quad (II.4) \end{aligned}$$

где  $ac$  — часть сопротивления потенциометра  $P$ ;  $ab$  — полное сопротивление потенциометра  $P$ .

Главный источник ошибок при этом методе — неточность и нестабильность величин  $R$  и  $C$ , утечка заряда конденсатора. Для интервала времени 200—1750 мсек ошибки измерения не превышают  $\pm 0,6\%$ .

Для получения линейной шкалы вместо логарифмической поддерживают постоянным ток при зарядке конденсатора с помощью пентода. Прибор подобного устройства имеет погрешность приблизительно  $\pm 2\%$  в интервале времени 500—100 000 мксек.

Основным преимуществом этого метода являются простота аппаратуры и быстрота измерения, в то время как при осциллографических методах необходимо проявление пленки и ее расшифровка.

Прибором для измерения интервалов времени является также электронный хронограф. Блок-схема прибора представлена на рис. 8. Электронный хронограф представляет собой очень точные часы (секундомер), которые запускаются и останавливаются сигналами, поступающими от смежных датчиков. В интервале времени между этими импульсами хронограф считает число колебаний очень стабильного кварцевого генератора и показывает это время непосредственно в численном виде. Точность такого хронографа составляет  $\pm 1$  период колебаний. Таким образом, хронограф с кристаллом, генерирующим частоту 1 Мгц, будет измерять интервалы с точностью до  $\pm 1$  мксек, а хронограф с частотой колебаний кристалла 10 Мгц будет давать погрешность  $\pm 0,1$  мксек. Если скорость ударной волны измеряется на двух смежных участках с применением трех датчиков,

то потребуется только два хронографа, так как центральный датчик может быть использован для остановки первого хронографа и запуска второго.

Существуют хронографы различных типов; изготовители определяют минимальную амплитуду и требуемую крутизну фронта запускающих и останавливающих сигналов. Первичные сигналы от датчиков должны быть усилены и сформированы в соответствии с этими требованиями.

## 2. Датчики для измерения скорости движения фронта детонационной волны

Средняя скорость детонационной волны на определенных участках заряда измеряется путем регистрации тех моментов времени, когда фронт волны проходит мимо соответствующих датчиков, расположенных в заряде. Действие этих датчиков основано на физических явлениях, которые происходят во фронте детонационной волны: резкого изменения давления, электропроводности и светового излучения. Эти явления вызывают соответствующие изменения некоторых физических характеристик датчика, который вырабатывает электрический сигнал.

К простейшим типам датчиков, реагирующих на изменение давления, относятся мембранные датчики. Как правило, в таких датчиках используется подвижная мембрана, которая может перемещаться под действием давления, в результате чего на выходе датчиков появляется электрический сигнал вследствие изменения либо сопротивления, либо емкости, либо индуктивности, либо пьезоэлектрического эффекта. Каждый такой датчик при изменении давления во фронте детонационной волны выдает сигнал электрического напряжения, которое после соответствующего дифференцирования и усиления подает на одну из схем регистрации интервалов времени. При этом можно использовать сигналы от двух или более датчиков, расположенных вдоль заряда.

Другим типом датчиков, реагирующих на изменение давления, являются датчики, чувствительные элементы которых изменяют физические свойства. К ним относятся пьезоэлектрические, магнестрикционные и ионизационные. Пьезоэлектрические датчики по сравнению с другими датчиками давления обладают самой высокой чувствительностью и наименьшей инерционностью. Однако в ряде случаев эти относительно дорогие датчики могут быть заменены другими, более дешевыми.

При использовании датчиков следует обращать внимание на их крепление в заряде, так как они, как правило, весьма чувствительны к звуковым волнам, распространяющимся в стенках трубы, в которой обычно помещается заряд. Скорость звука в

трубе может быть больше скорости распространения детонации по заряду и, таким образом, могут возникнуть ложные сигналы до прихода фронта волны детонации к местоположению датчика.

В основе методов регистрации фронта волны с применением датчиков давления лежит механическая деформация, приводящая к возникновению электрического сигнала. Таким образом, разрешающая способность датчиков во времени в конечном счете определяется собственной частотой колебаний регистрирующей системы. Поскольку эта частота обычно низка, такие колебания становятся основным источником ограничения точности регистрации положения фронта детонационной волны.

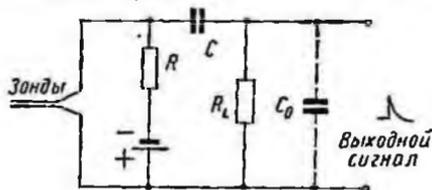


Рис. 9. Схема включения ионизационного датчика.

Резкое возрастание электропроводности продуктов детонации, наблюдаемое во фронте детонационной волны, также может быть использовано для регистрации фронта волны. Типичный ионизационный датчик представляет собой два электрода—зонда, помещенных во взрывчатое вещество (рис. 9).

Емкость  $C$  заряжается до отрицательного потенциала, приложенного к двум изолированным зондам. Проходящий мимо датчика фронт детонационной волны вызывает разряд конденсатора через зонды, в результате чего на нагрузочном сопротивлении  $R_L$  образуется положительный импульс напряжения.

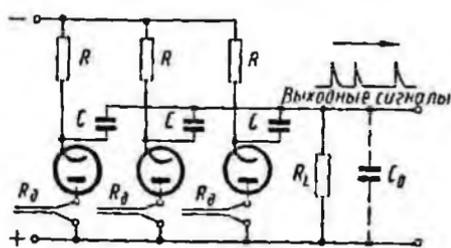


Рис. 10. Схема включения нескольких ионизационных датчиков.

Величина зарядного сопротивления  $R$  должна быть настолько большой, чтобы в течение остального времени движения продуктов взрыва мимо датчика, когда степень ионизации возрастает до максимальной величины, конденсатор оставался не заряженным. Выходной сигнал ионизационного датчика дифференцируется  $R_L C$ -цепочкой. Время нарастания импульса определяется скоростью разряда емкости  $C$  через разрядный промежуток. Несколько таких датчиков можно соединить параллельно. Схема такого соединения приведена на рис. 10.

Достоинство ионизационных датчиков в высокой разрешающей способности, надежной конструкции, низкой стоимости и простоте изготовления, а также в том, что на их работу не влияют колебания стенок трубы.

Фронт детонационной волны светится, поэтому излучение может быть использовано для регистрации моментов прохождения фронта волны. Для этого применяется оптическая система малой апертуры и фотоэлемент (рис. 11) или фотоумножитель.

В простейшем случае используется оптическая система, с помощью которой узкий пучок света проецируется объективом на фотоэлемент. Оптическая ось системы перпендикулярна к оси

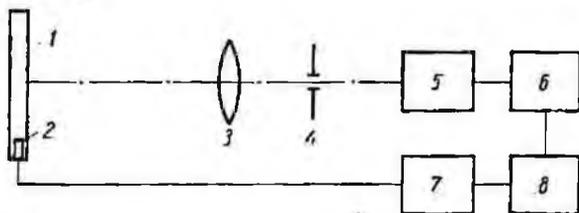


Рис. 11. Регистрация фронта детонационной волны с помощью фотоэлемента:

1 — заряд ВВ; 2 — электродетонатор; 3 — объектив; 4 — щель; 5 — фотоэлемент; 6 — регистрирующий прибор; 7 — блок подрыва; 8 — блок синхронизации.

заряда и, следовательно, параллельна фронту детонационной волны. Временное разрешение системы может быть равно 1 мксек, если изображение щели достаточно узкое и яркое, а регистрирующая система имеет соответствующую полосу пропускания. В этих условиях общее временное разрешение системы определяется постоянной времени, которая равна произведению сопротивления нагрузки  $R_L$  на величину шунтирующей емкости  $C_0$ , состоящей из суммы выходной емкости фотоэлемента и входной емкости последующей цепи измерителя времени.

Почти во всех описанных методах регистрации детонационной волны минимальный полезный сигнал датчика без учета флуктуаций в потоке продуктов детонации ВВ равен шуму на внутреннем сопротивлении источника. Этот шум обусловлен беспорядочным тепловым движением электронов в сопротивлении; средняя квадратичная величина его на выходе датчика будет

$$V = \sqrt{4kTR\Delta f}, \quad (11.5)$$

где  $k$  — постоянная Больцмана,  $\text{дж/град}$ ;  $T$  — абсолютная температура,  $^{\circ}\text{K}$ ;  $R$  — активная составляющая эффективного выходного импеданса датчика,  $\text{ом}$ ;  $\Delta f$  — величина, обратная времени разрешения датчика,  $\text{сек}^{-1}$ . В величину  $R$  входит сопротивление самого чувствительного элемента  $R_g$ , включенного параллельно с сопротивлением нагрузки  $R_L$ , с которого снимается сигнал. Поэтому она зависит от относительных значений  $R_g$  и  $R_L$ .

Следует заметить, что в фотоэлектрических датчиках уровень шумов возрастает в тот момент, когда свет попадает на фотокатод, однако амплитуда выходного сигнала в этом случае оказывается значительно больше уровня шумов. Уровень шумов ионизационных датчиков в случае сильной ионизации газов может уменьшиться, так как  $R_g$  может стать значительно меньше  $R_L$ .

Для обеспечения малого времени нарастания импульса должна быть достаточно широкой полоса пропускания; она определяется обратной величиной заданного времени разрешения. В любом случае разрешение во времени зависит от скорости заряда конденсатора  $C$  через сопротивление  $R$ , так что  $\Delta f = 1/RC$ . Если величина  $RC$  меньше действительного времени измерения физических величин, то величина  $\Delta f$  будет слишком велика, и чувствительность датчика уменьшится вследствие возрастания уровня шумов с увеличением  $\Delta f$ . Таким образом, существует оптимальное значение  $\Delta f$ , которое обычно принимают равным утроенному значению величины, обратной желаемому времени разрешения. Следовательно, для того чтобы зарегистрировать нарастание импульса, равное 1 мксек, необходимо иметь полосу пропускания системы в 3 Мгц. Для этого постоянная времени  $RC$  не должна превышать  $3 \cdot 10^{-7}$  сек.

Почти в каждом случае сопротивление  $R$  по величине примерно равно сопротивлению нагрузки  $R_L$ , а емкость  $C$  — шунтирующей его емкости  $C_0$ , состоящей из паразитной емкости датчика, еще большей и параллельной ей емкости кабелей, соединяющих датчик с регистрирующей аппаратурой, и входной емкости самой аппаратуры. Если эти емкости оказываются чрезмерно большими, то для исключения влияния двух последних емкостей сразу же после сопротивления нагрузки можно использовать катодный повторитель. Катодный повторитель имеет низкую входную емкость и низкий выходной импеданс, так что эффективная величина  $R$  не будет превосходить нескольких сотен ом. Схема катодного повторителя описана в любом учебнике по электронике.

Для работы со схемами измерения необходимо повысить амплитуду полученных сигналов до нескольких вольт. Полоса пропускания любой применяемой для этого усилительной системы не должна быть меньше заданной величины  $\Delta f$ . Используемые при этом сигналы в основном импульсные, поэтому выходное напряжение датчика можно продифференцировать на обычной  $RC$ -цепочке; еще лучше использовать импульсный трансформатор в усилителе, расположенном перед регистрирующей системой. Если для работы регистрирующей системы требуются положительные импульсы напряжения, то выходной сигнал фотоэлектрического и ионного датчиков должен быть подан на фазоинвертор.

В некоторых случаях выходной импульс усиливается не обычными, а тиратронными усилителями. Однако использование тиратронов для самых точных измерений интервалов времени нежелательно из-за присущего им разброса во времени срабатывания.

### 3. Методика измерения скорости детонации с помощью электроннолучевого осциллографа

Измерение скорости детонации с помощью осциллографа сводится к измерению времени прохождения детонационной волны через две или более фиксированные точки, в которых установлены датчики (рис. 12).

Основная трудность проведения экспериментов с ВВ заключается в необходимости укрытия регистрирующей аппаратуры и исследователя в безопасном месте. Это особенно важно при проведении измерений скорости детонации скважинных зарядов, а также при исследовании детонации больших зарядов гранулированных ВВ. Вследствие быстротечности процесса к осциллографу как регистрирующему прибору предъявляются следующие требования: возможность ждущего режима работы; блокировка однократного запуска развертки, исключающая возможность ложного срабатывания; возможность фотографирования процесса с экрана при длительных выдержках. Этим требованиям удовлетворяют осциллографы С1-24 (ОК-17М) и С1-29.

В осциллографе С1-24 (рис. 13) применена двухлучевая осциллографическая трубка типа 18ЛО47А, имеющая люминофор синего свечения. Диаметр рабочей части экрана 125 мм.

Развертка по оси времени—однократная. Длительность развертки регулируется плавно в пределах четырех диапазонов от 3 до 2000 мксек.

Пуск схемы (открытие луча и начало развертки) осуществляется либо от специального пускового сигнала (независимый пуск), либо от исследуемого сигнала, подаваемого на вход пер-

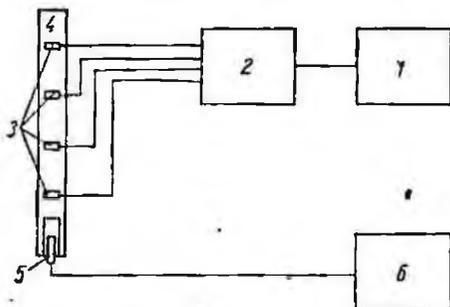


Рис. 12. Схема измерения скорости детонации с помощью осциллографа;

1 — осциллограф; 2 — блок формирования электрических импульсов; 3 — датчики; 4 — заряд ВВ; 5 — электродетонатор; 6 — блок подрыва электродетонатора.

вого усилителя (автопуск). В первом случае пусковой сигнал величиной не менее  $+10$  в подается на пусковой вход осциллографа. При пусковом сигнале  $+50$  в время срабатывания схемы пуска не более  $1$  мксек. Во втором случае развертка включается при величине исследуемого сигнала, вызывающего одностороннее отклонение луча на  $5$  мм. Время срабатывания развертки луча от сигнала, вызывающего отклонение луча  $10-15$  мм, не более  $0,6$  мксек.

Осциллограф имеет откидную фотоприставку, позволяющую фотографировать с экрана в незатемненном помещении. На фотоприставке установлен фотоаппарат типа «Зоркий» с объективом светосилой  $1:1,5$ . Затвор фотоаппарата открывается с помощью электромагнита, на который подается постоянное напряжение  $24$  в.

Яркость луча осциллографа достаточна для фотографирования кривых, при которых скорость луча достигает  $200$  км/сек.

Однолучевой осциллограф С1-29 (рис. 14) предназначен для исследования периодических и однократных процессов методом запоминания путем последующего визуального наблюдения и фотографирования. Основные технические данные осциллографа следующие:

Длительность калиброванных разверток в осциллографе имеет 18 фиксированных значений:  $1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$  мксек и  $1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500$  мсек на  $1$  см отклонения по оси  $X$ . Погрешность измерения временных интервалов в диапазоне  $4$  мксек— $4$  сек не превышает  $\pm 10\%$ .

Запуск развертки луча осуществляется импульсами любой полярности с временем нарастания от  $0,2$  до  $100$  мксек и длительностью не менее  $1$  мксек, с частотой следования от однократных посылок до  $1$  кГц. В режиме однократного запуска с ручным стиранием обеспечивается блокировка от повторного запуска.

Фотографирование записанных процессов с экрана индикатора обеспечивается при использовании фототубуса и фотоаппарата «Зенит С» с объективом типа «Гелиос 44». Осциллограф позволяет хранить записанный сигнал при обесточенном состоянии прибора  $16$  ч.

При измерении скорости детонации скважинных зарядов возникает необходимость осуществления нижнего иницирования (у забоя скважины), так как измерительные провода от датчиков можно вывести только через устье скважины. Для иницирования снизу необходимо помещение в скважину электродетонатора. При этом необходимо строжайшее соблюдение единых правил техники безопасности при производстве взрывных работ.

Синхронизация запуска развертки осциллографа с моментом подрыва осуществляется следующим образом. Датчик, устанавливаемый непосредственно у инициатора, является запускающим, т. е. подключается ко входу внешнего запуска развертки осцил-

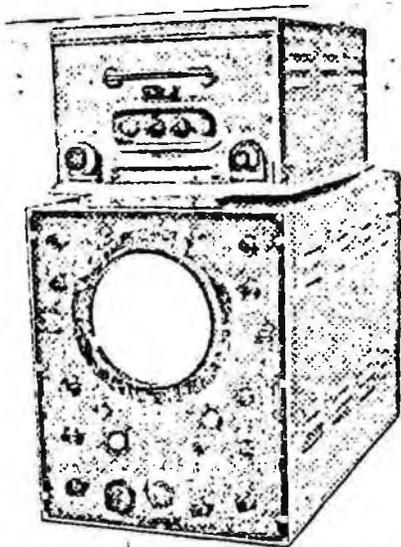


Рис. 13. Общий вид осциллографа C1-24 (OK-17M).

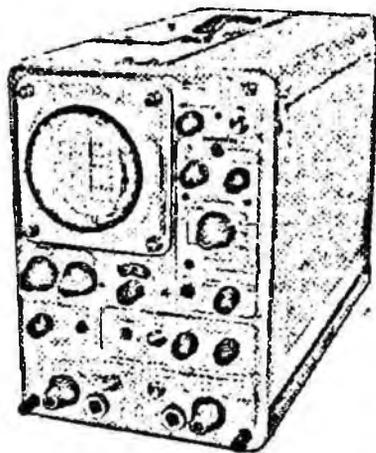


Рис. 14. Общий вид осциллографа C1-29.

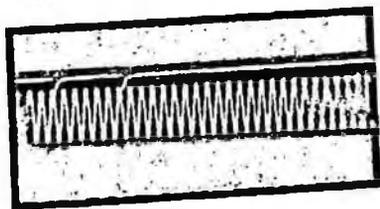


Рис. 15. Типичная осциллограмма скорости детонации.

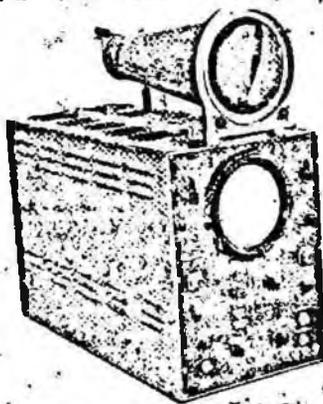


Рис. 16. Общий вид измерителя времени ИЗ-2А (ИВ-13М).

логафа. Последующие датчики через коммутирующее устройство подключены либо через усилитель, либо непосредственно на вертикально отклоняющие пластины. Типичная осциллограмма скорости детонации приведена на рис. 15.

Для увеличения точности измерения необходимо применять осциллографы со спиральной разверткой луча. Таким прибором

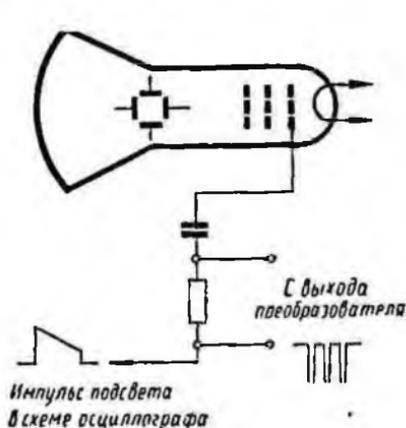


Рис. 17. Схема подачи гасящего импульса на управляющий электрод электроннолучевой трубки осциллографа.

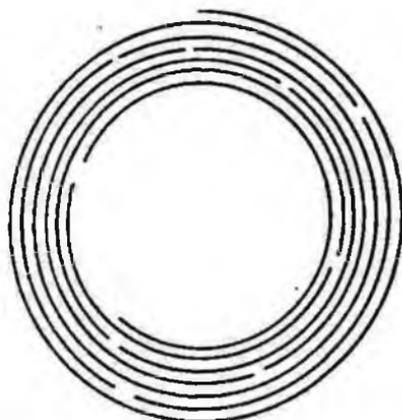


Рис. 18. Типичная осциллограмма измерения скорости детонации.

является осциллографический измеритель времени И2-2А (ИВ-13М) (рис. 16).

Прибор предназначен для измерения интервалов времени между двумя электрическими импульсами, которые подаются на его два отдельных входа, и должен удовлетворять следующим требованиям.

Амплитуда сигналов должна быть не менее 3,5 в. Полярность сигналов может быть любой, но заранее известной. Измеряемые интервалы времени могут находиться в пределах от нескольких десятых долей микросекунды до 250—300 мксек. Точность измерения  $\pm 0,1$  мксек при условии, что исследуемые сигналы имеют фронты (длительностью менее 0,05 мксек).

В качестве индикатора в приборе применена осциллографическая трубка типа 13ЛО37А с люминофором синего свечения. Рабочий диаметр трубки 100 мм. Регистрация времени производится с помощью фотоаппарата «Зоркий», снабженного объективом светосилой 1:1,5. Фотоаппарат установлен на откидном тубусе, позволяющем фотографировать в незатемненном помещении. Затвор фотоаппарата может закрываться с помощью электромагнита.

Существенным недостатком данного прибора является то, что скорость детонации может измеряться лишь на одном участке. Это значительно сужает область его применения. Однако указанный недостаток легко устраняется при незначительном изменении схемы прибора и применении специальной схемы преобразователя импульсов от датчиков. Преобразователь можно выполнить на любое число датчиков. Импульс, возникающий на первом выходе преобразователя при срабатывании первого датчика, запускает развертку осциллографа. Импульсы со второго выхода при срабатывании последующих датчиков подаются на управляющий электрод электроннолучевой трубки (рис. 17) и вызывают кратковременное гашение луча. Импульс при срабатывании последнего датчика останавливает развертку. Таким путем можно измерить скорость детонации на нескольких участках. Типичная осциллограмма показана на рис. 18, где четко видны разрывы спиральной развертки при срабатывании соответствующих датчиков. Промежутки времени между срабатываниями датчиков соответствуют времени движения фронта детонационной волны от датчика к датчику. Зная расстояние между датчиками, можно легко найти среднее значение скорости детонации на соответствующих участках.

#### 4. Оптические методы определения скорости детонации

В настоящее время оптические методы нашли широкое применение для исследования скоростей процессов, протекающих при взрыве и сопутствующих взрыву и детонации. Кривая путь—время, дифференцированием которой получают данные о скоростях процессов, образуется при движении фотопленки или при развертке свечения вращающимся зеркалом. Для этой же цели можно использовать электроннооптические преобразователи (ЭОП).

Известны два типа фоторегистров с движущейся пленкой: барабанный и дисковый. В барабанных пленка или светочувствительная бумага располагается по внешней или внутренней поверхности вращающегося барабана; в дисковых пленка располагается на поверхности вращающегося диска.

Схема барабанного фоторегистра и принцип образования кривой путь—время показаны на рис. 19. Основными частями фоторегистра являются барабан 3 и объектив 2. Барабан приводится во вращение мотором. Число оборотов барабана измеряется различными методами. Фотопленка или фотобумага крепятся на наружной поверхности барабана.

Кривая путь—время образуется следующим образом. Пусть детонационная волна прошла по заряду  $l$  к данному моменту времени участок  $AB$ . Для простоты предположим, что фронт детонационной волны представляет собой светящуюся точку. Если пленка  $4$  неподвижна, то при детонации заряда эта светящаяся точка прочертит на пленке прямую  $A'B''$  параллельно образующей линии. На пленке прочертится некоторая кривая  $A'B'C'$ . В частном случае, когда  $v = \text{const}$  и скорость процесса взрывно-

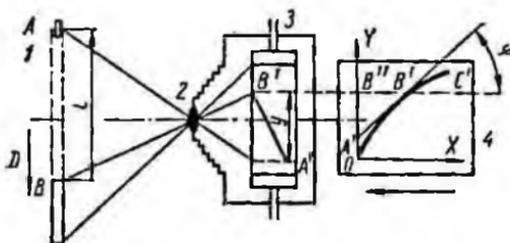


Рис. 19. Схема барабанного фоторегистра.

го превращения  $D = \text{const}$ ,  $A'B'C'$  будет прямой линией. Кривая  $A'B'C'$  представляет в некотором масштабе запись путь—время для детонации или взрыва заряда.

Скорость взрыва  $D$  в каждом данном сечении, отстоящем на расстоянии  $l$  от начала заряда, составляет

$$D = \frac{dl}{dt}. \quad (\text{II.6})$$

Проекция части кривой путь—время на ось  $OY$ , соответствующая взрыву этой части заряда, равна  $A'B''$ . Согласно рис. 19

$$Y = \beta t; \quad (\text{II.7})$$

$$dl = d\left(\frac{Y}{\beta}\right), \quad (\text{II.8})$$

где  $\beta$  — коэффициент увеличения прибора (для большинства разверток  $\beta < 1$ ). Перемещение пленки, движущейся с постоянной скоростью  $v$  за время  $t$ , соответствующее взрыву части заряда длиной  $l$ , равно

$$X = vt; \quad (\text{II.9})$$

$$dt = d\left(\frac{X}{v}\right). \quad (\text{II.10})$$

Подставляя значение  $dl$  и  $dt$  в выражение (II.6) и учитывая, что  $\beta$  и  $v$  — постоянные величины, получаем

$$D = \frac{v}{\beta} \operatorname{tg} \varphi; \quad (\text{II.11})$$

$$v = 2\pi rn, \quad (II.12)$$

где  $\varphi$ —угол наклона касательной к кривой путь—времени в точке  $B'$ ;  $r$ —радиус барабана;  $n$ —число оборотов.

При детонации ( $D = \text{const}$ )  $\text{tg } \varphi$  находят делением ординаты  $Y$  на абсциссу  $X$ . Фронт детонации не является точкой, что обусловливает получение кривой с размытыми краями. Это затрудняет точное проведение касательной и замер катетов. Поэтому необходимо ограничить ширину светящегося при детонации пятна. По ширине пятно ограничивается с помощью щели. Щель может быть наружной и внутренней. Наружная щель устанавливается непосредственно у поверхности заряда, однако такая щель подвергается значительному воздействию продуктов взрыва и требует частой замены. Кроме того, она часто резко уменьшает фактическую светосилу объектива. Внутренняя щель устанавливается непосредственно у поверхности вращающегося барабана параллельно его образующей. Она не имеет недостатков, присущих наружной щели.

Для большинства барабанных разверток коэффициент увеличения  $\beta = \frac{1}{20} \div \frac{1}{4}$ , что является существенным недостатком, так как процесс, идущий по заряду на участке длиной 100 мм фиксируется на участке пленки протяженностью 5—25 мм. Это затрудняет или вовсе исключает точное определение характера изменения скорости процесса на таких участках.

Основным недостатком фоторегистров с движущейся пленкой является малая линейная скорость развертки. При расположении пленки по наружной поверхности барабана линейная скорость не превышает 100 м/сек, так как пленка разрушается под действием центробежных сил. При расположении пленки по внутренней поверхности барабана линейную скорость удается довести до 200 м/сек. Это, однако, связано с серьезными трудностями—необходимостью точной балансировки барабана, использования вакуума и т. п. Превысить эту скорость трудно, так как при более высоких скоростях происходит раздавливание эмульсионного слоя под действием центробежных сил.

Максимальная относительная ошибка определения скорости процесса составляет

$$\frac{dD}{D} = \pm \frac{d\beta}{\beta} + \frac{d\omega}{\omega} + \frac{2d\varphi}{\sin 2\varphi}. \quad (II.13)$$

Наиболее сильное влияние на результаты измерения оказывает ошибка в определении угла  $\varphi$ . Как показывает анализ, она будет минимальной, если выполнено условие  $\frac{D\beta}{v} = 1$ . Выполнение этого условия для барабанных разверток весьма затруднительно. Так, при  $D = 7000$  м/сек и  $v = 200$  м/сек условие выпол-

няется, если  $\beta = \frac{1}{35}$ . Это неприемлемо, ибо для измерения скорости детонации нужно будет использовать длинные (1 м и больше) заряды.

Из изложенного следует, что барабанные развертки целесообразно использовать для изучения сравнительно медленных процессов, например горения. Если исходить из приемлемого зна-

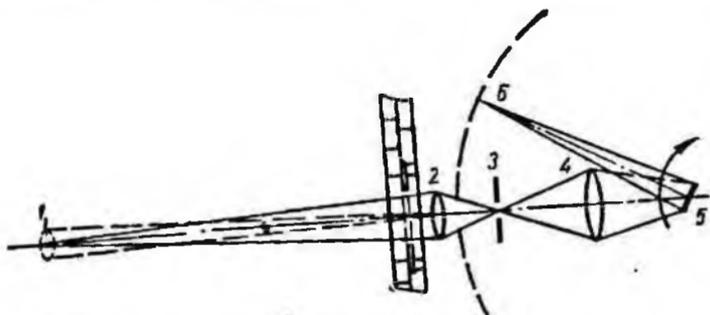


Рис. 20. Оптическая система зеркальной развертки.

чения  $\beta = 1/2 \div 1/4$ , то условие  $D\beta/v = 1$  выполняется при значениях  $v = 2000 \div 3000$  м/сек. Такая скорость может быть получена на зеркальной развертке с неподвижной пленкой.

В фоторегистрах с зеркальной разверткой развертка свечения взрыва осуществляется с помощью вращающегося зеркала. Зеркальная развертка состоит из трех узлов: оптической системы, узла синхронизации и развертывающего устройства.

Оптическая система (рис. 20) состоит из двух линз 2 и 4 с общей фокальной плоскостью. Такая система при использовании в качестве линз светосильных и длиннофокусных объективов позволяет получить большой радиус развертки и необходимое освещенное изображение. Кроме того, заряд испытываемого ВВ может быть достаточно удален от первого объектива прибора. Для полного использования светосилы объективов поток света 1, прошедший через первый объектив, должен полностью проходить через второй объектив и перехватываться зеркалом 5, повернутым так, что отраженные от него лучи попадают на пленку 6.

Щель 3, расположенная в общей фокальной плоскости объективов, служит для ограничения ширины изображений. Зеркало имеет поверхностный отражающий слой и во избежание прогиба при быстром вращении изготавливается из толстого стекла и металла. Узел синхронизации (рис. 21) необходим для совмещения начала взрыва заряда с определенным положением зеркала относительно пленки. Работает он следующим образом: кенотрон 4, накал которого включен через трансформатор 2, выпрям-

ляет переменный ток высокого напряжения с трансформатора 1 и заряжает конденсатор 5. Когда угловая скорость зеркала достигает требуемой величины, замыкается искровой промежуток 6. Однако конденсатор может разрядиться через специальный импульсный капсюль-детонатор 9 на землю только тогда, когда штифты диска-синхронизатора 7 будут находиться против неподвижных штифтов. Диск-синхронизатор жестко связан с зеркалом 8. В момент разряда лучи, отраженные от зеркала, попадают на фотопленку. Ось зеркала параллельна заряду и лежит с ним в одной плоскости. Поэтому зеркало развертывает на пленке свечение взрыва, образуя кривую путь — время.

Напряжение выпрямленного тока регулируется реостатом 3, включенным в первичную цепь трансформатора. Рассмотренная схема работает при напряжении 3—5 кв. Зеркало и диск-синхронизатор приводятся во вращение мотором. Число оборотов регулируется реостатом.

Для точного определения линейной скорости необходимо точно измерить число оборотов зеркала, что можно осуществить различными методами, в частности стробоскопическим. Ошибка измерения этим методом числа оборотов не превышает 0,5%.

Линейная скорость развертки  $v$  определяется следующим образом (рис. 22). Угловая скорость вращения зеркала

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (II.14)$$

Так как  $\psi = 2\varphi$ , угловая скорость вращения отраженного луча  $OB$

$$\omega_1 = \frac{d\psi}{dt} = \frac{2d\varphi}{dt} = 2\omega. \quad (II.15)$$

Линейная скорость отраженного луча

$$v = \omega_1 R = 2\omega R, \quad (II.16)$$

где  $R$  — радиус развертки.

Формулу (II.14) для определения скорости процесса можно переписать так:

$$D = \frac{4\pi R n}{\beta} \operatorname{tg} \varphi, \quad (II.17)$$

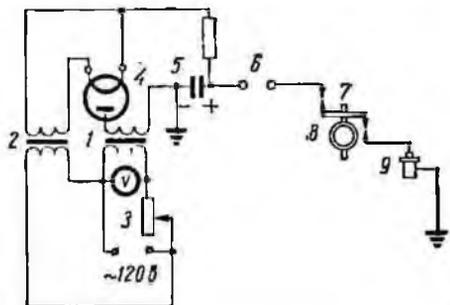


Рис. 21. Схема синхронизации зеркальной развертки.

где  $\varphi$ —угол наклона касательной к кривой путь—время;  $\frac{4\pi R}{\beta}$   
 постоянная прибора, обозначим ее через  $C$ . Тогда

$$D = Cn \operatorname{tg} \varphi. \quad (11.18)$$

Если радиус развертки  $R = 1,5 \div 2$  м,  $\beta = \frac{1}{2} \div \frac{1}{3}$ , то при  $n = 6000$  об/мин  $= 100$  об/сек и  $R = 1,5$  м скорость  $v = 1890$  м/сек, т. е. она на один-два порядка превышает линейную скорость барабанных разверток, что резко повышает точность определений.

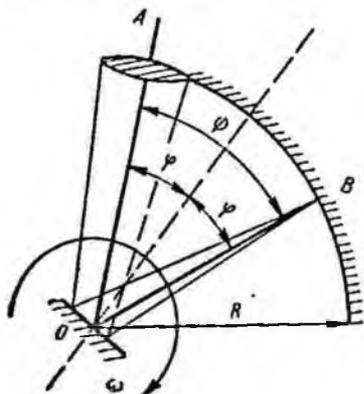


Рис. 22. Отражение луча от плоского вращающегося зеркала.

Кроме того, сравнительно малое уменьшение скорости  $v$  резко увеличивает разрешающую способность прибора. Оказывается возможным определение не средних, а истинных скоростей процессов. Легко проследить за изменением скорости процесса на коротких участках заряда (1—3 см). Для определения скорости детонации достаточно взять заряд длиной 100 мм и меньше.

Максимальное значение относительной ошибки определения скорости процесса может быть вычислено по зависимости, записанной для барабанных разверток. Анализ показывает, что максимальная относительная ошибка определения скорости стационарного процесса детонации не превышает  $\pm 0,8\%$ , а процесса, идущего с переменной скоростью,  $\pm 2,5\%$ .

##### 5. Методика измерения скорости детонации с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР

Сверхскоростная фоторегистрирующая установка СФР (рис. 23) состоит из съемочной камеры со сменной оптикой и пульта управления, связанного с камерой и сетью питания (220 в, 50 гц) специальными электрошнурами.

Съемочная камера может быть использована в двух вариантах: 1) в качестве фоторегистратора, дающего непрерывную развертку исследуемого процесса с разрешением во времени до  $10^{-8}$  сек (при скорости развертки изображения на пленке 3750 м/сек), 2) в качестве лупы времени, дающей ряд последо-

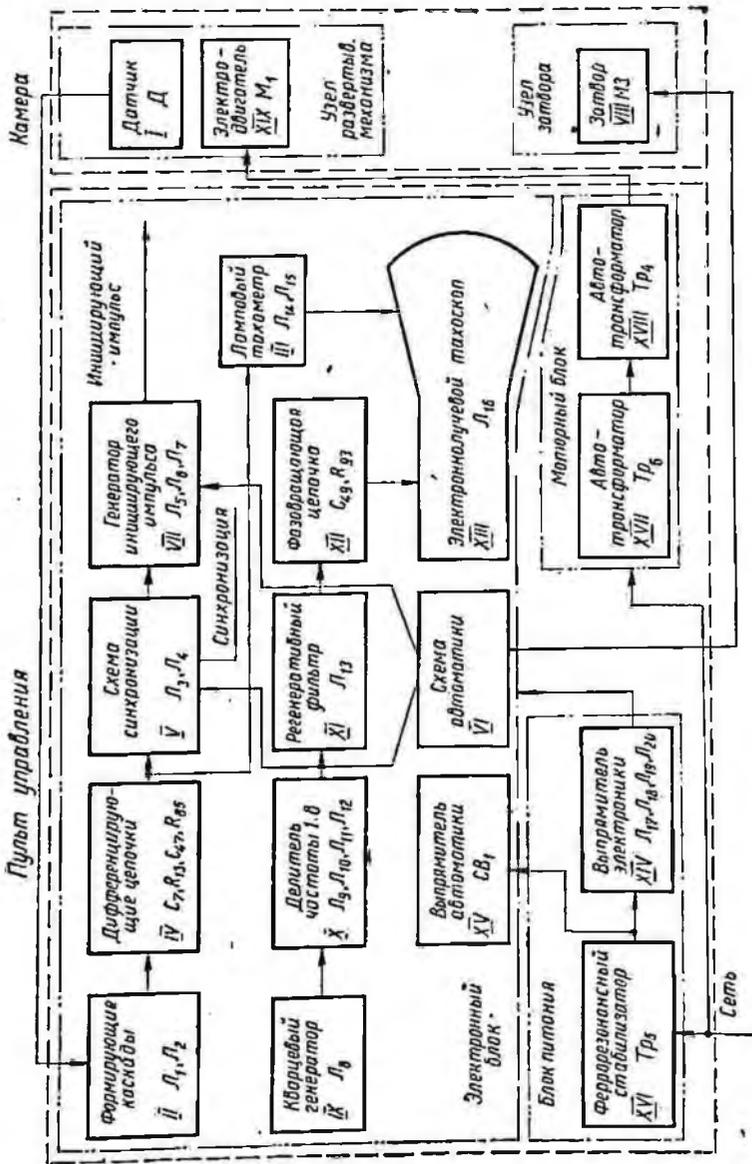


Рис. 23. Блок-схема установки СФР.

вательных фотографий изучаемого процесса со скоростью съемки до 2,5 млн. кадров в секунду. Фотографирование производится на неподвижной киноплёнке с помощью вращающегося зеркала.

Оптическая система фоторегистратора представлена на рис. 24.

Объект съемки, находящийся перед входным объективом 1, изображается этим объективом в плоскости щели 2. Непосред-

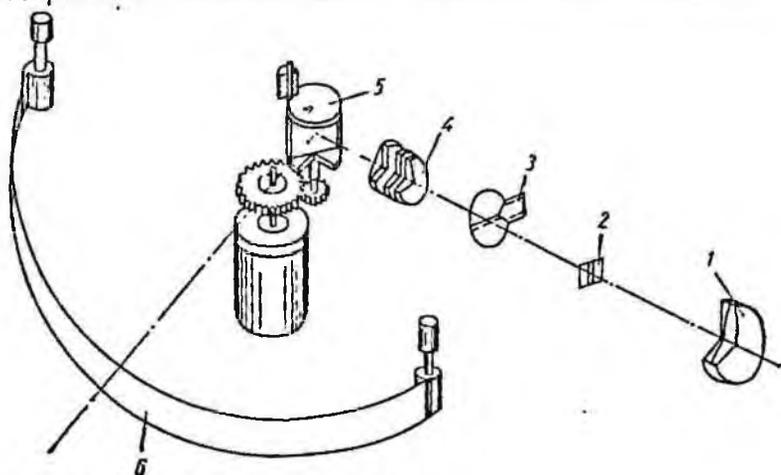


Рис. 24. Схема фоторегистратора СФР.

ственно за щелью находится электромагнитный затвор 3. С помощью второго объектива 4 и зеркала 5, вращающегося вокруг вертикальной оси, изображение, которое находится в плоскости щели, переносится на фокальную рамку, где расположена фотоплёнка 6. При вращении зеркала изображение перемещается вдоль фокальной поверхности, экспонируя при этом фотоплёнку.

Геометрический анализ работы подобной системы показывает, что при равномерном вращении зеркала скорость движения изображения по плёнке не равномерна, а подчиняется закону

$$v = 2\omega r \left( 1 + \frac{a}{r} \cos \varphi \right), \quad (\text{II.19})$$

где  $v$  — линейная скорость движения изображения;  $\omega$  — угловая скорость вращения зеркала;  $r$  — радиус развертки,  $r = 239$  мм;  $a$  — расстояние от оси вращения зеркала до отражающей плоскости,  $a = 5$  мм;  $\varphi$  — угол поворота зеркала относительно оптической оси прибора.

Неравномерность скорости развертки на рабочем угле прибора СФР достигает  $\pm 0,5\%$  и учитывается в приведенной формуле.

На рис. 25 показана оптическая схема лупы времени. Изображение объекта с помощью объективов 1 и 4 строится в плоскости, пересекающейся с вращающимся вокруг вертикальной оси зеркалом 5. Установка снабжена двумя линзовыми вставками. В первой вставке по дуге имеется четыре ряда линз 7 прямоугольной формы, передающих отраженное зеркалом 5 изображение объекта на фотопленку 8.

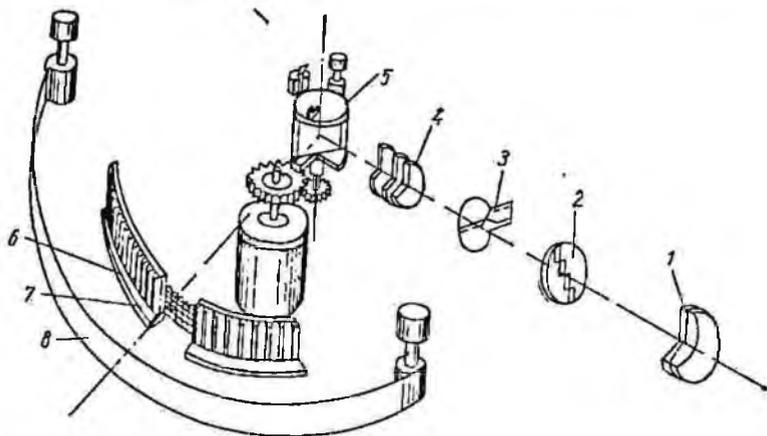


Рис. 25. Схема лупы времени СФР.

Перед объективом 1 помещаются затвор 3 и четырехступенчатая прямоугольная диафрагма 2, изображающаяся посредством объектива 4 в месте расположения линз 7.

Световое отверстие каждой линзы 7 ограничено прямоугольной диафрагмой 6 так, что его ширина составляет только часть ширины самой линзы. Диафрагма 2 построена таким образом, что изображение каждой ее ступени располагается в пределах соответствующего ряда линз 7. Когда одно из изображений ступени диафрагмы 2 совпадает со световой диафрагмой 6 линзы 7, через эту линзу проходит пучок света, строящий изображение объекта на пленке. Остальные три ступени изображения диафрагмы 2 находятся между соседними щелями линзовой диафрагмы 6, и свет через соседние линзы не поступает.

При вращении зеркала изображение диафрагмы 2 перемещается по поверхности линзовой вставки с линзами 7. При этом происходит последовательное экспонирование кадров в каждом вертикальном ряду линз 7. Каждый последующий вертикальный ряд линз дает последовательные изображения процесса, являющиеся продолжением предыдущего ряда изображений.

Световая диафрагма 6 и изображение диафрагмы 2 при вращении зеркала образуют систему световых затворов, ограничи-

вающих время экспонирования каждого кадра. Расположение линз 7 в несколько рядов позволяет полностью использовать рабочую площадь пленки и повысить частоту съемки при сохранении линейных размеров каждого кадра.

Четырехрядная линзовая вставка имеет по 60 линз в каждом ряду и обеспечивает получение снимков с линейным полем 5 мм и частотой до 2 500 000 кадров в секунду. Вторая линзовая вставка имеет два ряда линз и работает совместно с двухступенчатой диафрагмой 2. Двухрядная линзовая вставка имеет по 30 линз в каждом ряду и обеспечивает получение снимков с линейным полем 10 мм и частотой до 625 000 кадров в секунду.

Основные технические данные камеры СФР следующие:

Разрешающая визуальная сила фоторегистратора не менее 30 мин/мм; размер кадра фоторегистратора до 25×375 мм; размер кадра лупы времени (диаметр круга) при двухрядной вставке 10 мм, при четырехрядной вставке 5 мм; ширина и длина фотопленки для зарядки камеры соответственно 35 мм и 1,6 м.

Данные о линейном поле фоторегистратора в плоскости предмета, о линейном поле лупы времени в плоскости предмета и об угле поля зрения для бесконечно удаленного предмета приведены соответственно в табл. 4, 5 и 6.

Таблица 4

Линейное поле фоторегистратора в плоскости предмета, м

Фокусное расстояние входного объектива F, мм	Дистанция, м						
	2	5	15	25	50	100	500
210	0,06	0,16	0,51	0,86	1,71	3,43	17,27
750	—	0,04	0,14	0,23	0,48	0,96	4,8
2000	—	—	0,05	0,08	0,17	0,35	1,82

Таблица 5

Линейное поле лупы времени в плоскости предмета, м

Вставка	Фокусное расстояние входного объектива F, мм	Дистанция, м						
		2	5	15	25	50	100	500
Двухрядная	210	0,28	0,77	2,33	3,85	7,69	15,63	76,92
	750	—	0,19	0,63	1,05	2,17	4,35	21,74
	2000	—	—	0,21	0,37	0,78	1,61	8,33
Четырехрядная	210	0,17	0,45	1,39	2,27	4,63	9,26	46,30
	750	—	0,11	0,39	0,63	1,28	2,63	12,82
	2000	—	—	0,12	0,22	0,46	0,95	4,85

На практике возможна работа спаренных установок. При этом инициирование явления происходит в момент, соответствующий заданным положениям зеркал двух камер. Спаренная работа двух установок может применяться в случае необходимости фотографирования процесса с двух направлений при разных скоростях регистрации двух стадий одного процесса.

Т а б л и ц а 6

Угол поля зрения для бесконечно удаленного предмета

Тип прибора	Фокусное расстояние входного объектива $F$ , мм		
	210	750	2000
Фоторегистратор	1°59'	0°34'	0°13'
Лупа времени: двухрядная	8°52'	2°29'	0°56'
четырёхрядная	5°17'	1°29'	0°34'

Зная основные технические данные установки СФР, можно составить методику проведения эксперимента (рис. 26).

Поскольку установка СФР позволяет разворачивать изображение исследуемого явления во времени только в горизонтальной плоскости, то при измерении скорости детонации заряда последний должен устанавливаться вертикально. Это обстоятельство при исследовании больших зарядов свыше 10 кг требует обваловки их для уменьшения воздушной ударной волны.

Максимальная длина заряда, на которой можно измерить скорость детонации, определяется максимальным временем движения луча по пленке. При заданной точности измерений скорости вращения зеркала по электроннолучевому тахоскопу 0,1% движение луча составляет примерно 1 мсек. Следовательно, длина исследуемого заряда при скоростях детонации 2000—6000 м/сек находится в пределах 2—6 м. Расстояние от камеры до заряда при использовании объектива с фокусным расстоянием  $F=210$  мм и при работе камеры в режиме фоторегистратора соответственно равно 60 и 180 м. Оболочка, в которой находится заряд, должна

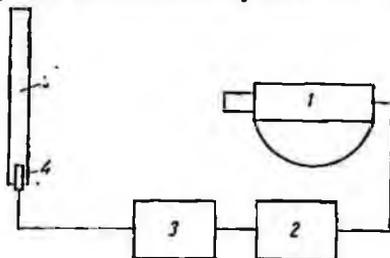


Рис. 26. Схема для измерений скорости детонации с помощью установки СФР:

1 — камера СФР; 2 — пульт управления СФР; 3 — блок подрыва электродетонатора; 4 — электродетонатор; 5 — заряд ВВ.

быть либо прозрачной, либо в ней должны быть соответствующие окна.

Синхронизация момента взрыва с рабочим положением зеркала в камере осуществляется с помощью специальной схемы подрыва электродетонатора (рис. 27). Подрыв происходит следующим образом. От источника высокого напряжения (типа ВС-23) заряжается накопительный конденсатор до напряжения

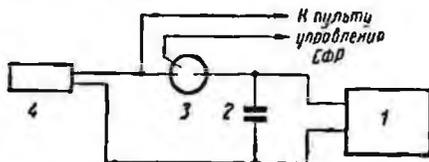


Рис. 27. Схема подрыва электродетонатора:

1 — источник высокого напряжения; 2 — накопительный конденсатор; 3 — разрядник; 4 — электродетонатор.

2—3 кв. Конденсатор разряжается через специальный высоковольтный разрядник, в качестве которого используется импульсная лампа ИСШ-100, в момент подачи на разрядник импульса с пульта управления от генератора инициирующего импульса. Импульс вырабатывается во время нахождения зеркала камеры в рабочем

положении. Подрыв электродетонаторов от высоковольтного источника необходим для уменьшения разброса времени срабатывания электродетонаторов, который составляет не более 10 мксек.



Рис. 28. Типичная регистрируемая скорость детонации.

Типичная регистрируемая скорость взрыва заряда представлена на рис. 28. Нахождение скорости детонации по данной регистрируемой скорости сводится к определению тангенса угла наклона касательной к кривой путь—время и вычисляется по формуле

$$D = \frac{4\pi Rn}{\beta} \operatorname{tg} \varphi, \quad (\text{II.20})$$

где  $D$ —скорость детонации;  $R$ —радиус развертки изображения (для данной камеры равный 239 мм);  $n$ —число оборотов зеркала;  $\varphi$ —угол наклона касательной к кривой путь—время;  $\beta$ —коэффициент увеличения камеры (масштаб).

Кроме тангенса угла необходимо определить и масштаб  $\beta$ , равный отношению величины изображения заряда на пленке к его длине. Величину изображения заряда на пленке легко получить, произведя статическую съемку его перед взрывом или

контрольную съемку взрыва двух точечных зарядов на строго фиксированных расстояниях. Точность измерения скорости в основном определяется точностью измерения угла  $\varphi$  и масштаба  $\beta$ .

По данной методике кроме скорости детонации можно определять форму детонационной волны и форму фронта разлета продуктов взрыва.

## 6. Непрерывное измерение скорости детонации с помощью проволочных датчиков сопротивления

Непрерывное измерение скорости детонации в тех случаях, когда нельзя применять оптические методы, осуществляется с помощью специальных датчиков сопротивления, представляющих собой неизолированный проводник с навитым на него высокоомным проводом диаметром 0,10—0,15 мм (рис. 29) в эмалевой изоляции.

При прохождении детонационной волны вдоль заряда 1 в ее фронте 3 происходит переключение датчика через сопротивление ионизационного промежутка  $R_i$ . Так как  $R_i$  невелико (2—4 ом) и изменяется незначительно, скорость изменения сопротивления датчика 2 определяется только скоростью детонации и связана с последней соотношением

$$D = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{dR}{dt}, \quad (\text{II.21})$$

где  $\omega$  — сопротивление единицы длины датчика;  $R$  — общее сопротивление датчика.

Поскольку  $R = \frac{u}{i}$ , то

$$D = \frac{1}{\omega} \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{u}{i} \right), \quad (\text{II.22})$$

где  $u$  — напряжение, приложенное к датчику;  $i$  — ток в датчике.

При  $i = \text{const}$

$$D = \frac{1}{\omega i} \cdot \frac{du}{dt}. \quad (\text{II.23})$$

Следовательно, скорость детонации в любой момент времени определяется тангенсом угла наклона кривой  $u=f(t)$  в соответствующей точке.

Таким образом, для непрерывного измерения скорости детонации необходимо получить постоянный ток в цепи, сопротивление которой изменяется во времени. Обычно это достигается с помощью различных электронных схем. Однако в этом случае получить достаточно большой ток сложно, и для записи кривой

$u=f(t)$  нужно пользоваться усилителем, что весьма неудобно вследствие нелинейности самого усилителя и внесения искажения в виде помех. Кроме того, при небольших напряжениях, приложенных к датчику, сопротивление низкочастотного промежутка  $R_i$  изменяется, что также несколько искажает полученную кривую.

Чтобы избавиться от необходимости усиления обеспечить постоянный ток и достаточное напряжение на датчике, пользуются специальной цепью, показанной на рис. 30. Конденсатор  $C$ , заряженный до напряжения 400—500 в, разряжается, начиная с момента взрыва, на сопротивление датчика. Сопротивление датчика изменяется во времени по закону

$$R_z = R_0 - D\omega t, \quad (II.24)$$

где  $R_0$ —начальное сопротивление цепи. Ток в цепи описывается уравнением

$$\int \frac{idt}{C} + i(R_0 - D\omega t) = 0 \quad (II.25)$$

или

$$i(1 - D\omega C) + C(R_0 - D\omega t) \frac{di}{dt} = 0. \quad (II.26)$$

Решая уравнение (II.26) и учитывая, что  $t = 0$ ,  $i = \frac{u}{R_0}$ , получаем

$$i = \frac{u}{R_0} \frac{1}{CD\omega} (R_0 - D\omega t)^{\frac{1}{CD\omega} - 1}. \quad (II.27)$$

При  $\frac{1}{CD\omega} = 1$  с изменением сопротивления датчика ток в цепи будет оставаться постоянным и равным примерно  $\frac{u}{R_0}$ . Таким образом, при соответствующем выборе параметров цепи можно получить стабильный во времени и достаточно большой ток при изменении сопротивления цепи.

Исходя из полученных соотношений рассчитаем параметры прибора для непрерывного измерения скорости детонации. В используемых датчиках  $\omega \approx 8$  ом/см. Среднюю скорость детонации промышленных ВВ можно считать равной 4000 м/сек. Тогда необходимая емкость измерительной цепи будет

$$C = \frac{1}{\omega D} = 0,35 \text{ мкф}. \quad (II.28)$$

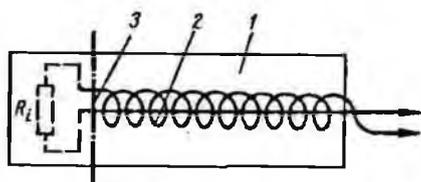


Рис. 29. Измерение скорости детонации с помощью датчиков сопротивления.

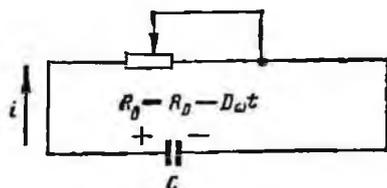


Рис. 30. Схема цепи для обеспечения постоянства тока.

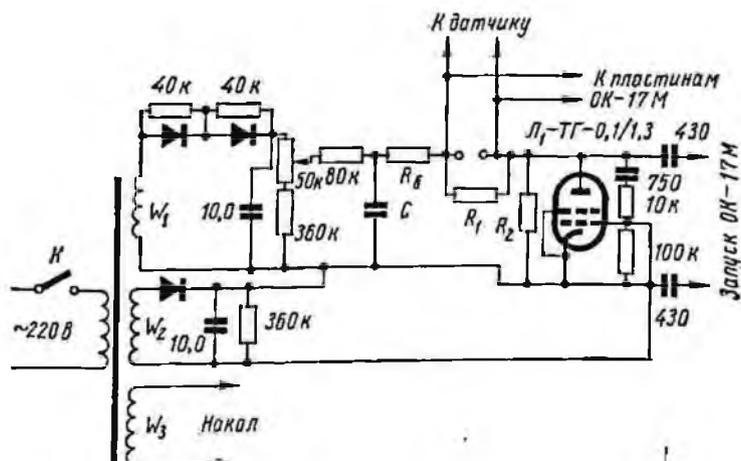


Рис. 31. Схема прибора для непрерывного измерения скорости детонации.

При отклонении скорости детонации от средней относительное изменение тока можно подсчитать следующим образом:

$$\frac{\Delta i}{i} = \left[ 1 - \frac{(R_0 - D\omega t)^{\frac{1}{CL\omega} - 1}}{R_0} \right]. \quad (\text{II.29})$$

Применив в измерительной цепи балластное сопротивление  $R_0$ , в два раза большее, чем сопротивление датчика, при скорости детонации 3000—6000 м/сек получим  $\frac{\Delta i}{i} \leq \pm 10\%$ .

Схема прибора для непрерывного измерения скорости детонации, в котором использованы свойства указанной цепи, показана на рис. 31.

Делитель  $R_1R_2$  подобран так, чтобы к датчику в исходном состоянии была приложена меньшая часть напряжения заряженного конденсатора. Тиратрон  $\mathcal{L}_1$  заперг отрицательным напряжением, подаваемым на его сетку с обмотки  $W_2$ . При «закорачивании» ионизационного промежутка датчика детонационной волной положительный импульс, снимаемый с сопротивления  $R_1$ , зажигает тиратрон. Одновременно этим же импульсом запускается осциллограф ОК-17М.

Изменяющееся вследствие изменения сопротивления напряжение на датчике записывается на осциллографе ОК-17М. Так как конденсатор  $C$  заряжен до напряжения 400—500 в, величина напряжения достаточна для того, чтобы записывать ее непосредственно на пластины осциллографа без предварительного усиления.

## 7. Метод Дотриша

Сущность метода Дотриша состоит в том, что неизвестная скорость детонации заряда сравнивается с известной скоростью детонации детонирующего шнура. Отрезок детонирующего шнура 2 произвольной длины укладывают так, чтобы концы его соприкасались с зарядом 1, а середина находилась на свинцовой пластинке (рис. 32). Если заряд состоит из порошкообразного ВВ со сравнительно малой скоростью детонации, то концы шнура необходимо несколько углубить в ВВ (оба на одинаковую длину). Расстояние между концами шнура 1 является базой для определения скорости детонации и должно быть точно измерено. Распространяющаяся по заряду детонация вызывает последовательно детонацию сначала левого, а затем правого конца шнура. Таким образом, в шнуре возникнут две детонационные волны, движущиеся навстречу друг другу. В некоторой точке шнура эти волны столкнутся. При столкновении детонационных волн дав-

ление значительно возрастает (более чем в два раза) и на свинцовой пластинке 4 возникнет характерная метка—углубление 5. Метка получается более четкой, если шнур приподнят над пластинкой на несколько миллиметров. Если бы детонация левого и правого концов шнура начиналась одновременно, то столкновение волн (и соответственно метка) получилось бы точно на середине отрезка шнура 3. В действительности на левом конце шнура детонация начинается раньше, чем на правом, поэтому место столкновения волн (и соответственно метка) сдвинется вправо. Обозначим расстояние между серединой отрезка шнура и местом столкновения волн через  $\Delta h$ . Очевидно, что время распространения детонации по левой части шнура  $t_{\pi}$  до момента столкновения равно времени распространения детонации по заряду  $t_3$  на длине  $l$  плюс время распространения детонации по правой части шнура  $t_{\pi}$  до места столкновения:

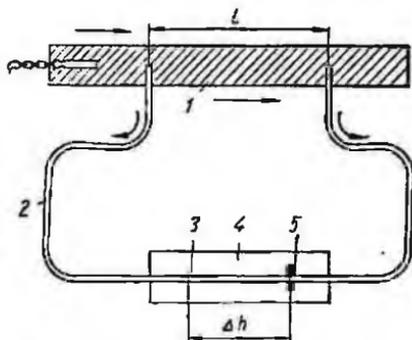


Рис. 32. Схема определения скорости детонации методом Дотриша.

$$t_{\pi} = t_3 + t_{\pi} \quad (\text{II.30})$$

Обозначим через  $L$  длину отрезка шнура, а через  $D_{\text{ш}}$ —скорость его детонации. Пусть  $D$ —неизвестная скорость заряда. Тогда

$$t_{\pi} = \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} + \frac{\Delta h}{D}; \quad (\text{II.31})$$

$$t_3 = \frac{l}{D}; \quad (\text{II.32})$$

$$t_{\pi} = \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} - \frac{\Delta h}{D}. \quad (\text{II.33})$$

Поскольку  $t_{\pi} = t_3 + t_{\pi}$ , то

$$\frac{L/2}{D_{\text{ш}}} + \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}} = \frac{l}{D} + \frac{L/2}{D_{\text{ш}}} - \frac{\Delta h}{D}, \quad (\text{II.34})$$

откуда

$$2 \frac{\Delta h}{D_{\text{ш}}} = \frac{l}{D}, \quad (\text{II.35})$$

или

$$D = D_{\text{ш}} \frac{l}{2\Delta h}. \quad (\text{II.36})$$

Для определения неизвестной скорости  $D$  необходимо и достаточно знать величины  $l$ ,  $\Delta h$  и скорость детонации шнура  $D_{ш}$ . Значение  $D_{ш}$  можно определить одним из описанных методов. Понятно, что детонирующий шнур должен обладать высоким постоянством скорости детонации для разных отрезков одной и той же партии. При определении скорости детонации этим методом обычно используются заряды общей длиной 30—40 см с длиной базы  $l=20 \div 25$  см. При этих условиях ошибка однократно измерения составляет 3—5%.

Несмотря на невысокую точность, получаемую к тому же для зарядов значительной длины, метод Дотриша широко используется в современных исследованиях. Особенно ценным является возможность применения этого метода в полевых условиях, где не всегда можно использовать методы, требующие точной электронной или оптической аппаратуры. Точность этого метода зависит прежде всего от равномерности детонации шнура и от точности измерения расстояний  $h$  и  $l$ .

Максимальная относительная ошибка определения скорости детонации по этому методу может быть оценена следующим образом:

$$d \ln D = d \ln l + d \ln D_{ш} + d \ln h. \quad (\text{II.37})$$

Дифференцируя, получаем

$$\frac{dD}{D} = \pm \left( \frac{dl}{l} + \frac{dD_{ш}}{D_{ш}} + \frac{dh}{h} \right). \quad (\text{II.38})$$

Скорость детонации детонирующего шнура определяется с точностью 1,5—2%. Расстояние  $l$  измеряется с точностью до 1 мм. Точнее определить это расстояние трудно, так как вполне возможно осыпание ВВ у стенок гнезд. Таким образом,  $\frac{dl}{l} =$

$$= \frac{1}{200} 100\% = 0,5\%.$$

Расстояние  $h$  при данном значении  $l$  зависит от соотношения между скоростью детонации заряда и скоростью детонации шнура.

Если эти скорости равны, то  $h = \frac{l}{2}$ . Следовательно, при  $l=200$  мм  $h=100$  мм. Так как отметка фиксируется не очень четко и вполне возможны ошибки при определении середины отрезка шнура, расстояние  $h$  измеряется недостаточно точно. Возможная ошибка измерения равна примерно 2%, т. е.

$$\frac{dh}{h} = 2\%.$$

Итак, максимальное значение относительной ошибки при оп-

ределении скорости детонации методом Дотриша будет  $\frac{dD}{D} =$   
 $= \pm(2+0,5+2) = \pm 4,5\%$ .

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, М., 1960.
2. Аппи А. Я. Механизм детонации взрывчатых веществ. Изд. ВНИТОГор, 1947.
3. Аппи А. Я., Болховитинов Л. Г. — ДАН СССР, 1959, 124, 2.
4. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Физматгиз, М., 1959.
5. Бауман К. Исследование скорости детонации ВВ в условиях горных взрывных работ. Госгортехиздат, М., 1962.
6. Боуден Ф. П. и Иоффе А. Д. Возбуждение и развитие взрыва в твердых и жидких взрывчатых веществах. ИЛ, М., 1955.
7. Вопросы горения и детонации волн. IV Международный симпозиум по вопросам горения и детонационных волн. Оборонгиз, М., 1953.
8. Галаджий Ф. М., Зенин В. Н., Войштейн Б. И. — В кн.: Врывное дело, 52/9. Госгортехиздат, М., 1963.
9. Друкованый М. Ф., Комир В. М., Билоконь В. П. — В кн.: Механика и разрушение горных пород. «Недра», М., 1969.
10. Друкованый М. Ф. и др. — В кн.: Механика и разрушение горных пород. «Недра», М., 1969.
11. Друкованый М. Ф., Гейман Л. М., Комир В. М. Новые методы и перспективы развития взрывных работ на карьерах. «Наука», М., 1966.
12. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. — ДАН СССР, 1960, 6.
13. Зайцев В. М., Похил П. Ф., Шведов К. К. — ДАН СССР, 1960, 1.
14. Зельдович Я. Б. и Компанеев А. С. Теория детонации. Гостехиздат, М., 1955.
15. Измерение скорости распространения ударных волн в твердых ВВ. Экспресс-информация (ВИНИТИ), серия «Приборы и стенды», 31, 1960.
16. Мирский Т. Я. Измерение временных интервалов. «Энергия», М., 1964.
17. Рябинин Ю. Н. Газы при больших плотностях и высоких температурах. Физматгиз, М., 1959.
18. Саламандра Г. Д. и др. Некоторые методы исследования быстропеременных процессов и их применение к изучению формирования детонационной волны. Изд-во АН СССР, М., 1960.
19. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. Физматгиз, М., 1963.
20. Ударно-волновая теория детонации. Экспресс-информация (ВИНИТИ), серия «Горнорудная промышленность», 37, 1962.

В истории науки ни одно из физических определений, вероятно, не имеет такого практического значения, как определение давлений. Созданию соответствующих методов измерения давления посвящено большое число теоретических и экспериментальных исследований как в нашей стране, так и за рубежом.

Особо важное значение имеет измерение давления при взрыве, так как эта задача представляет практический интерес для оценки механического действия взрыва и изыскания способов

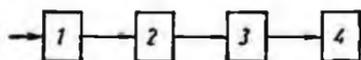


Рис. 33. Блок-схема устройства для измерения быстроменяющихся давлений:

1 — чувствительный элемент; 2 — усилитель-преобразователь; 3 — осциллограф; 4 — фотокамера.

управления энергией взрыва. В связи с этим возникает вопрос о нахождении оптимального управления процессом, которое станет возможным, когда будут установлены функциональные зависимости между параметрами взрывного импульса и основными факторами, определяющими их.

Однако проблема измерения давления продуктов детонации связана со значительными трудностями, так как давление достигает в некоторых случаях громадной величины (несколько сотен тысяч атмосфер) и за малый промежуток времени очень быстро изменяется. Поэтому в данной главе рассмотрим лишь принцип построения измерительных систем.

Измерители давления представляют собой измерительные системы, в которых используются различные принципы преобразования одного вида энергии в другой. Такие системы (рис. 33), как правило, имеют датчик—устройство, воспринимающее давление и преобразующее его в электрическую величину, и преобразователь—устройство, преобразующее изменение определенного параметра датчика в пропорциональное изменение электрического напряжения. В зависимости от принципа действия датчика, его конкретного исполнения блок-схема может меняться. Быстроменяющееся давление воздействует на чувствительный элемент датчика, и информация в виде электрического сигнала проходит по измерительной цепи от приемного элемента датчика до регистрирующего устройства, претерпевая определенные искажения

(рис. 34). Поэтому необходимо выбирать такие параметры измерительной системы, при которых возникающие погрешности были бы минимальными.

### 1. Измерение давления системами, чувствительными элементами которых являются упругие мембраны

В подавляющем большинстве современных приборов для измерения давления в качестве чувствительного элемента используется круглая диафрагма или пластинка, жестко закрепленная по периферии. Прогиб в центре идеальной мембраны под действием равномерной нагрузки для случая малых перемещений дается соотношением

$$x = \frac{3(1-\sigma^2)}{16E} \cdot \frac{Pr^4}{t^3}, \quad (\text{III.1})$$

где  $E$  и  $\sigma$  — соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона данного материала;  $P$  — избыточное давление с одной стороны диафрагмы;  $r$  и  $t$  — соответственно радиус и толщина диафрагмы.

Для данного материала более высокая чувствительность может быть получена путем увеличения радиуса  $r$  и уменьшения толщины  $t$ . Основная частота колебаний этой диафрагмы определяется уравнением

$$\omega = 10,21 \left[ \frac{E}{12\rho(1-\sigma^2)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{t}{r^2}, \quad (\text{III.2})$$

где  $\rho$  — плотность материала.

Прогиб мембраны можно определить различными способами. Наиболее распространенные способы основаны на применении оптического указателя, оптической интерференции, электрического конденсатора, переменного магнитного сопротивления, тензометра сопротивлений и т. п.

В мембранных датчиках давления для измерения прогиба мембраны широкое распространение нашли тензодатчики. (тензоэлементы). Принцип действия этих датчиков основан на их свойстве изменять сопротивление при деформировании.

Для измерения давлений с помощью тензодатчиков  $T$  служат устройства, основанные на применении неравновесного моста

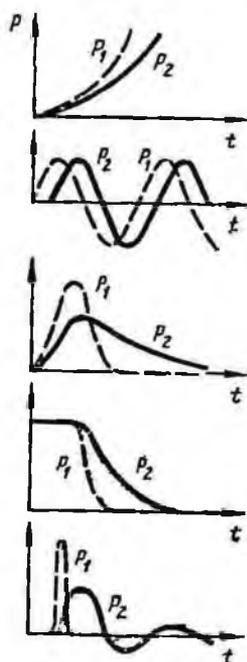


Рис. 34. Искажение различных сигналов давления при прохождении через измерительную систему ( $P_1$  — истинное давление,  $P_2$  — измеренное давление).

переменного тока (рис. 35). Составными частями такого устройства являются высокочастотный генератор  $G$ , формирующий электрические сигналы несущей частоты; усилитель  $У$  и регистрирующий прибор  $РП$ . Сопротивления  $R_2$  и  $R_3$  являются постоянными плечами измерительного моста. Сопротивление  $R_1$  предназначено для калибровки схемы, причем параллельно данному

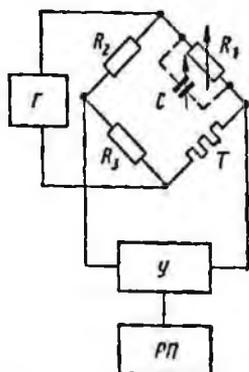


Рис. 35. Измерительная мостовая схема включения тензодатчиков.

сопротивлению часто включается небольшая переменная емкость  $C$ , назначение которой — балансировка фазового угла. Для получения удовлетворительных результатов измерения давления необходимо, чтобы частота переменного тока питания моста была в 10 раз больше частоты наивысшей гармонической составляющей импульса давления.

На рис. 36, а представлена конструкция тензодатчика с чувствительным элементом в виде плоской мембраны. Проволочный элемент наклеен непосредственно на мембрану. Датчики такого типа применяются для одноразовых взрывных процессов, а также для измерения давлений в жидкой среде.

Датчик давления с упругим элементом в виде цилиндра, деформируемого в радиальном направлении, представлен на рис. 36, б. Упругий элемент датчика изготовлен в виде гильзы, на поверхность которой наклеен тензоэлемент. Динамические свойства такого датчика определяются частотой собственных колебаний упругой цилиндрической гильзы.

Представляет интерес тензодатчик, упругая мембрана в котором заменена поршнем, прецизионно сочлененным с цилиндрическим корпусом и опирающимся на упругое кольцо или на тонкостенный цилиндр (рис. 37). На упругом кольце или цилиндре наклеены тензодатчики, измеряющие их деформацию. Кольцо или цилиндр могут обладать высокой жесткостью, поэтому верхний предел частотного диапазона датчика может быть высоким.

Для измерения давлений применяются датчики, в которых тензоэлементы связаны с мембраной с помощью растяжек. Устройство такого «безразмерного» датчика представлено на рис. 38. Датчик имеет два тензоэлемента, выполненных в виде проволочек, которые в точках  $a$  и  $a'$  закреплены на мембране, а в точках  $b$  и  $b'$  на участке корпуса, примыкающем к мембране. В точках  $c$  и  $c'$  тензоэлементы прикреплены к пружинам, установленным на днище датчика. Выводы от тензоэлементов выполнены в точках  $a$ ,  $b$  и  $c$ . Четыре тензоэлемента образуют активные плечи моста. Прогиб диафрагмы уменьшает натяжение плеч  $ac$  и  $a'c'$

и увеличивает натяжение плеч  $bc$  и  $b'c'$ . При этом соответственно изменяется их сопротивление.

В последнее время появились полупроводниковые тензоэлементы, чувствительность которых в 10—100 раз выше чувствительности металлических тензоэлементов. В некоторых случаях они могут использоваться в датчиках, действующих без усилительных схем. Полупроводниковые тензоэлементы, как и метал-

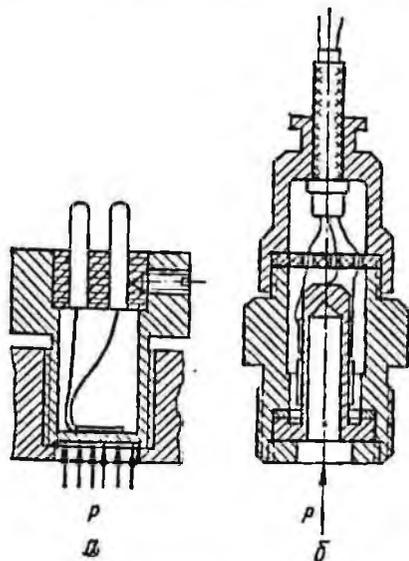


Рис. 36. Конструкция мембранных датчиков.

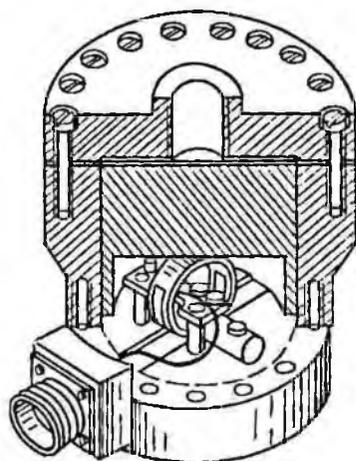


Рис. 37. Тензодатчик давления с поршнем и упругим кольцом.

лические, могут применяться в приклеенном и не приклеенном виде, причем их питание может осуществляться постоянным и переменным током.

Датчики давления с тензоэлементами обладают хорошими динамическими свойствами. Их конструкция и электрическое устройство несложны. Недостатками таких датчиков являются невысокая стабильность и чувствительность. Верхний предел частотного диапазона неискаженного измерения колебаний давления для современных конструкций тензодатчиков достигает 15—20 кГц, поэтому в качестве регистрирующих приборов можно применять светолучевые осциллографы с высокочастотными гальванометрами.

В емкостном датчике чувствительным элементом является мембрана, которая представляет собой одну из пластин конденсатора. Мембрана имеет свободу деформации в одном направлении и перемещается под действием переменного давления, из-

меняя величину емкости конденсатора. Максимальная величина изменения емкости может составлять примерно 20% полной емкости датчика. Вторая пластина неподвижна и крепится в корпусе датчика.

Емкость плоскопараллельного конденсатора выражается формулой

$$C = \frac{S\varepsilon}{3,6 \cdot d} \text{ пф}, \quad (\text{III.3})$$

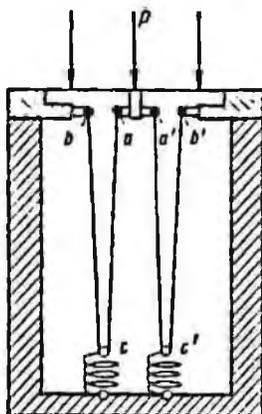


Рис. 38. Тензодатчик давления с растянутыми тензозементами.

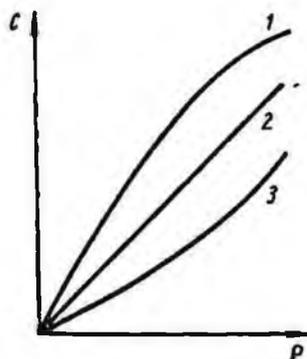


Рис. 39. Кривые зависимости емкости датчика от величины давления  $P$  при различной толщине слюдяной пластины, помещенной в зазор.

где  $S$ —площадь пластины,  $\text{см}^2$ ;  $d$ —расстояние между пластинами,  $\text{см}$ ;  $\varepsilon$ —постоянная диэлектрика, заполняющего зазор между пластинами.

Измерительный диапазон датчика определяется толщиной мембраны и начальным зазором между пластинами конденсатора.

В плоскопараллельном конденсаторе связь между емкостью датчика и зазором имеет гиперболический характер. Для того чтобы эта связь имела линейный характер, необходимо применить малые зазоры и малые перемещения мембраны по отношению к величине зазора. Однако практически в таких датчиках невозможно применять зазоры меньше 0,025 мм. Линейность и чувствительность датчика можно улучшить, вводя в зазор пластину из материала с высокой диэлектрической постоянной, например из слюды. Она подклеивается к неподвижной пластине датчика и соответственно уменьшает зазор. Толщина слюдяной

пластины подбирается экспериментально для каждого конкретного случая. На рис. 39 изображены зависимости емкости датчика  $C$  (или величины измерительного сигнала) от величины приложенного давления  $P$ . Кривая 1 построена при слюдяной пластине, толщина которой составляет  $0,9 H$  ( $H$ —величина зазора между пластинами); кривая 2—при  $0,6 H$ , а кривая 3—при  $0,3H$ . Толщина диэлектрической пластины должна быть такой, чтобы при наибольшем прогибе мембрана не касалась неподвижной пластины.

При измерении подвижная пластина конденсатора не остается параллельной неподвижной пластине, а приобретает некоторую кривизну. Придавая неподвижной пластине определенную кривизну, можно также улучшать линейность характеристики емкостного датчика.

Для улучшения линейности характеристики датчика диаметр плоской неподвижной пластины конденсатора должен быть равен примерно  $0,7$  диаметра мембраны. Это позволяет использовать для измерения емкости наиболее плоскую часть деформируемой мембраны.

Расчет емкостного датчика в большинстве случаев сводится к определению геометрических размеров мембраны (толщины  $h$  и радиуса  $r$ ) при заданной собственной частоте  $f$  мембраны или при заданной чувствительности  $\frac{\Delta C}{P}$ . Для мембраны, закрепленной по периметру, геометрические размеры соответственно могут быть определены по формулам

$$h = 2,32 \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E \cdot P}{\rho \cdot \sigma}} = 2,32 \left[ E \delta^3 \frac{\Delta C}{P} \right]^{\frac{1}{3}} \frac{P}{\sigma}, \quad (\text{III.4})$$

$$r = 2,5 \frac{1}{f} \sqrt{\frac{E \cdot P}{\rho \cdot \sigma}} = 2,5 \left( E \delta^3 \frac{\Delta C}{P} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\frac{P}{\sigma}}, \quad (\text{III.5})$$

где  $E$ —модуль упругости материала;  $\rho$ —плотность материала мембраны;  $\sigma$ —допустимое напряжение для материала мембраны;  $\delta$ —допустимая стрела прогиба мембраны, т. е. величина зазора между пластинами.

Связь между собственной частотой мембраны, закрепленной по периметру, и ее чувствительностью определяется так:

$$f^3 = \frac{\Delta C}{P} = \frac{1,25}{\delta^3} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}, \quad (\text{III.6})$$

причем собственная частота для такой мембраны может быть определена из выражения

$$f = 3,09 \frac{h}{r^2} \sqrt{\frac{E}{\rho^3}}. \quad (\text{III.7})$$

Кратко рассмотрим вопрос о термической стабильности емкости датчика. Суммарная величина емкости датчика  $C$  выражается формулой

$$C_0 = C + \Delta C + C_1, \quad (III.8)$$

где  $C$ —величина емкости между пластинами датчика до приложения давления;  $\Delta C$ —величина емкости, зависящая от приложенного давления;  $C_1$ —величина емкости, зависящая от изменения температуры деталей датчика.

Характер зависимости  $\Delta C = f(P)$  определяется свойствами мембраны, условиями ее закрепления и отношением ее толщины к диаметру. Для превращения изменений емкости датчика в пропорциональные изменения напряжения применяются электрические схемы, которые могут работать с использованием принципа несущей частоты, а также и без его использования. В первом случае применяются схемы, в которых высокочастотный сигнал, создаваемый ламповым генератором, подвергается в соответствии с изменениями емкости датчика амплитудной или частотной модуляции.

Известны два основных метода амплитудной модуляции, применяемых в таких измерительных приборах. Согласно первому методу датчик используется в качестве емкости резонансного контура, питаемого от генератора постоянной частоты. Изменение емкости датчика вызывает изменение резонансной частоты контура и соответствующее изменение амплитуды тока в контуре. Существует много вариантов схем с использованием резонансного контура. Положительные качества этих схем: высокая чувствительность и хорошая линейность; отрицательные качества: зависимость показаний устройства от напряжения питания, наличие нулевого тока, требующего дополнительного источника питания для компенсации, и большая чувствительность к изменению емкости кабеля, соединяющего измерительный прибор с датчиком. Последний недостаток можно устранить, располагая весь контур в корпусе датчика.

Согласно второму методу амплитудной модуляции датчик используется в качестве реактивного сопротивления в мостовой схеме, питаемой током постоянной частоты. Баланс моста осуществляется при ненагруженном датчике. При нагружении датчика происходит разбаланс моста, и в его диагонали появляется переменный ток, пропорциональный изменению емкости датчика. Измерительный мост обычно выполняется симметричным. При этом два смежных плеча собраны из емкостей, одна из которых является датчиком; два других плеча можно собрать из омических сопротивлений. Такие схемы обладают хорошей стабильностью и при ненагруженном датчике могут полностью балансироваться, т. е. начальный ток может быть снижен до нуля. Измерительный мост (или часть его) можно разместить в корпу-

се датчика, что существенно снижает влияние емкости соединительного кабеля на показания схемы.

Недостатком таких схем по сравнению со схемами, имеющими резонансные контуры, является некоторое уменьшение чувствительности.

Схемы с частотной модуляцией встречаются реже, чем рассмотренные выше схемы. Принцип работы измерителя давления с частотной модуляцией заключается в следующем. Емкость датчика включается в контур генераторной лампы таким образом, что при ее изменении происходит частотная модуляция электрических колебаний, формируемых генератором. Генераторы, применяемые в таких схемах, работают на частоте примерно 2—3 Мгц. Максимальная частотная модуляция составляет примерно 2—4%. Для уменьшения влияния емкости кабеля на работу прибора обычно в корпусе датчика устанавливают генераторную лампу и катодный повторитель.

## 2. Измерение давления с использованием пьезоэлектрического эффекта

На протяжении всей истории создания приборов для измерения давления идея использования пьезоэлектрического эффекта постоянно привлекала внимание исследователей. Наиболее широкое распространение пьезоэлектрический метод получил для измерения давления за фронтом ударных волн в жидких и газообразных средах.

С использованием керамических пьезоматериалов чувствительность и качество записи давлений этим методом существенно повысились. Естественные пьезокристаллы (кварц, турмалин, сегнетовая соль и т. п.) менее удобны в работе вследствие их малой чувствительности, нестабильности или повышенной способности к возбуждению собственных колебаний.

Совершенствование точности воспроизведения давлений в среде пьезодатчиками проводится двумя способами. При первом особое внимание обращается на уменьшение размеров воспринимающего элемента, второй способ связан с попыткой создания в элементе конечного размера соответствующих условий распространения упругой волны, допускающих точное определение изменения давления на границе пьезоэлемента.

Электрический заряд, выделяемый пьезоэлементом, определяется величиной его механической поляризации:

$$q = \int \operatorname{div} (eu) dv, \quad (\text{III.9})$$

где  $u$ , — вектор смещения;  $e$  — пьезомодуль, характеризующий

пьезоэлектрические свойства материала; интегрирование распространяется на весь объем пьезоэлемента.

Действующее на пьезоэлемент давление является граничным условием для процесса распространения напряженного состояния внутри пьезоэлемента. Основные требования, предъявляемые к пьезоэлементу, связаны с необходимостью уменьшения его линейных размеров для сокращения периода собственных колебаний до величины, много меньшей времени заметного измерения регистрируемого давления.

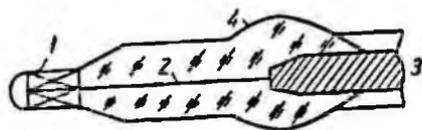


Рис. 40. Схема датчика давления ударных волн:

1 — пластины турмалина; 2 — общий электрод; 3 — экранированный кабель; 4 — корпус датчика (термореактивная смола).

Вместе с тем достигается и высокая разрешающая способность во времени вследствие сокращения времени прохождения ударной волны линейного размера пьезоэлемента. Практически нижняя граница размеров пьезоэлемента определяется его чувствительностью и конструктивными требованиями.

И. Б. Синами разработал удачные конструкции турмалиновых датчиков объемного действия с размерами пьезоэлемента до 0,5 мм. Схема одного из таких датчиков изображена на рис. 40. В качестве пьезоэлемента используются две пластины турмалина, склеенные гранями одинаковой полярности. Электрический заряд выделяется на общей внутренней и внешних гранях. Датчик обладает объемным пьезоэффектом.

Вывод с общих граней сплавляется с внутренним проводом экранированного кабеля, а весь чувствительный элемент заливается специальной термореактивной смолой, которая полимеризуется, превращаясь в прочную оболочку. Внешняя поверхность датчика экранируется специальным проводящим покрытием. Заливка смолой не только обеспечивает механическую прочность и придает соответствующую форму датчику, но и, являясь акустической «развязкой», помогает исключить возбуждение механических колебаний в пьезоэлементе. Конструкция датчика рассчитана на измерение давления ударных волн, создаваемых при подводных взрывах. Датчику придается характерная обтекаемая форма, а его рабочее положение ориентировано в направлении распространения ударной волны. Датчик выдерживает без разрушения давление в несколько сотен атмосфер.

На рис. 41 показана конструкция датчика для записи давления воли сжатия в воде с керамическим пьезоэлементом из титаната бария, выполненным из отрезка цилиндрической трубки с серебряным внутренней и внешней боковых поверхностей. Элемент поляризован в направлении радиуса трубки. Электрический заряд выделяется на гранях элемента при изменении давления

на его внешнюю поверхность. Электрические контакты спаиваются с экранированным кабелем, а весь элемент заливается пчелиным воском или терморезактивной смолой. В отличие от конструкции турмалиновых датчиков такая конструкция обеспечивает более высокую чувствительность, но имеет меньшую прочность и высокий уровень сигнала от собственных механических колебаний. Диаметр датчика составляет несколько миллиметров.

Турмалиновый пьезодатчик (рис. 42) применяется для измерения давления за фронтом детонации в газе. Боковой отвод

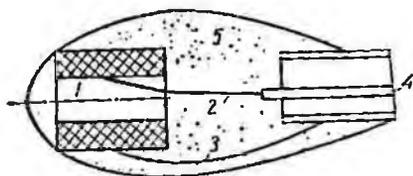


Рис. 41. Схема датчика давления акустических волн сжатия в воде:

1 — пьезоэлемент; 2, 3 — электроды; 4 — экранированный кабель; 5 — корпус (наполнитель — воск, смола).

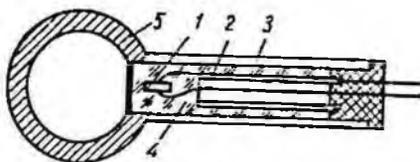


Рис. 42. Схема датчика для измерения давления детонации в газах:

1 — пьезоэлемент (турмалин); 2 — электроды; 3 — корпус бокового отвода ударной трубы; 4 — наполнитель; 5 — ударная труба.

детонационной трубы, в которой помещен пьезоэлемент, заполняется маслом или каким-либо другим составом. Пьезоэлемент свободно подвешен в массе заполнителя. Чувствительность прибора очень зависит от свойств наполнителя. Размер пьезоэлемента около 1 см. Минимальный размер пьезоэлементов у существующих датчиков составляет десятые доли миллиметра, что позволяет регистрировать быстрые изменения давления с разрешающей способностью около  $10^{-6}$  сек. В ряде случаев такая разрешающая способность достаточна для получения необходимых сведений о процессе, однако важно выяснить, существует ли принципиальная возможность дальнейшего уменьшения времени разрешения, так как длительность нарастания давления во фронте ударных волн много меньше микросекунды. Кроме того, не всегда бывает достаточной чувствительность датчиков с малыми размерами пьезоэлементов.

В работе [7] описана конструкция датчика, в котором отражение упругих волн от торцовых граней цилиндрического пьезоэлемента исключалось путем соединения кристалла с длинным стержнем того же сечения. Акустическое сопротивление металла стержня подбиралось близким к акустическому сопротивлению  $\rho C$  пьезоэлемента. Импульсные керамические пьезодатчики, в основу конструкции которых был положен такой же принцип «отвода» упругой волны из пьезоэлемента, оказались очень удобными и надежными в исследованиях [21, 23]. Акустические импедансы

керамики титаната бария и цинка близки по величине, поэтому «отводные» стержни для керамических столбиков из титаната бария изготавливаются из цинка. Простейшая конструкция такого датчика показана на рис. 43. Пьезоэлемент заключен в металлический корпус, заделанный в стенку ударной трубы. Соединение керамики с цинком производится путем склейки или спайки сплавом Вуда. Пространство между воспринимающим элементом и корпусом датчика заполняется пчелиным воском или каким-либо другим акустически изолирующим наполнителем. Специальное механическое закрепление чувствительной части пьезоэлемента и стержня отсутствует.

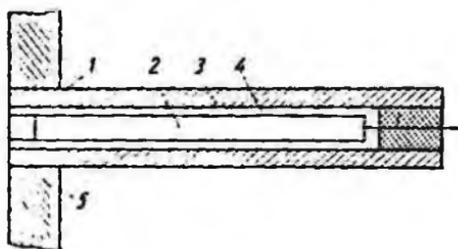


Рис. 43. Схема импульсного пьезодатчика на давление:

1 — пьезоэлемент; 2 — отводный стержень из цинка; 3 — корпус; 4 — восковая прослойка; 5 — стенка ударной трубы.

Если плоскость регистрирующего ударного фронта в газе перпендикулярна к воспринимающей поверхности датчика, пространство между корпусом и датчиком не должно быть большим во избежание воздействия волны на боковую поверхность пьезоэлемента. По той же причине не следует пользоваться керамическими столбиками малой высоты.

При сжатии пьезокристалла на его гранях создается электрический заряд, соответствующий деформации кристалла. Если измеряемое давление имеет статическую составляющую или изменяется с низкой частотой, утечка электрических зарядов с граней пьезокристалла имеет существенное значение. Для иллюстрации этого явления рассмотрим диаграмму, приведенную на рис. 44 (искажениями, создаваемыми усилителем и осциллографом, пренебрегаем). Величина смещений измерительного сигнала  $BB'$  и  $DD'$  при постоянном давлении определяется утечкой электронов. Искажения сигнала могут быть существенно уменьшены при правильном выборе параметров электрической цепи, включающей пьезоэлемент.

Для улучшения реакции пьезоэлектрического датчика на низкочастотные изменения давления необходимо, чтобы величина постоянной времени  $RC$  для электрической цепи пьезоэлемента была намного больше (примерно на порядок) длительности измеряемого давления. Для этого следует повышать либо емкость  $C$  пьезоэлемента путем включения параллельно ему дополнительного конденсатора, либо входное сопротивление регистрирующей аппаратуры. По техническим причинам повысить сопротивление до величины, большей  $10^{12}$  ом, затруднительно. Заряд

$Q$  на пьезопластинах и напряжение  $U$  на конденсаторе связаны зависимостью

$$U = \frac{Q}{C}. \quad (\text{III.10})$$

С увеличением емкости возрастает постоянная времени, но при этом величина напряжения соответственно уменьшается. Следовательно, значительное увеличение постоянной времени измерительной цепи пьезодатчика вследствие увеличения емкости  $C$  может привести к необходимости значительного повышения коэффициента усиления усилителя.

Для качественной работы измерителя давления пьезоэлектрический датчик должен иметь высокую чувствительность, высокую частоту собственных колебаний и хорошие изоляционные свойства. Чувствительность датчика определяется величиной заряда, возникающего при изменении давления на  $1 \text{ да}/\text{см}^2$  и зависит от площади мембраны датчика и распределения давления между пьезопластинами и корпусом.

В пьезоэлектрическом элементе зависимость между формируемым электрическим зарядом и вызывающим его усилением носит линейный характер, иногда нарушающийся в результате изменения распределения усилия между пьезопластиной и корпусом датчика. Обычно это наблюдается при малых нагрузках и объясняется наличием в силовой цепи датчика элементов, имеющих переменную жесткость (резьбы, шаровые опоры и т. д.). Значительного улучшения характеристик датчика можно достичь с помощью предварительного поджатия пьезопластины. Величина поджатия должна составлять примерно  $100\text{--}200 \text{ да}/\text{см}^2$ . Осуществляется оно с помощью тонкостенных упругих цилиндров или цилиндрических пружин.

Пьезоэффект существенно изменяется при превышении определенного температурного предела. Пьезоэлектрическая постоянная кварца, например, мало зависит от температуры при любых ее значениях до  $500^\circ\text{C}$ , но при дальнейшем увеличении этот параметр начинает уменьшаться и при  $573^\circ\text{C}$  кварц полностью теряет пьезоэлектрические свойства.

Поляризационные пластинки из керамики титаната бария по своим свойствам аналогичны ферромагнетикам и имеют точку

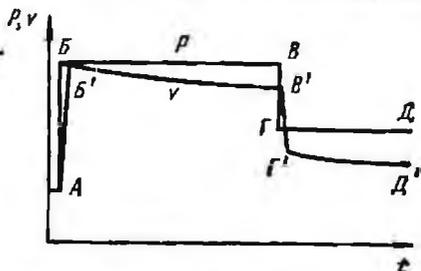


Рис. 44. Влияние утечки электрических зарядов на вид измерительного сигнала пьезоэлектрического датчика ( $AB\Gamma D$  — линия нагружения пьезоэлемента;  $AB'B'\Gamma'D'$  — изменение напряжения, возникающего на гранях пьезоэлемента).

Кюри—температуру, при которой поляризация исчезает. Для титаната бария точка Кюри лежит вблизи температуры примерно  $130^{\circ}\text{C}$ , поэтому для его пайки используется припой с составом, близким к сплаву Вуда с температурой плавления  $70^{\circ}\text{C}$ .

Частота собственных колебаний пьезопластины  $f_c$  определяется из зависимости

$$f_c = \frac{c}{h}, \quad (\text{III.11})$$

где  $c$ —скорость звука в материале пьезопластины.

Исходя из сравнительно высокой частоты собственных колебаний свободной пьезопластины, определяемой из этой зависимости, можно предполагать, что динамические свойства пьезоэлектрических датчиков очень высоки. Однако от конструктивного выполнения датчика—способа нагружения пьезопластин и их закрепления, в значительной степени зависит частота собственных колебаний пьезопластины, расположенной в датчике. Частота собственных колебаний нагруженной пьезопластины существенно отличается от соответствующей частоты свободной пьезопластины, причем на резонансной характеристике датчика может быть несколько максимумов, соответствующих различным резонансным частотам.

Для уменьшения помех при экспериментах со взрывами сигнал от пьезодатчика необходимо передавать к регистрирующей аппаратуре с помощью экранирующего кабеля. Так как цепь с пьезоэлектрическим преобразователем имеет высокий импеданс, во избежание шумов в измерительной линии сигнал от датчика должен передаваться с низким импедансом. Для понижения его при проведении экспериментов вблизи пьезоэлемента должна размещаться схема согласующегося катодного повторителя, значительно уменьшающего импеданс линии. Таким образом, трудности, связанные с помехами в линии, будут легко преодолены.

### 3. Измерение давления с помощью пьезоэлектрического манометра

Для измерения давления, развивающегося на внутренней поверхности зарядной полости при детонации замкнутого заряда ВВ, а также развития этого давления во времени был создан пьезоэлектрический манометр [11] (рис. 45). С помощью этого прибора измерялись мощные волны напряжения, которые возникали в стальном стержне (головке прибора) при детонации заряда ВВ, помешавшегося вплотную к стержню в зарядной полости.

Пьезоэлектрический манометр состоит из манометрической головки 1; корпуса манометра 2; прижимного винта с шестигран-

ной головкой 3 и датчика 4, содержащего керамический преобразователь из титаната бария 5 и эбонита 6.

Принцип действия манометра основан на измерении напряжений (создаваемых в корпусе прибора волной напряжения, перемещающейся вдоль его оси) с помощью пьезоэлектрического преобразователя. Поэтому в любом случае необходимо точно передать напряжение в корпусе к датчику. Следовательно, датчик должен быть плотно укреплен в корпусе. Для выполнения этого условия необходимо завинчивать прижимной винт в корпусе прибора до конца. Поверхность *в* прижимного винта должна быть плотно прижата к краю *а* корпуса прибора. При этом создается пространство для размещения датчика между поверхностью *в* прижимного винта и внутренней поверхностью *б* корпуса прибора.

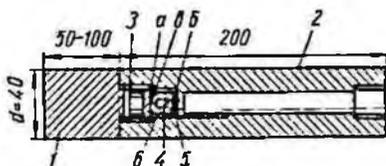


Рис. 45. Конструкция пьезоэлектрического манометра.

Предполагается, что в нормальном состоянии на датчик действует начальное напряжение в 400 *дан/см<sup>2</sup>*, измеряющееся двумя тензодатчиками, наклеенными на эбонит.

При  $\frac{F_0}{m} \geq a$ , где  $F_0$ —начальная сила, действующая на пьезоэлемент;  $m$ —масса пьезоэлемента;  $a$ —ускорение, пьезоэлектрический преобразователь, точно следует за смещением грани *б* и не отделяется от нее.

Если значение ускорения смещения, создаваемого в корпусе манометра распространением волны напряжения, меньше надкритического, волна напряжения может точно измеряться этим прибором.

Корпус прибора и прижимной винт изготавливаются из хромоникелевой стали, прошедшей термообработку. Диаграммы зависимости между напряжением и деформацией для стали, титаната бария и эбонита приведены соответственно на рис. 46, 47 и 48. Давление, действующее на преобразователь из титаната бария, уменьшалось путем подбора разности модулей упругости двух материалов.

Рассмотрим тело, состоящее из двух материалов *A* и *B*, причем материал *B* плотно включен в материал *A* (рис. 49). Когда на тело действует сила, результирующая деформация должна быть одинакова для обоих материалов. Отсюда

$$\sigma_B = \frac{E_B}{E_A} \sigma_A, \quad (\text{III.12})$$

где  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$ —наведенное напряжение соответственно материалов *A* и *B*;  $E_A$  и  $E_B$ —модули упругости соответственно материалов *A* и *B*.

Для манометра

$$\sigma_k = 40\sigma_{эб}, \quad (\text{III.13})$$

где  $\sigma_k$ —напряжение в корпусе;  $\sigma_{эб}$ —напряжение в эбоните.

Керамический преобразователь из титаната бария представляет собой круглый диск диаметром 8 мм и толщиной 3 мм; его ось поляризации параллельна оси диска. Соотношение между

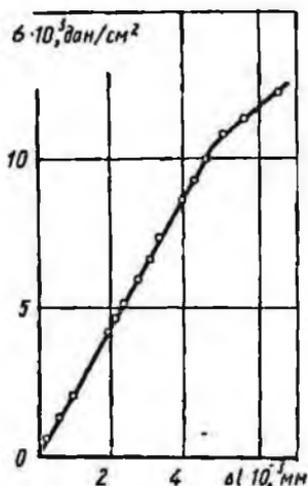


Рис. 46. График растяжения хромоникелевой стали.

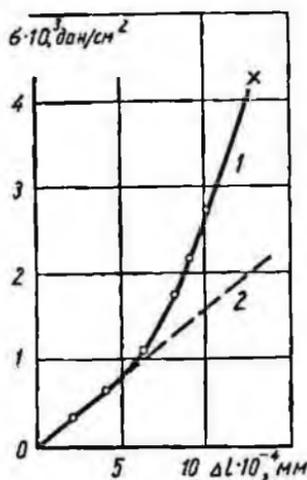


Рис. 47. График растяжения титаната бария:

1—экспериментальные значения;  
2—расчетные значения.

силой  $F$ , действующей на керамический преобразователь из титаната бария, и количеством электричества  $Q$ , появляющимся в нем, общеизвестно:

$$Q = dF, \quad (\text{III.14})$$

где  $d$ —пьезоэлектрический модуль.

Рабочая характеристика применяемого в этом манометре керамического преобразователя определена посредством испытания на ударную вязкость. На датчик, заключенный в корпус прибора, всегда налагается начальное напряжение, и поэтому при растяжении корпуса волной напряжений датчик испытывает как начальное, так и динамическое напряжение, создаваемое волной напряжений. Следовательно, при проверке рабочих характеристик имело смысл прилагать импульсную нагрузку к керамическому преобразователю из титаната бария, находящемуся в условиях, аналогичных существующим внутри корпуса прибора. На рис. 50 приведена рабочая характеристика керамического преобразователя, полученная при испытании. При прове-

дении измерений начальное и динамическое напряжения, созданные в датчике импульсной нагрузкой, измерялись двумя тензодатчиками, укрепленными на поверхности стальной колонки во взаимно противоположных точках. Диаметр стальной колонки был равен диаметру датчика; колонка располагалась вплотную к датчику.

Калибровка манометра по давлению проводилась следующим образом. Манометрическая головка длиной 10 см укреплялась в

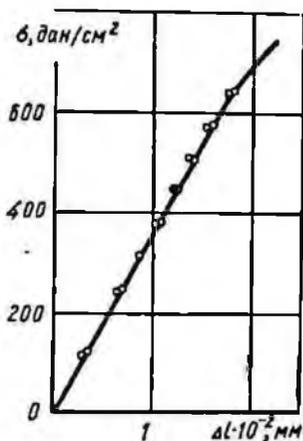


Рис. 48. График растяжения эбонита.



Рис. 49. Схема модели, состоящей из материалов А и В.

корпусе манометра и затем подвергалась воздействию взрыва детонатора № 6 в первом опыте и 45-граммового патрона динамита № 3 во втором опыте. В обоих опытах взрывчатое вещество помещалось вплотную к манометрической головке вдоль ее оси. В каждом опыте измерялось количество электричества  $Q$  (т. е. сигнал прибора), появившееся при наложении этих импульсных нагрузок.

Величина максимального напряжения в каждой волне напряжений измерялась по следующему принципу. Обычно в образце в виде стержня, подвергающегося с одного конца воздействию импульсной нагрузки, возникает волна сжатия, которая распространяется вдоль оси стержня. В этом случае напряжение  $\sigma$  в любой точке стержня может быть представлено следующим уравнением:

$$\sigma = \rho c v, \quad (\text{III.15})$$

где  $\rho$  — плотность образца;  $c$  — скорость распространения волны напряжений в образце;  $v$  — массовая скорость в волне напряжений.

Точно так же величина напряжений в любой точке образца может быть вычислена с помощью параметров  $q$ ,  $c$  и  $v$ .

Для получения таких же волн напряжений, как в предыдущих экспериментах, образец изготовлялся из такого же материала и таких же размеров, как манометрическая головка диаметром 4 см и длиной 12,8 см. Затем один конец этого образца подвергался воздействию взрыва

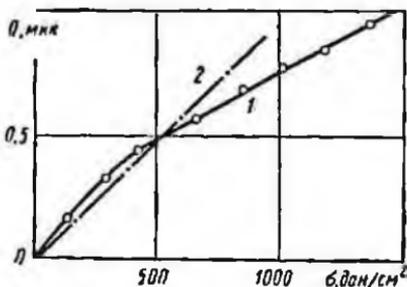


Рис. 50. График рабочей характеристики преобразователя из титаната бария:

1 — экспериментальные значения; 2 — расчетные значения.

только детонатора № 6 или же 45-граммового патрона динамита № 3. С противоположного конца измерялась массовая скорость в волне напряжений и одновременно время, необходимое для распространения волны напряжений между двумя отметками на образце и определения скорости распространения волны в образце.

В соответствии с описанной методикой пьезоэлектрический манометр был откалиброван с помощью двух известных волн напряжения и измеренных рабочих характеристик керамического преобразователя из титаната бария. Формы волн напряжений, полученные экспериментально с помощью пьезоэлектрического манометра, сравнивались с полученными по методу шайб. При этом было установлено, что волна напряжений, возникающая в боковой стенке, может быть точно зарегистрирована этим прибором.

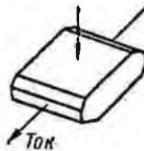
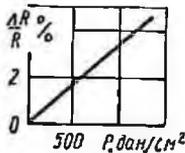
#### 4. Измерение давления полупроводниковыми датчиками

Применение полупроводников для электрических измерений механических величин долгое время было затруднено. Главное препятствие при использовании их для преобразования электрических величин—это труднокомпенсируемая и сравнительно большая зависимость свойств полупроводниковых материалов от температуры.

Типичный пример зависимости свойств полупроводников от механических воздействий—изменение сопротивления  $p$ — $n$ -перехода под влиянием давления. Пьезоэффект сопротивления в полупроводниках характеризуется тем, что сопротивление полупроводника при нагрузках свыше 1000 д.д./см² зависит от нагрузки (рис. 51). Измерения проводились на пластинке кристаллического германия типа  $n$  размерами приблизительно 5×5×0,5 мм. Форма пластинки показана на рис. 51. Чтобы исклю-

чить возможность точечного соприкосновения между плоскостью, передающей давление, и плоскостью пластинки, они тщательно шлифовались.

Большая по сравнению с рассматриваемым эффектом зависимость электрического сопротивления от температуры, несомненно, является существенным недостатком. Для германия типа *п* с удельным электрическим сопротивлением около  $5 \text{ ом}\cdot\text{см}$ , являющегося, по опытным данным, наиболее подходящим материалом,



изменение температуры на  $1 \text{ град}$  вызывает такое же изменение сопротивления, как и изменение нагрузки на  $120\text{—}130 \text{ даН/см}^2$ . Это делает проблематичной возможность статических измерений механических величин, так как при таких измерениях должна обеспечиваться хорошая стабильность

Рис. 51. Изменение сопротивления в зависимости от давления.

нулевой точки. При кратковременных измерениях меняющихся давлений это обстоятельство не имеет большого значения, однако во всех случаях потребуется определенная температурная компенсация. На рис. 52 показаны два возможных случая компенсации зависимости электрического сопротивления от температуры. В первом случае (рис. 52, а) рядом с основным измерительным кристаллом *М* располагают дополнительный кристалл *К* меньшей толщины так, что при нагрузке на кристалл *М* кристалл *К* не нарушается. Оба кристалла включаются последовательно как делитель напряжения. Более удовлетворительная компенсация температурных влияний обеспечивается во втором случае (рис. 52, б). Для регулировки и корректировки нулевой точки параллельно с кристаллом, имеющим наибольшее сопротивление, включается регулируемое сопротивление.

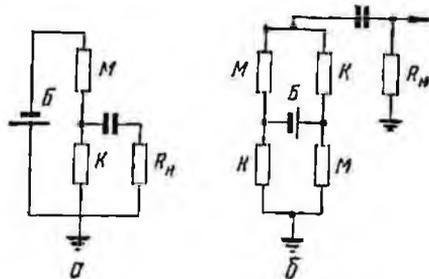


Рис. 52. Компенсация влияния температуры на германиевый датчик с помощью ненагруженного кристалла (а) и с помощью мостового включения (б).

Для статической калибровки кристалл нагружают на прессе. Измеряемое напряжение, которое снимают с кристалла, включенного по схеме делителя напряжения, определяют из соотношения

$$dU = U_0 \frac{R_K}{(R_M + R_K)^2} dR_M, \quad (\text{III.16})$$

где  $R_m$ —сопротивление измерительного кристалла;  $R_{ic}$ —сопротивление компенсационного кристалла;  $U_0$ —напряжение, приложенное к цепи, состоящей из последовательного соединения измерительного и компенсационного кристаллов.

Преимуществом измерения полупроводниковыми датчиками является в первую очередь то, что давление очень просто преобразуется в легко измеряемое изменение сопротивления. Кроме того, это изменение пропорционально нагрузке. Вследствие того что германий и кремний имеют высокий модуль упругости, можно выполнить систему с высокой собственной частотой. Недостатками измерительной системы являются упомянутая температурная погрешность и возможность использования датчика только в том диапазоне температур, в котором материал, применяемый для измерительного элемента, еще не обладает собственной проводимостью.

### 5. Измерение давления индукционными и индуктивными датчиками

Принцип действия индукционных измерителей давления основан на использовании явления электромагнитной индукции, возникающей при пересечении катушки переменным магнитным потоком. Магнитный поток в индукционном датчике изменяется вследствие изменения воздушного зазора в магнитной цепи при деформировании упругой мембраны. Электродвижущая сила  $E$ , индуцируемая в катушке при перемещении мембраны на величину  $x$  (при изменении магнитного потока  $\Phi$ ), выражается формулой

$$E = k \frac{d\Phi}{dt}. \quad (\text{III.17})$$

Так как  $d\Phi = dx$ ,

$$E = k_1 \frac{dx}{dt}, \quad (\text{III.18})$$

где  $k$  и  $k_1$ —коэффициенты пропорциональности, зависящие от параметров катушки.

При малых перемещениях мембраны (по сравнению с величиной воздушного зазора) коэффициент  $k_1$  является величиной постоянной. Так как перемещение мембраны пропорционально приложенному к ней давлению, э. д. с., возникающая в датчике, пропорциональна производной давления во времени. Для определения с помощью индукционного датчика изменения давления во времени формируемый измерительный сигнал необходимо преобразовать, пропуская через интегрирующие контуры.

Необходимо отметить, что к датчику электрическая энергия извне не подводится и измерительный сигнал формируется в нем вследствие наличия энергии среды, давление которой измеряется.

Трудность измерения статического давления в индукционном датчике можно преодолеть при питании датчика переменным напряжением. В таком датчике, называемом индуктивным, с изменением величины воздушного зазора изменяются параметры катушки. При этом происходит соответствующая модуляция протекающего в катушке переменного тока.

Изменение полного сопротивления  $Z$  катушки с сердечником при изменении ее индуктивности  $L$  определяется по формуле

$$Z = \sqrt{\omega^2 L^2 + R^2}, \quad (\text{III.19})$$

где  $\omega$ —частота питающего напряжения;  $R$ —омическое сопротивление катушки.

В большинстве индуктивных приборов несущая частота равна 3—10 кГц. При такой частоте индуктивное сопротивление  $\omega L$  катушки значительно превышает ее омическое сопротивление  $R$ , поэтому с достаточной точностью можно считать, что  $Z = \omega L$ . В таких датчиках сопротивление магнитной цепи в основном определяется воздушным зазором, причем при малых по сравнению с величиной зазора перемещениях мембраны сопротивление магнитной цепи изменяется по линейному закону.

Верхний предел частотного диапазона датчика ограничивается величиной несущей частоты, которая должна превышать измеряемую частоту гармонических пульсаций давления примерно в 10 раз. Увеличение несущей частоты ограничено повышением гистерезиса в материалах сердечника.

Одним из важнейших параметров индуктивного датчика является его относительная чувствительность

$$e = \frac{\Delta Z}{Z}, \quad (\text{III.20})$$

где  $\Delta Z$ —приращение полного электрического сопротивления датчика под воздействием измеряемого давления.

Для получения максимальной относительной чувствительности этого датчика необходимо, чтобы соотношение геометрических размеров магнитной цепи было следующим:

$$\frac{D_2}{D_1} = (2,7 \div 3); \quad \frac{D_2 - D_1}{2l} = (0,8 \div 0,9),$$

где  $D_1$  и  $D_2$  — соответственно внутренний и наружный диаметры катушки;  $l$  — высота катушки.

Индуктивный датчик включается в одно из плеч измерительного моста переменного тока, питаемого от лампового генератора. Выходной сигнал, поступающий с измерительного моста, усиливается, детектируется и подается на регистрирующий прибор.

Индукционные и индуктивные датчики могут иметь различное конструктивное оформление с различным взаимным размещением мембраны и катушек. Обычно эти датчики по габаритам больше, чем пьезоэлектрические или емкостные, и имеют более сложное устройство.

## 6. Измерение давления магнестрикционными датчиками

Для измерения давления с помощью магнестрикционных датчиков используется эффект изменения магнитной проницаемости сердечника катушки в зависимости от его деформации. Это происходит по причине изменения индуктивности катушки датчика пропорционально приложенному давлению. Как известно, магнитная проницаемость некоторых ферромагнитных материалов существенно зависит от величины внутренних механических напряжений. Этот эффект особенно проявляется в железоникелевых и железокобальтовых сплавах и может быть усилен соответствующей термической обработкой.

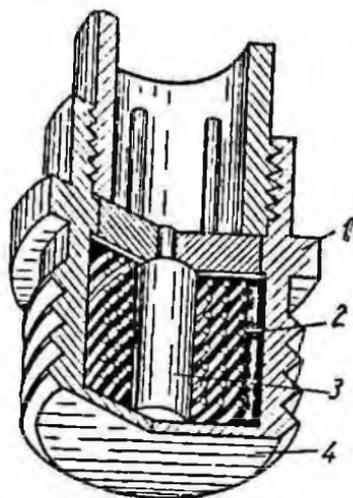


Рис. 53. Магнестрикционный датчик давления.

В магнестрикционном датчике (рис. 53), работающем на переменном токе, упругая мембрана 4, выполненная как одно целое с корпусом 1, опирается на сердечник 3 катушки 2 и передает ему воспринимаемое усилие. Обмотка катушки питается от

лампового генератора переменного тока частоты 5—10 кГц. Под действием измеряемого давления изменяется сопротивление магнитной цепи датчика, вызывающее соответствующую модуляцию сигнала.

Датчик включается в одно из плеч сбалансированного измерительного моста. При измерении быстро меняющихся давлений целесообразно применять магнестрикционные датчики, работающие на постоянном токе. В таких датчиках на сердечнике располагаются две обмотки: намагничивающая и измерительная. Через намагничивающую обмотку пропускают постоянный ток для создания постоянного магнитного потока в сердечнике. При приложении давления к сердечнику изменяется коэффициент его магнитной проницаемости, а во второй обмотке вследствие изменения величины магнитного потока индуцируется э. д. с. Верхний предел частотного диапазона такого устройства

несколько выше, чем в случае применения переменного магнитного поля.

Для изготовления сердечников магнитоотрицательных датчиков в основном применяются железоникелевые сплавы (пермаллой), эффект магнитоупругости которых сравнительно велик. Недостатком магнитоотрицательных датчиков давления является влияние влияния магнитного гистерезиса с ростом частоты измеряемых пульсаций. Поэтому рассматриваемые устройства имеют низкий верхний предел частотного диапазона. Все это значительно ограничивает возможности их повторного применения для измерения импульсивных давлений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Абрикин А. Л. — Приборостроение, 1959, 6.
2. Баранчук Е. И. — Автоматика и телемеханика, 1950, XI, 3.
3. Боднер В. А. О выборе параметров регулируемых систем. Оборонгиз, М., 1959.
4. Виноградов Р. И. — Измерительная техника, 1962, 6.
5. Волчок Л. Я. Методы измерения в двигателях внутреннего сгорания. Mashgiz, М., 1959.
6. Гуревич М. А. — В кн.: Научно-технический информационный бюллетень (физико-математические науки), 12. Изд. ЛПИ, 1957.
7. Зайцев С. Г. — ПТЭ, 1958, 6.
8. Зобель К. — В кн.: Полупроводниковые приборы в измерительной технике. «Энергия», М., 1964.
9. Зубин-Ивановский В. П. — В кн.: Вестник транспортной академии, 163. Изд. ВИА, М., 1960.
10. Иванов В. И. — Изв. вузов. Электромеханика, 1958, 9.
11. Ичиро Ито и Коичи Сасса. — В кн.: Разрушение и механика горных пород. Госгортехиздат, М., 1962.
12. Камышинский Б. А. и Майзель М. Б. — Приборостроение, 1958, 12.
13. Лялин В. Г. — Изв. вузов. Машиностроение, 1958, 7 и 8.
14. Лялин В. Г. Автореферат канд. дисс., МВТУ, 1960.
15. Медвинский М. Д. — В кн.: Измерение напряжений и усилий в деталях машин. Mashgiz, М., 1955.
16. Одинцов А. А. — Приборостроение, 1961, 4, 6.
17. Рабинович А. Д., Фрадкий В. М., Фрайман А. И. — Измерительная техника, 1955, 4.
18. Синяи И. Б. — ПТЭ, 1957, 4.
19. Синицын Б. С. — В кн.: Труды конференции по автоматическому контролю и методам электрических измерений. Изд-во АН СССР, М., 1961.
20. Соколик А. И., Станиславский А. И. — В кн.: Передовой научно-технический и производственный опыт (бюллетень), П-57-29/8. Изд. филиала ВИНТИ, 1957.
21. Солоухин Р. И. — ПТЭ, 1961, 3.
22. Солоухин Р. И. Ударные волны и детонация в газах. Физматгиз, М., 1963.
23. Топчий М. Е. — ПМТФ, 1962, 4.
24. Туричин А. М. и Новицкий П. В. Проволочные преобразователи и их техническое применение. Госэнергоиздат, М., 1957.
25. Чернышев К. В. — ПТЭ, 1959, 6.
26. Чехонадский И. А. — В кн.: Исследования по методике оценки погрешностей измерений. Стандартгиз, М., 1962.
27. Шахмарданов Ш. М. — Изв. вузов. Нефть и газ, 1961, 5.

Поляризационно-оптический метод измерения напряжений относится к числу методов моделирования. Сущность этого метода в использовании упруго-оптического эффекта для измерения напряжений в модели из прозрачного материала, геометрически подобной исследуемому объекту. Метод основан на способности большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, бакелит, целлулоид, отвержденные эпоксидные смолы и др.) приобретать свойства двойного лучепреломления под действием напряжений.

Упруго-оптический эффект, количественно выраженный через порядок  $n$  изохромы, можно рассматривать как функцию двух переменных: относительного удлинения  $\epsilon$  и нормального напряжения  $\sigma$ , причем преобладающее влияние оказывает изменение относительного удлинения:

$$n = f_1(\epsilon) + f_2(\sigma). \quad (IV.1)$$

Поскольку в материале для изготовления оптических моделей, формируемых в пределах упругости, необходима строгая пропорциональность между напряжением и относительным удлинением, то можно считать, что при оптическом методе измеряется и напряжение, и деформация.

Оптический метод позволяет относительно точно определить напряжения во всей исследуемой модели. Измерение напряжений непосредственно в массиве (например, пьезодатчиками) производится в ограниченном числе точек. В связи с этим иногда довольно трудно получить представление о распределении напряжений во всем объекте и точно определить точки, в которых имеют место наибольшие напряжения. Поэтому оптический метод определения напряжений целесообразно применять в тех случаях, когда требуется получить общую картину распределения напряжений.

#### 1. Основы оптического метода определения плоского напряженного состояния

Оптический метод определения напряжений позволяет исследовать распределение напряжений, как указывалось выше, только на моделях из прозрачного изотропного материала путем про-

свечивания их поляризованным светом. В качестве поляризаторов чаще всего используются искусственно изготовленные поляроиды, представляющие собой два склеенных стекла с пленкой между ними. Пленка содержит кристаллы герпатита, обладающие свойством двойного лучепреломления.

При пропускании света через прозрачную кристаллическую пластинку с различной ориентировкой плоскостей колебаний световая волна разлагается на две составляющие, соотношение которых зависит от ориентировки исходной плоскости колебаний относительно всей симметрии кристалла. В результате получаются две световые волны (1 и 2), имеющие взаимно перпендикулярные плоскости колебаний и распространяющиеся внутри кристалла с различными скоростями. При выходе из кристаллической пластинки волны оказываются сдвинутыми по фазе на угол  $\phi$  (рис. 54, а). В общем случае, когда угол падения светового луча не равен  $90^\circ$ , различные скорости распространения двух соответствующих лучей в кристалле приводят к неодинаковому их преломлению. В связи с этим при рассматривании какого-либо предмета через косо поставленную кристаллическую пластинку с двойным лучепреломлением наблюдается двойное изображение предмета. При угле падения, равном  $90^\circ$  (рис. 54, б), как это обычно имеет место при исследовании напряжений оптическим методом, направления распространения обеих составляющих волн совпадают, что позволяет с помощью установленного за моделью поляроида осуществить интерференцию. Дихроическая кристаллическая пластинка поглощает одну из составляющих волн и действует как фильтр-поляризатор (рис. 54, в).

Основные соотношения между напряжениями при плоском напряженном состоянии, необходимые для получения зависимости между напряжениями и упруго-оптическим эффектом, могут быть получены с помощью круга напряжений Мора (рис. 55). Для круга напряжений, построенного с полюсной точкой, не требуется установления правила знаков для угла, определяющего направление исследуемой плоскости, а также для других углов. Из рис. 55 видно, что для определения нормального и касательного напряжений в любой плоскости достаточно провести через полюс прямую, параллельную нормали к исследуемой плоскости.

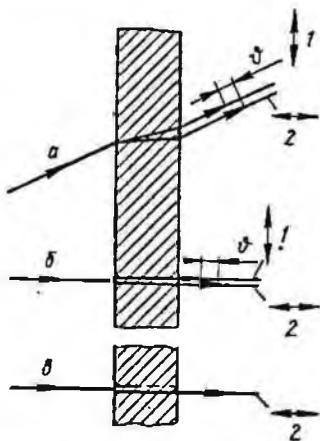


Рис. 54. Явление двойного лучепреломления в кристаллической пластинке.

Положение полюса получают как точку пересечения окружности с прямой, параллельной направлению главного напряжения  $\sigma_1$  (или  $\sigma_2$ ), действующего на элемент тела и проведенного через точку  $\sigma_1$  (или  $\sigma_2$ ) на диаграмме. Остальные условия сводятся к неравенству  $\sigma_1 > \sigma_2$  и к правилу знаков для касательных напряже-

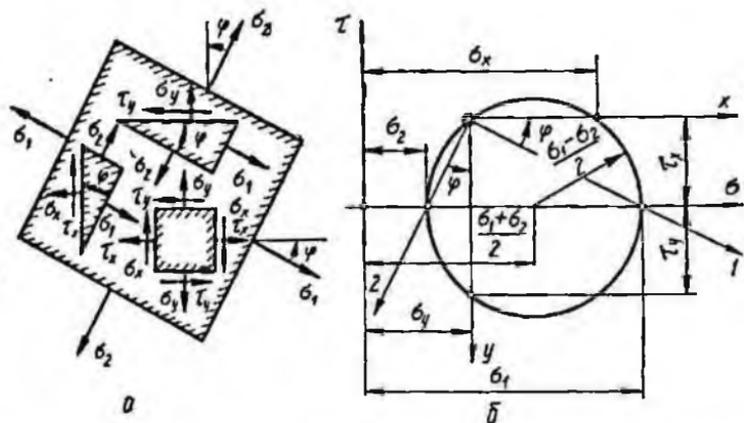


Рис. 55. Ориентировка сечений (а) и круг Мора с полюсом для плоского напряженного состояния при  $\sigma_1 - \sigma_2 \geq 0$  (б):  
1 и 2 — главные направления;  $x$  и  $y$  — произвольно перпендикулярные направления.

ний, при котором положительным считается касательное напряжение, дающее момент для рассматриваемого элемента по часовой стрелке.

Для касательных напряжений вместо обычного обозначения  $\tau_{xy}$  введены два обозначения  $\tau_x$  и  $\tau_y$ , причем  $\tau_x = -\tau_y$ . Из круга Мора для напряжений можно получить следующие соотношения, играющие важную роль в определении напряжений оптическим методом:

$$\sigma_\varphi = \sigma_x = \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_2) + (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi]; \quad (IV.2)$$

$$\sigma_{\varphi+90^\circ} = \sigma_y = \frac{1}{2} [(\sigma_1 + \sigma_2) - (\sigma_1 - \sigma_2) \cos 2\varphi]; \quad (IV.3)$$

$$\tau_{\varphi, \varphi+90^\circ} = \tau_{x,y} = \pm \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2) \sin 2\varphi; \quad (IV.4)$$

$$\tau_{\max} = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_2). \quad (IV.5)$$

Наиболее простая установка для исследований напряжений оптическим методом может быть собрана из источника света (желательно монохроматического) и двух скрещенных полярои-

дов—поляризатора и анализатора,—между которыми устанавливается модель (рис. 56). Составляющие волны, которые возникают после прохождения света через модель, сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол  $\theta$ . Благодаря наличию анализатора происходит интерференция этих волн, причем целым значениям порядка интерференции  $n=0, 1, 2, \dots$  соответствуют темные линии на светлом фоне, образующие так называемую картину изохром (рис. 57) или картину полос (при монохроматическом свете), каждая из которых является геометрическим местом постоянной разности главных напряжений. На основании порядка полосы-изохром  $n$  и определенной путем тарирования цены полосы можно найти разность главных напряжений в рассматриваемой точке модели по формуле

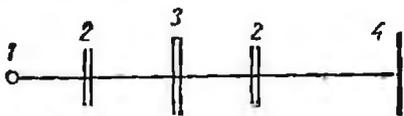


Рис. 56. Схема простейшего полярископа:

1 — источник света; 2 — поляризаторы; 3 — модель; 4 — фоторегистрирующая установка.

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n\sigma_0^{(t)}, \quad (IV.6)$$

или по формуле

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{\sigma_0^{(1,0)}}{t}, \quad (IV.7)$$

где  $\sigma_0^{(t)}$ —цена полосы для модели данной толщины  $t$ ,  $\text{дан/см}^2$ ;  $\sigma_0^{(1,0)}$ —цена полосы для материала, соответствующая цене полосы для модели толщиной  $1 \text{ см}$ ,  $\text{дан/см}^2$ .

Величины  $\sigma_0^{(t)}$  и  $\sigma_0^{(1,0)}$  зависят от длины волны света  $\lambda$ . Формула (IV.7) является основным уравнением оптического метода определения напряжений. Следовательно, для определения по этой формуле значения  $\sigma_1 - \sigma_2$  необходимо знать порядковый номер полосы  $n$  и цену полосы материала  $\sigma_0^{(1,0)}$ , которая определяется предварительно при чистом растяжении или сжатии тарировочного образца. Однако такой метод определения цены полосы материала пригоден лишь для исследования статических нагрузок. При изучении полей напряжений, возникающих при импульсивных нагрузках, цену полосы можно определить с помощью пьезоэлектрических датчиков, размещаемых в материале модели.

Описанный метод исследования позволяет непосредственно получить в каждой точке модели только разность главных напряжений. При этом следует иметь в виду, что полосы-изохром представляют собой линии равных наибольших касательных на-

пряжений  $\tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$  в плоскости главных напряжений  $\sigma_1$

и  $\sigma_2$ . Однако величины  $\tau_{\max}$  представляют собой максимальные касательные напряжения для точек плоской модели, если главные напряжения  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$  имеют разные знаки. В противном случае максимальное касательное напряжение равно  $\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$  или  $\frac{1}{2}(\sigma_2 - \sigma_3)$ , где  $\sigma_3 = 0$ , и представляет собой третье главное напряжение, нормальное к плоскости модели.

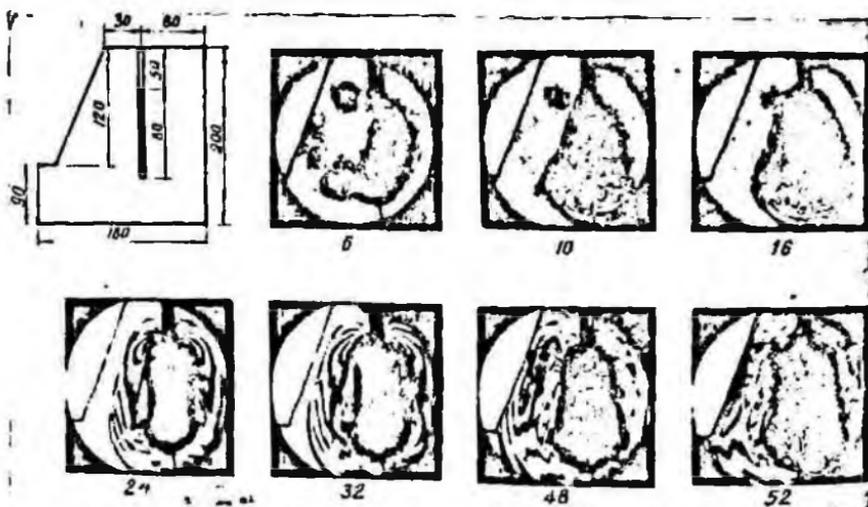


Рис. 57. Распространение поля изохром (цифры означают время от начала взрыва в мксек).

Когда одно из главных напряжений  $\sigma_1$  лежит в плоскости поляризации света, падающего на модель, свет, проходящий через модель, не разделяется на составляющие волны, а проходит через модель неизменным и полностью поглощается в анализаторе. Геометрическое место точек для данного случая представляет собой систему непрерывных черных линий (изоклин), не зависящую от величины нагрузки и возникающую одновременно с изохромами.

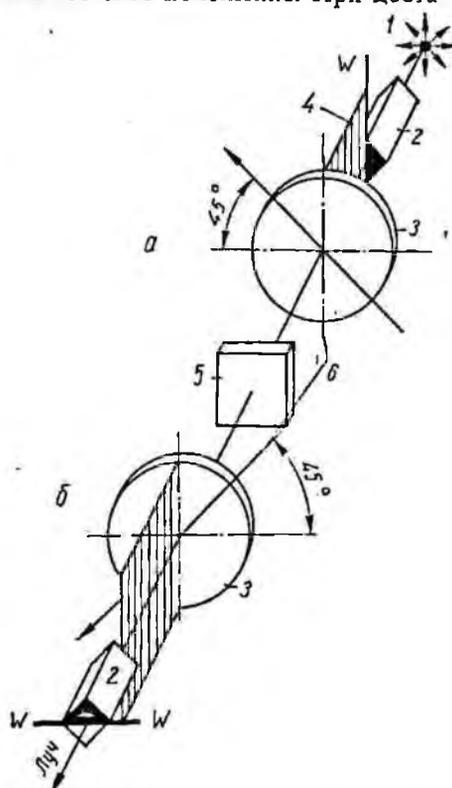
Изоклины меняют свое положение при неподвижной модели и одновременном вращении скрещенных поляризатора и анализатора и всегда бывают черными даже при использовании источника белого света. Эти свойства позволяют отличить изоклины от изохром, окрашенных в разные цвета при источнике белого света и не меняющих своего положения при вращении поляризатора и анализатора.

При пользовании поляризационно-оптическим методом определения напряжений важно иметь возможность отделять изохро-

мы от изоклин. Для получения одних только изокром можно вращать скрещенные поляризатор и анализатор относительно модели, при этом изоклины меняют свое положение. При достаточно большой скорости вращения поляризатора и анализатора скорость перемещения изоклин так велика, что наблюдать их невозможно, и на картине остаются одни только изокромы. Подобный эффект вращения плоскости поляризации можно получить оптическим путем с помощью так называемых пластинок в четверть волны  $\left(\frac{1}{4} \lambda\right)$ . Пластинка

в  $\frac{1}{4} \lambda$  представляет

собой кристаллическую пластинку или пленку с двумя оптическими осями симметрии, лежащими в плоскости пластинки. Толщина пластинки подобрана таким образом, что проходящая эту пластинку плоско поляризованная волна света разлагается на две волны со взаимно перпендикулярными плоскостями колебаний, сдвинутыми по фазе при выходе из пластинки относительно друг друга на угол  $\vartheta = \pi/2$ . Эти две волны (рис. 58) эквивалентны при любой фазе вектору, вращающемуся вокруг оптической оси установки с угловой скоростью, равной угловой частоте колебаний света (круговая поляризация света). Вторая пластинка в  $\frac{1}{4} \lambda$ , установленная перед анализатором аналогичным образом, устраняет это вращение вектора.



Свет погашен

Рис. 58. Перестройка полярископа с круговой поляризацией света на плоскую поляризацию путем перестановки поляризатора и анализатора:

*a* — круговая поляризация света (только для получения изокром); *b* — плоская поляризация света (для получения изоклин и изокром); 1 — источник света; 2 — поляризатор; 3 — пластинка в  $\frac{1}{4} \lambda$ ; 4 — плоско поляризованный луч; 5 — напряженная модель; 6 — оптическая ось.

Если поставить каждую из пластинок в  $\frac{1}{4}\lambda$  в одной опра-  
ве соответственно с поляризатором и анализатором, то, меняя  
местами поляризатор и анализатор, можно переходить на одной  
и той же оптической установке от круговой поляризации света  
для наблюдения только изохром к плоской поляризации света  
для одновременного наблюдения изоклин и изохром.

Определяемое оптическим методом распределение напряже-  
ний в модели должно совпадать с распределением напряжений  
в реальной среде. Модель должна быть геометрически подобна  
натурному объекту и выполнена с учетом подобия деформаций.  
Нагружение модели должно быть физически подобно нагруже-  
нию натурного объекта.

## 2. Материалы для изготовления моделей

Возможности оптического метода исследований, его точность и  
надежность определяются прежде всего свойствами и качеством  
материала моделей. Поэтому особо важен вопрос об оптически  
активных материалах для изготовления моделей. Оптически ак-  
тивные материалы, предназначенные для изготовления моделей,  
должны отвечать следующим требованиям: быть прозрачными;  
обладать высокой оптической чувствительностью; не иметь на-  
чальных напряжений; быть изотропными и иметь линейную за-  
висимость между напряжениями и деформациями; иметь доста-  
точную жесткость; обладать постоянными физико-механически-  
ми свойствами при умеренных температурах; легко поддаваться  
механической обработке; иметь небольшую стоимость.

При оптическом методе исследования напряжений, возника-  
ющих под действием внешних нагрузок, используются следующие  
группы оптически активных материалов: неорганические  
стекла и высокомолекулярные соединения (целлулоид, плексиг-  
лас, литой полистирол, фенолформальдегидные смолы, отвер-  
жденные эпоксидные смолы и др.). Обе группы оптически актив-  
ных материалов и каждый материал в отдельности имеют не-  
достатки, которые ограничивают область их применения. Наи-  
более широкое применение имеют материалы второй группы.  
Рассмотрим некоторые из них. Целлулоид применяется с 1906 г.  
Он достаточно прозрачен, изотропен, оптическая чувствитель-  
ность его в пять раз выше, чем у стекла. Недостаток целлулои-  
да — сравнительно низкая механическая прочность.

В начале 20-х годов этого столетия были получены фенол-  
формальдегидные смолы (фенопласты), к которым относятся  
бакелит, фенолит, марблет, декорит и др. Бакелит удовлетво-  
ря-

ет большинству основных требований, предъявляемых к оптически активным материалам: прозрачен, достаточно тверд. Недостатком его является значительная хрупкость, что затрудняет обработку обычным режущим инструментом.

Для исследования процессов, происходящих при приложении взрывных нагрузок, можно применять материалы, в состав которых входит канифоль с различными пластификаторами. Наиболее высококачественный материал получается при соотношении канифоли и вазелинового масла 4 : 1. Материал прозрачен, имеет светло-желтый цвет, дает яркую изохроматическую картину, допускает высокую степень пластической деформации при значительных ее скоростях, может многократно переплавляться.

Хороший оптически активный материал получается из сплава канифоли и диоксинбутадиенового углеводорода ( $C_{20}H_{22}O_2$ ) при соотношении компонентов 1 : 2. Этот материал прозрачен, допускает многократную переплавку. При больших скоростях нагружения материал разрушается хрупко, при малых — деформируется пластически.

За рубежом для изготовления моделей в основном применяются эпоксидные смолы разных марок (в частности, аральдит), фенолформальдегидные смолы типа бакелита, фостерита, троллона, полиэфирные и глифталевые смолы, плексиглас, полистирол, желатин и др. Основные физико-механические свойства некоторых оптически активных материалов приведены в табл. 7. Из данных этой таблицы видно, что модуль упругости большинства применяемых оптически активных материалов находится в пределах 15 000—5000  $дан/см^2$ , вследствие чего применение последних ограничено.

Таблица 7

Физико-механические свойства некоторых оптически активных материалов

Материал	Цена полосы материала, $дан/см^2$ (для $\lambda = 564 м.мкм$ )	Предел прочности при изгибе, $дан/см^2$	Предел пропорциональности, $дан/см^2$	Модуль продольной упругости, $дан/см^2$	Коэффициент Пуассона
Стекло	160—500	—	—	$(0,5—1,2) \cdot 10^8$	0,25
Целлулоид	40—70	400—600	300—400	$1,5 \cdot 10^4$	0,4
Органическое стекло	200	500	200	$2,5 \cdot 10^4$	0,35
Фенолформальдегидная пластмасса (типа вискомит)	12	1500	600	$(3,5—4,5) \cdot 10^4$	0,36
Эпоксидная смола ЭД-6М	11	1200—1400	500	$(3,3—3,5) \cdot 10^4$	0,37

При изучении на моделях напряженного состояния горного массива, подверженного импульсным нагрузкам, зачастую необходимо иметь разномодульные оптически активные материалы, так как горный массив может состоять из отдельных слоев с различными физико-механическими свойствами.

Наиболее подходящими материалами для исследования поля напряжений, возникающего при приложении взрывных нагрузок, являются стекло, целлулоид, органическое стекло, канифоль в сочетании с различными пластификаторами и эпоксидные смолы. Среди указанных оптически активных материалов, пригодных для моделирования различных задач, видное место занимают отвержденные эпоксидные смолы. Эпоксидные смолы получают путем конденсации некоторых двухатомных фенолов, например диоксидифенилпропана или резорцина с эпихлоргидрином или с дихлоргидрином глицерина в щелочной среде.

Эпоксидные смолы — это вязкие, малолетучие при обычных температурах (18—30° С) жидкости от янтарного до темно-коричневого цвета; удельный вес их колеблется в пределах 1,16 — 1,44 г/см<sup>3</sup>. Они растворимы в некоторых сложных эфирах, эфирспиртах, хлорированных углеводородах и не растворимы в воде и минеральных маслах.

При нагревании эпоксидных смол до 60° С и выше выделяют летучие вещества, в составе которых содержатся эпихлоргидрин и толуол. Летучие соединения из эпоксидных смол обладают слабо выраженным раздражающим и общетоксическим действием. Эпоксидные смолы могут вызывать заболевания кожи аллергического характера не только при непосредственном контакте со смолой или ее отвердителем, но и при действии низких концентраций паров из указанных продуктов. Поэтому все работы со смолой и ее отвердителями следует вести обязательно в вытяжном шкафу.

В качестве отвердителей эпоксидных смол широко применяются органические и неорганические кислоты и их ангидриды (фталевый и малеиновый), а также алифатические и ароматические амины (этилендиамин, гексаметилендиамин, полиэтиленполиамин и др.). Отвердителями могут быть и смолы — фенол- или мочевино-формальдегидные полиамиды и др. Отвержденные эпоксидные смолы характеризуются высокой механической прочностью и химической стойкостью.

Отличительной способностью материалов на основе эпоксидной смолы является их высокая оптическая активность, в связи с чем они могут применяться при исследовании как плоских, так и объемных моделей. Кроме того, эти материалы имеют высокий предел упругости. Краевой эффект времени, т. е. самопроизвольное изменение порядка полос у краев модели со временем, в эпоксидной смоле невелик. Указанные свойства позволяют широко использовать эпоксидные смолы для изготовления моделей

различного назначения и исследовать распределение напряжений в них методом фотоупругости. В СССР материалы на основе эпоксидных смол ЭД-6 и Э-40 впервые были разработаны в Институте машиноведения АН СССР совместно с Институтом пластмасс. Эти материалы имели модуль упругости около 30 000  $\text{дан/см}^2$ . В последнее время оказалось возможным получить на базе эпоксидных смол серию материалов с широким диапазоном изменения модуля упругости.

Значительного диапазона изменения модуля упругости можно достичь при добавлении в первоначальный состав дибутилфталата. Так, при изменении количества дибутилфталата в пределах 5—40 г при 30 г малеинового ангидрида на 100 г смолы можно получить оптически активные материалы с модулем упругости 32 000—39 000  $\text{дан/см}^2$ .

Проделана большая работа по изготовлению оптически активных материалов на основе эпоксидных смол. Однако данных, указывающих пути получения материала с определенными свойствами, в литературе явно недостаточно. Это затрудняет подбор материала с заранее заданными физико-механическими свойствами при моделировании.

В лаборатории горного давления ИГД им. А. А. Скочинского проводились исследования по разработке рецептуры и технологии получения оптически активных материалов на основе эпоксидных смол с более широким диапазоном модуля упругости. При исследовании влияния пластификаторов (дибутилфталата) на модуль упругости материала последний вводился в количестве 5—40 г на 100 г смолы при постоянном содержании отвердителя (30 г малеинового ангидрида на 100 г смолы).

В результате были получены оптически активные материалы на базе эпоксидных смол с такими модулями упругости:

Количество пластификатора на 100 г смолы, г	—	5	10	15	20	25	30	35	40
Модуль упругости при комнатной температуре, $\text{дан/см}^2$	32400	30800	30300	28300	24400	13300	7960	4890	3950

Как видно из приведенных данных, содержание дибутилфталата существенно влияет на величину модуля упругости, начиная примерно от 20 г на 100 г смолы.

При введении дибутилфталата с одновременным снижением в смеси процентного содержания малеинового ангидрида модуль упругости материала может быть еще больше снижен. Например, при соотношении компонентов в смеси: 30 г дибутилфталата и 20 г малеинового ангидрида на 100 г смолы можно получить материал с модулем упругости 600  $\text{дан/см}^2$ . Исследования по

изучению изменения модуля упругости эпоксидных смол во времени показали, что с течением времени модуль упругости отвержденной эпоксидной смолы ЭД-6 уменьшается на 7—18%.

### 3. Методы фоторегистрации процесса распространения поля напряжений

Скорость распространения волн напряжений в твердых телах составляет 2000—7000 м/сек. Столь высокая скорость требует применения специальной скоростной фоторегистрирующей аппа-

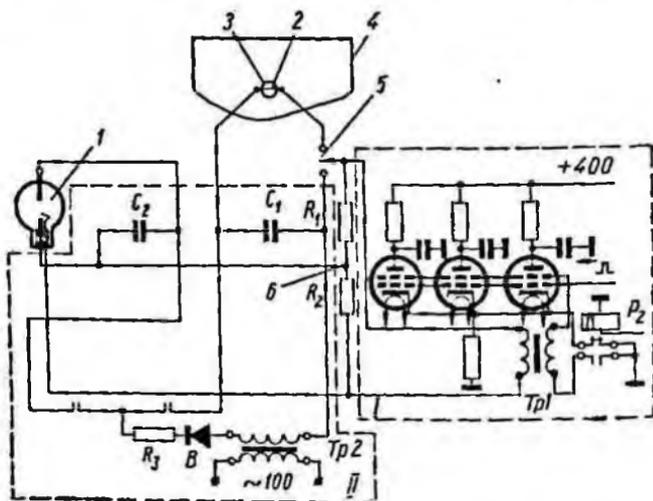


Рис. 59. Схема синхронизации вспышки импульсной лампы со взрывом и рабочим положением зеркала.

ратуры. Для регистрации быстропротекающих процессов в СССР наибольшее распространение получила сверхскоростная фоторегистрирующая установка СФР различных модификаций. Эта установка позволяет в варианте лупы времени регистрировать процесс с частотой съемки 2500—2 500 000 сек<sup>-1</sup>. Фоторегистрация осуществляется на неподвижной пленке с помощью вращающегося зеркала. Максимальная скорость развертки изображения на пленку составляет 3750 м/сек. При таких высоких частотах съемки для нормального экспонирования кинопленки необходимо интенсивное освещение фотографируемого объекта. Длительность освещения не должна превышать периода вращения зеркала кинокамеры, чтобы не происходило повторного экспонирования изображения. Таким требованиям удовлетворяют импульсные источники света. В конкретных случаях в качестве

источника света может быть использована импульсная лампа ИСШ-100-2. Максимальная яркость свечения лампы равна  $10^7$  св.

Для регистрации процесса во времени необходимо совмещать во времени три фактора: рабочее положение зеркала, начало исследуемого явления и начало вспышки импульсной лампы.

Перед началом съемки процесса взрыва модели 4 дополнительная схема II (рис. 59) выдает высокое напряжение (примерно 3,5 кв), которое накапливается на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$ . Напряжение с конденсаторов подается на электроды импульсной лампы подсветки I типа ИСШ-100-2 и на электроды разрядного промежутка. В качестве разрядного промежутка можно использовать такую же импульсную лампу.

Цепи зарядов и разрядов конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  обособлены, что позволяет заряжать конденсаторы независимо один от другого. В цепь разряда конденсатора  $C_1$  включается импульсная лампа. В цепь разряда конденсатора  $C_2$  через разрядный промежуток 5 подключается электродетонатор. Когда зеркало камеры принимает рабочее положение, соответствующее регистрации процесса на киноплёнку, генератор инициирующего импульса (схема I) в пульте управления выдает высоковольтный импульс амплитудой 50 кв. Этот импульс выделяется на делителе 6 и с него подается на поджигающие электроды ламп подсветки и разрядника. При поступлении импульса на поджигающие электроды ламп между катодом и поджигающим электродом проскакивает искра, что вызывает разряд конденсаторов. При разряде конденсатора  $C_1$  происходит вспышка импульсной лампы, при разряде  $C_2$  — подрыв электродетонатора 2 и заряда ВВ 3.

При моделировании короткозамедленного взрывания возникает необходимость задержки взрыва одного заряда относительно другого. Задержка взрыва может осуществляться при использовании для инициирования зарядов константановых нитей разного диаметра. Последовательное соединение таких нитей (те из них, которые имеют больший диаметр, сгорают несколько позже) обеспечивает задержку взрыва одного заряда по отношению к другому. Комбинируя диаметры константановых нитей, можно в некоторых пределах получить необходимую задержку взрыва

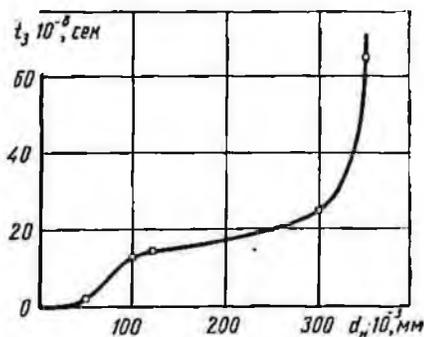


Рис. 60. Зависимость времени задержки взрыва от диаметра константановой нити.

одного заряда относительно другого. Зависимость времени задержки взрыва  $t_2$  от диаметра нити  $d_n$  показана на рис. 60.

В некоторых случаях необходимо параллельно с фоторегистрацией процесса записывать на катодном осциллографе показания датчиков, установленных на модели или встроенных в модель. В этом случае необходимо синхронизировать во времени запуск осциллографа с моментом взрыва. Для обеспечения син-

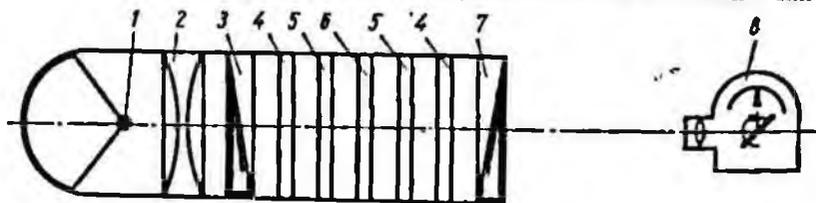


Рис. 61. Схема поляризационной установки:

1 — источник света; 2 — конденсор; 3, 7 — поляроиды; 4 — пластины в  $1/4$ ; 5 — защитные стекла; 6 — модель; 8 — установка ССФ.

хронизации параллельно обмотке трансформатора генератора инициирующего импульса помещается индукционная катушка. При индуктировании во вторичной обмотке трансформатора инициирующего импульса в катушке в свою очередь индуктируется импульс, который подается на запуск осциллографа.

Для исследования поля напряжений, возникающего от взрыва, в моделях из оптически активных материалов применяется поляризационная установка (рис. 61).

#### 4. Изготовление, исследование и подготовка моделей к взрыву

Модели вырезаются из готовых пластин оптически активных материалов или отливаются в специальные формы. Формы для плоских плиток изготавливаются клееными или разборными. Для однократного использования целесообразно применять клееные формы, собираемые из двух пластинок зеркального стекла и прокладок (стеклянных или металлических) для боковых и нижних стенок). Для многократного использования следует рекомендовать сборные формы, боковые стенки которых изготавливаются из отполированной стали. В этом случае части формы можно скреплять болтами.

Эпоксидная смола как наиболее распространенный материал для изготовления моделей обладает высокой адгезией ко многим материалам. Для того чтобы готовая отливка свободно отделялась от стенок формы, последние перед заливкой необходимо тщательно вымыть и вычистить, протереть ацетоном или спиртом и покрыть специальной пленкой, предотвращающей прилипание

смолы к поверхности формы. Для покрытия стеклянных поверхностей пленкой применяют свежий 0,5—1%-ный раствор триацетата целлюлозы в хлористом метиле. Предварительно обезжиренные стекла ополаскивают этим раствором и просушивают на воздухе при комнатной температуре. После просушки на стекле образуется тончайшая триацетатная пленка. Такая обработка делается дважды. Для обработки металлических форм применяются растворы кремнийорганического каучука марки СКТ или полиизобутилена в толуоле (на 100 г толуола 5 г СКТ или полиизобутилена).

При обработке поверхностей формы раствором кремнийорганического каучука в толуоле форму после очистки и обезжиривания прогревают в термостате при температуре 60—70° С, затем ополаскивают приготовленным раствором и ставят в термостат при температуре 80—90° С до полного высыхания. Такая обработка делается дважды.

Для отвешивания требуемого количества смолы ее подогревают на водяной бане или в термостате до температуры 70—80° С, что придает ей большую подвижность. Предварительно отвешенный малеиновый ангидрид расплавляют в закрытом сосуде (температура плавления 51° С), заливают в разогретую смолу и тщательно перемешивают в течение 7—10 мин, поддерживая температуру смеси, равной 80° С. После перемешивания смесь заливают в формы, подогретые до 60—70° С. Залитые формы переносят в термостат, температура в котором поддерживается равной 50—60° С. Формы необходимо закрывать крышками, так как малеиновый ангидрид сильно испаряется. Эпоксидная смола, смешанная с малеиновым ангидридом, полимеризуется в термостате при постоянном повышении температуры.

Для получения качественного оптического активного материала процесс полимеризации необходимо производить при соблюдении определенного температурного режима. Температурный режим полимеризации определяется не только качеством смолы, но и размерами блока, с увеличением которых процесс полимеризации удлиняется. При этом необходимо учитывать, что процесс полимеризации эпоксидной смолы протекает с выделением тепла. Тепло может значительно повысить температуру внутри блока и вызвать повышенную хрупкость и непрозрачность готового материала. Для поддержания плавного температурного режима отливки выдерживают при 50—60° С до тех пор, пока материал не перейдет в резинообразное состояние, и только тогда начинают повышать температуру в термостате. Скорость полимеризации регулируется температурой в термостате таким образом, чтобы температура внутри отливки повышалась плавно и не переходила верхнюю границу 130° С.

До изготовления рабочей модели полимеризации на пробных предварительно подобрать тепловой режим полимеризации на пробных

моделях. Для лучшего регулирования температурного режима в термостате рекомендуется использовать контактные термометры.

Охлажденные плитки освобождаются от формы и подвергаются отжигу для снятия остаточных напряжений и стабилизации свойств материала. Отжигать материал можно на воздухе и в масле. В последнем случае распределение температуры при нагреве и охлаждении более равномерное. При отжиге модели подвергаются нагреву в термостате. Температуру в термостате повышают на 10 град в час. Максимальная температура отжига должна быть примерно на 5—10 град выше максимальной температуры полимеризации. При максимальной температуре отжига делают выдержку до полного прогрева материала от 30 мин до 2 ч, в зависимости от величины остаточных напряжений. Снижают температуру в два-три раза медленнее, чем повышают ее. Отожженная пластинка при просвечивании в поляризованном белом свете либо должна быть темной, либо должна иметь равномерное просветление. При наличии цветной картины интерференции отжиг нужно повторить.

Отвержденный материал ЭД-6М хорошо обрабатывается ручной опилкой, обточкой, фрезерованием, сверлением, шлифованием и полированием. Механическая обработка ведется теми же способами и при тех же режимах, что и для других оптически активных материалов. Необходимо применять острый инструмент и выдерживать умеренные скорости резания. Во избежание «прижога» (полосы интерференции, возникающие в результате обработки) следует применять охлаждающие эмульсии.

Если модель состоит из нескольких частей, то она склеивается клеем, приготовленным из эпоксидной смолы (ЭД-6М или ЭД-5) и отвердителя (полиэтиленполиамина), следующим образом: на 100 г смолы добавляют 10 г ацетона (для придания смоле более жидкой консистенции) и 6,5 г полиэтилполиамина. Место склейки протирают ацетоном или спиртом. Покрытые слоем клея поверхности выдерживают при комнатной температуре до «отлипа», далее наносят второй слой клея и снова выдерживают до отлипа. Затем смазанные клеем поверхности плотно прижимают друг к другу грузами или струбцинками (напряжение 3—5  $\text{дан/см}^2$ ) и выдерживают при комнатной температуре 24—36 ч. Для повышения прочности шва рекомендуется последующее прогревание склеенных частей при 60° С в течение 2 ч.

Для получения механических и оптических характеристик материала модели необходимо проводить испытания образцов на одноосное сжатие и растяжение. Модуль упругости  $E$  и коэффициент Пуассона отвержденных эпоксидных смол при комнатной температуре определяются в результате измерения деформаций с помощью механических тензометров при одноосном растяжении образцов, имеющих полосы. На полосе наносится база, деформация которой измеряется. Цену полосы материала  $\sigma_{(1,0)}$

можно определить по порядку полосы в центре диска, сжимаемого по вертикальному диаметру:

$$\sigma_0^{(1,0)} = \frac{2,54 P}{D n_c d} \quad (IV.8)$$

где  $P$  — прикладываемая нагрузка;  $D$  и  $d$  — соответственно диаметр и толщина тарировочного диска;  $n_c$  — порядок полосы в центре диска. Для проверки картины полос и для уточнения вычисленной величины  $\sigma_0^{(1,0)}$  рекомендуется использовать зависимость между координатой  $X$ , отсчитываемой по горизонтальному диаметру от центра, и значением  $n$  любой полосы:

$$\sigma_0^{(1,0)} = \frac{8PD(D^2 - 4X^2)}{\pi n(D^2 + 4X^2)^2} \quad (IV.9)$$

По формуле (IV.9) значение цены полосы  $\sigma_0^{(1,0)}$  определяется для нескольких полос, пересекающих горизонтальный диаметр тарировочного диска, и за конечный результат берется среднее арифметическое значение вычисленных величин.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белаенко Ф. А. — В кн.: Вопросы теории разрушения горных пород действием взрыва. Изд-во АН СССР, М., 1958.
2. Белаенко Ф. А., Гаек Ю. В., Друкованый М. Ф. — Изв. вузов, Горное дело, 1961, 3.
3. Белаенко Ф. А., Гаек Ю. В., Друкованый М. Ф. — Журнал научной и прикладной фотографии и кинематографии АН СССР, 1961, 6, 4.
4. Гзовский М. В., Осокина Д. Н., Кузнецова И. М. — В кн.: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Изд-во ЛГУ, 1960.
5. Губкин С. И., Добровольский С. И., Бойко Б. М. Фотопластичность. Изд-во АН БССР, Минск, 1957.
6. Друкованый М. Ф., Гейман Л. М., Комир В. М. Новые методы и перспективы развития взрывных работ на карьерах. «Наука», М., 1966.
7. Кокер Э., Файлон Л. Оптический метод исследования напряжений. ОНТИ, М., 1939.
8. Кучерявый Ф. И., Друкованый М. Ф., Гаек Ю. В. Короткозамедленное взрывание на карьерах. Госгортехиздат, М., 1962.
9. Покровский Г. И., Федоров И. С. Действие удара и взрыва в деформируемых средах. Промстройиздат, М., 1957.
10. Пригоровский Н. И. и др. Модели из нового оптически активного материала ЭД6-М для поляризационно-оптического метода исследования напряжений. ВИНТИ, М., 1958.
11. Рутовский Б. Н. и др. — Зав. лаборатория, 1952, 6.
12. Трумбачев В. Ф. Распределение напряжений вокруг горных выработок. Углетехиздат, М., 1955.
13. Трумбачев В. Ф., Молодцова Л. С. — В кн.: Научно-исследовательские работы в угольной промышленности. Углетехиздат, М., 1959.
14. Финк К. и Рорбах Х. Измерение напряжений и деформации. Машгиз, М., 1961.
15. Хесин Г. Л. — Изв. вузов, Машиностроение, 1958, 4, 4.
16. Хесин Г. Л. и др. — В кн.: Сб. трудов МИСИ, 35. Госэнергоиздат, М., 1959.
17. Эдельштейн Е. И. — В кн.: Поляризационно-оптический метод исследования напряжений. Изд-во ЛГУ, 1960.

## 1. Метод фотоупругих покрытий

Для измерения напряжений или деформаций методом фотоупругих покрытий на поверхность исследуемого объекта или модели наносится тонкий слой оптически активного материала или приклеиваются предварительно изготовленные тонкие пластинки из этого материала. При прочном сцеплении точек поверхности исследуемого объекта и нанесенного слоя оптически активного материала смещение точек исследуемой поверхности вызывает соответствующие деформации нанесенного слоя, которые измеряются обычными способами фотоупругости.

Впервые метод фотоупругих покрытий был предложен в 1930 г. Менадже для изучения распределения поверхностных деформаций металлов в пластической области [11]. Однако практическое применение этого метода было ограничено вследствие малой оптической активности существующих в то время материалов, отсутствия клеящих веществ, обеспечивающих прочную связь с поверхностью объекта, и модели полиарископов, удовлетворяющих специфическим условиям эксперимента.

Эффективным метод фотоупругих покрытий стал только после того, как были разработаны и применены оптически активные материалы на основе эпоксидных смол, обладающие высокой адгезией и необходимыми оптико-механическими характеристиками. Метод фотоупругих покрытий дает возможность получить информацию об упругих и пластических деформациях по всему полю на натуральных объектах или моделях.

Материалы оптически упругих покрытий. В качестве материала для покрытий используются эпоксидные смолы, отверждаемые малеиновым или фталиевым ангидридом. Для повышения предельных деформаций покрытия при изучении больших деформаций в состав покрытий вводятся пластификаторы. Полимеризация ведется в специально приготовленных формах, обеспечивающих получение плоскопараллельных пластинок. Покрытия наносятся на исследуемую поверхность двумя способами: 1) пластинки полимеризуются непосредственно на исследуемую поверхность; 2) предварительно заполимеризованные пластинки приклеиваются к исследуемой поверхности клеем на основе эпоксидной смолы ЭД-5. Во втором случае в отличие от пер-

вого на контуре покрытия не возникает начальной оптической разности хода вследствие усадки и разности коэффициентов линейного расширения материалов покрытия и исследуемого элемента.

Измерения методом оптически чувствительных покрытий проводят обычно до возникновения деформаций, при которых между порядком полосы интерференции и разностью деформаций существует линейная зависимость. Величина этих деформаций для различных материалов покрытий не одинакова и зависит от состава материала и режима его полимеризации. Для оценки пригодности различных оптически активных материалов в качестве покрытий были исследованы зависимости между деформациями и возникающим оптическим эффектом, а также найдены величины оптических постоянных  $\sigma_0^{(1,0)}$  и  $e_0^{(1,0)}$  [2].

Исследования показали, что наиболее широко применяемый материал ЭД6-М [10] на основе эпоксидной смолы ЭД-6 (или ЭД-5) с малеиновым ангидридом может быть использован для измерения деформаций до 2%. Введение добавок позволяет получить материалы с линейной зависимостью между порядком полос и деформаций до 4% и более\*.

**Способы получения оптически чувствительных покрытий.** Способы получения оптически чувствительных покрытий зависят от вида поверхности, в точках которой следует определить напряжения. При исследовании напряжений для плоских поверхностей в качестве покрытий применяют тонкие пластинки из материала ЭД-6М, наклеиваемые на исследуемые поверхности с помощью эпоксидного клея, отвержденного при комнатной температуре. Тонкие пластинки оптически чувствительного материала изготавливают заливкой композиции в стеклянные или металлические формы.

Стеклоянная форма представляет собой два зеркальных стекла, между которыми установлены прокладки заданной толщины. Толщина этих прокладок, обычно вырезаемых из листа органического стекла, обуславливает толщину получаемой пластинки. Для предотвращения вытекания жидкой смолы из формы ее с трех сторон оклеивают бумагой. Чтобы заполимеризованный материал отстал от стекол формы, их обливают полупроцентным раствором триацетатцеллюлозы в хлористом метиле (на стеклах образуется пленка). Для многократного использования обычно применяют разъемные стальные формы. Стенки этих форм после хлорирования должны быть отполированы, так как от чистоты поверхностей стенок зависит качество поверхности получаемых пластинок оптически чувствительного материала.

---

\* С добавлением полиэфиров такие пластичные материалы на основе эпоксидных смол были получены в Московском институте химического машиностроения.

Пластинки приклеивают к исследуемым поверхностям следующим образом. На поверхность исследуемого объекта, предварительно обезжиренную и зачищенную, наносят слой эпоксидного клея (100 вес. ч. смолы ЭД-5 или ЭД-6, 10 вес. ч. ацетона и 6—8 вес. ч. полиэтиленполиамиона). Через 2—3 мин после того как клей равномерным слоем распределится по поверхности, накладывают пластинку из оптически чувствительного материала, тоже обезжиренную и зачищенную шлифовальной шкуркой (зернистость 40—60 ед.) со стороны, прилегающей к исследуемой поверхности. Затем, нажимая пальцами на пластинку, выдавливают избыток клея и воздушные пузырьки, попавшие в клей. Для улучшения склеивания следует предварительно подогреть клей до 40—50° С.

Для нанесения клея на криволинейные поверхности разработаны способы применения материалов холодного отверждения на основе эпоксидных смол и исследованы их свойства [9]. Преимуществом материалов холодного отверждения является возможность нанесения их на любые поверхности и отсутствие начальных температурных напряжений. Их недостаток—пузыристость, которая может быть уменьшена, если вместо смолы ЭД-6 применять смолу ЭД-5 и в качестве добавки вводить 3—5% изоамилового спирта. Полученные материалы холодного отверждения могут быть использованы и в качестве клеев.

При проведении исследований на поверхностях с плохой отражательной способностью необходимо создать отражательную поверхность между оптически чувствительным покрытием и исследуемой моделью. Так, для определения деформаций и напряжений на моделях из пластмасс и оргстекла можно использовать тонкие пластинки из материала ЭД-6М с металлизированной поверхностью, полученной путем вакуумного распыления. Этот способ обеспечивает получение качественного хорошо отражающего покрытия. Недостатком пластинок, изготовленных таким способом, является относительно малая адгезия металла к поверхности оптически чувствительного материала.

Выбор рациональных параметров фотоупругих покрытий. При определении параметров фотоупругих покрытий необходимо учитывать влияние факторов, вносящих погрешности при измерении напряжений и деформаций: формы, размеров, толщины и жесткости фотоупругого покрытия.

При исследовании напряженного состояния объектов методом фотоупругих покрытий исходят из равенства разностей главных деформаций исследуемого объекта и покрытия. В плоскости склеивания это условие вполне справедливо. При удалении от этой плоскости деформации в фотоупругом покрытии изменяются вследствие изменения напряженного состояния, вызванного касательными усилиями, возникающими в плоскости склеивания. Так как деформации на свободной поверхности покрытия

несколько меньше деформаций в плоскости склеивания, то измеряемая величина деформации будет осредненной.

Применение тонких фотоупругих покрытий может почти полностью исключить погрешности вследствие неравномерного распределения деформаций по толщине покрытий. Однако измерять относительную разность хода лучей в этом случае значительно труднее, чем при толстых покрытиях, особенно при малых величинах деформаций.

При проведении экспериментальных исследований толщину покрытия обычно выбирают в зависимости от оптической постоянной материала покрытия  $C_e$ , чувствительности регистрирующего прибора и минимальной деформации исследуемого объекта. В общем виде формулу для определения минимальной толщины покрытия можно записать так:

$$t_{n(\min)} = \frac{\Gamma_{\min}}{2C_e \epsilon_{\min}}, \quad (V.1)$$

где  $\Gamma_{\min}$ —минимальная разность хода лучей, измеряемая прибором;  $\epsilon_{\min}$ —минимальная деформация, которую необходимо измерить.

Минимальная толщина покрытия из материала ЭД-6М при измерении деформации порядка  $10^{-5}$  методом полос составляет 2 мм, а с применением компенсаторов—0,5 мм.

В большинстве экспериментальных исследований толщина фотоупругого покрытия принимается равной 2—3 мм. Форма и размеры его на площади склейки могут приниматься различными в зависимости от задач и участка исследуемого объекта. В том случае, когда покрытие выполняет роль точечного датчика напряжений и деформаций, его размеры определяются исходя из принятой толщины фотоупругого покрытия.

Одно из главных условий применения этого метода состоит в том, что жесткость исследуемого объекта должна значительно превосходить жесткость фотоупругого покрытия, т. е.

$$Et \gg E_n t_n. \quad (V.2)$$

В этом случае покрытие не оказывает заметного влияния на напряженное состояние исследуемого объекта. Однако иногда это условие не может быть полностью выполнено. Тогда необходимо учитывать влияние подкрепления поверхности объекта покрытием.

При исследовании характера распределения напряжений, возникающих от действия импульсных нагрузок, указанные выше факторы не имеют столь существенного значения, так как в этом случае представляется возможным проследить только качественную картину напряженного состояния объекта.

**Приборы и аппаратура.** Для измерения напряжений в покрытиях можно использовать различные схемы полярископов. При исследовании полей напряжений, возникающих в случае импульсивных нагрузок, наиболее приемлемы V-образный полярископ и полярископ с полупрозрачным зеркалом или их разновидности, отличающиеся способом освещения исследуемой конструкции.

В полярископах V-образного типа поляризатор и анализатор располагаются в одной плоскости. Их оси составляют между собой небольшой угол, который определяется расстоянием между поляроидами и исследуемым объектом. Обычно этот угол составляет  $6-12^\circ$ .

Поляризованный луч света проходит фотоупругое покрытие дважды не по одному и тому же пути, но вследствие малого угла падения, малой толщины покрытия и относительно большого показателя преломления материала покрытия точки входа и выхода луча практически совпадают.

Приборы V-образного типа могут работать при плоской и круговой поляризации. Относительная разность хода лучей измеряется методом гониометрической компенсации (методы Сенармона и Тарди). Поэтому в схемах V-образных полярископов

предусмотрены пластинки в  $\frac{1}{4} \lambda$ . Простейший V-образный по-

лярископ состоит из одного поляроида и одной пластинки в  $\frac{1}{4} \lambda$

(круговая поляризация). Для получения плоскополяризованного света пластинка выводится из оптической схемы прибора. Разность главных напряжений (деформаций) определяется по картине полос.

V-образные полярископы обеспечивают высокую яркость отраженного луча, но при их использовании для измерений в зонах высоких градиентов возможны погрешности вследствие несоответствия отраженных и падающих лучей. В этом случае можно использовать полярископ с полупрозрачным зеркалом, у которого отраженный луч совпадает с падающим. Однако полярископы с полупрозрачным зеркалом имеют существенные недостатки. Применение отражающих зеркал или полупрозрачных пластинок приводит к значительной потере света (до 50—60%) при отражении до входа в фотоупругое покрытие и после прохождения лучей через полупрозрачную пластинку в аналитической части прибора, что крайне нежелательно при использовании скоростной фоторегистрирующей аппаратуры (СФР).

При использовании полярископов V-образного типа для измерения относительной разности хода лучей в фотоупругом покрытии в областях с высоким градиентом деформаций возникает

ошибка, которая в общем виде может быть выражена следующим образом:

$$\frac{\Delta\Gamma}{\Gamma} = f\left(\frac{d\varepsilon}{dx}; \alpha\right), \quad (V.3)$$

где  $\frac{d\varepsilon}{dx}$  — производная по деформации на участке измерения;  $\alpha$  — угол между направлением просвечивания и нормалью к покрытию.

Погрешность в измерении разности хода лучей резко возрастает при значительном отличии деформаций в точках входа и выхода поляризованных лучей.

На современном этапе развития метод фотоупругих покрытий является эффективным, надежным средством исследования напряженного состояния исследуемых объектов и имеет ряд преимуществ по сравнению с другими методами измерения напряжений. Он может применяться для исследования характера распределения напряжений как в моделях, так и непосредственно на блоках горных пород.

## 2. Метод муаровых полос \*

При исследовании напряженно-деформированного состояния плоских и объемных моделей можно использовать метод муаровых полос (или, как его еще называют, метод оптических сеток). Этот метод основан на использовании муарового эффекта, который заключается в том, что при наложении двух сеток из чередующихся темных и светлых промежутков образуются так называемые муары, или муаровые полосы, которые в увеличенном масштабе отражают параметры смещений и деформаций в точках исследуемых моделей.

Метод муаровых полос используется в измерительной технике сравнительно недавно. В 1940 г. Дантю [12] пользовался этим методом при исследовании плоских моделей. Известен ряд работ с применением метода муаровых полос для исследования деформаций и напряжений [4, 8, 15, 16]. Однако этот метод, выгодно отличающийся от многих других методов исследования напряжений, пока не нашел достаточно широкого применения в отечественных работах. Для исследования динамических задач он применялся лишь в единичных случаях. Метод муаровых полос позволяет измерять деформации и кинематические параметры на поверхности прозрачных и непрозрачных моделей или внутри объема прозрачных моделей. Материалами для исследований могут служить металлы, горные породы, различные прозрачные

\* Параграф написан совместно с инженером В. Г. Журбой.

и непрозрачные пластмассы. Известные в настоящее время исследования динамических процессов в твердых телах с использованием метода муаровых полос проводились на прозрачных материалах.

Однако при наличии импульсного источника света, дающего необходимую яркость свечения, возможно применение метода муаровых полос для исследования динамических процессов на поверхности непрозрачных тел.

Данный метод позволяет получить полную картину параметров деформации и кинетических параметров в интересующем нас направлении. Если таких направлений несколько, то по каждому из таких направлений размещают полосы из сеток.

Как указывают многие исследователи, метод муаровых полос может использоваться при измерении деформаций с нижним пределом  $\epsilon = 1 \times 10^{-4}$ , он довольно прост, дешев и эффективен. Достаточно располагать несколькими качественными сетками, чтобы контактным способом получить необходимое их количество.

Метод муаровых полос выгодно отличается от многих других экспериментальных методов исследования напряжений и деформаций безынерционностью, высокой степенью

точности, большим объемом одновременно получаемой информации, отсутствием промежуточных преобразователей информации, наглядностью и т. д. Все сказанное выше позволяет с большой

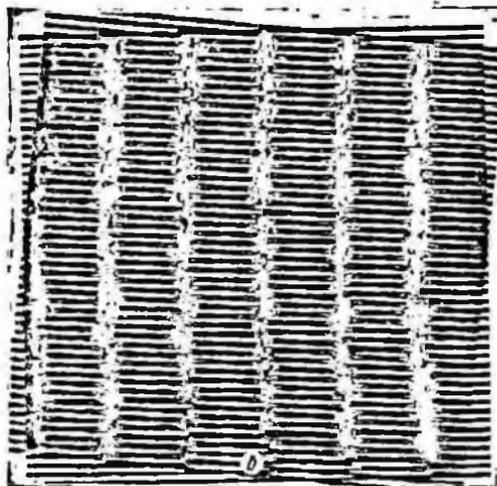
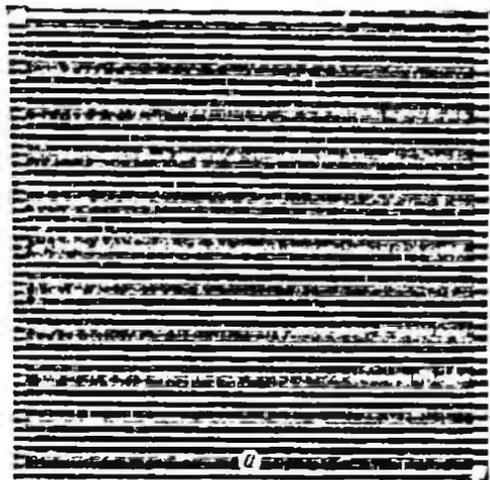


Рис. 62. Муаровые полосы при параллельных линиях сеток (а) и при смещении сеток на угол  $\alpha$  (б).

эффективностью использовать метод муаровых полос для экспериментального исследования динамических задач.

**Сущность метода.** Как указывалось выше, муаровые полосы образуются при наложении двух сеток из чередующихся темных и светлых промежутков. По характеру образования муаровые полосы подразделяются на два типа: 1) линии сеток параллельны друг другу (рис. 62, а). 2) линии сеток смещены на угол  $\alpha$  (рис. 62, б). В первом случае темная муаровая полоса возникает тогда, когда линия одной сетки закрывает промежуток между двумя линиями другой сетки по всей ее длине. Муаровые полосы параллельны линиям сеток. При наложении сеток с одинаковым шагом муаровые линии не возникают. В зависимости от взаимного положения линий и промежутков между обеими сетками будет наблюдаться либо темное, либо светлое поле, либо промежуточное состояние между ними. При деформировании одной из сеток шаг ее изменяется и образуются муаровые полосы. Как показано в работе [14], относительная деформация модели в направлении, перпендикулярном к линиям сеток, в этом случае составляет

$$\epsilon = \frac{e}{L}, \quad (\text{V.4})$$

где  $e$  — шаг базисной сетки и сетки модели до ее деформирования;  $L$  — расстояние между двумя последовательными муаровыми полосами.

В рассматриваемом случае для измерения кинематических параметров волны напряжения в направлении  $x$  на поверхности модели на последнюю наносится сетка таким образом, что ее линии составляют прямой угол с направлением  $x$ . Задачей эксперимента является получение функции  $L(x, t)$ . Зная эту функцию, можно определить параметры деформированного состояния в волне напряжений в направлении оси  $x$  —  $\epsilon_x(x, t)$ . Так как

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad (\text{V.5})$$

то интегрированием несложно найти смещения  $u(x, t)$ . Далее дифференцированием можно определить скорости смещений  $\frac{\partial u}{\partial t}(x, t)$  и ускорения смещений  $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}(x, t)$ .

По картинам смещения муаровых полос легко определить скорость распространения волны напряжений. Таким образом, волны напряжений в направлении  $x$  с помощью муаровых полос рассматриваемого типа полностью определяют параметры деформированного состояния и кинематические параметры.

Второй случай образования муаровых полос заключается в следующем. При наложении сеток таким образом, что их линии

образуют между собой небольшой по величине угол  $\alpha$ , темные муаровые полосы возникают в местах пересечения линий одной сетки с промежутками другой. При равном шаге обеих сеток муаровые полосы перпендикулярны к биссектрисе угла  $\alpha$ .

Муаровые полосы очень чувствительны к изменениям параметров решеток и их относительного положения. Если одна из решеток смещается на один период, т. е. на величину линии и промежутка, интерференционная картина полос смещается также на один период, т. е. каждая из муаровых полос занимает место соседней. При изменении параметров одной из решеток муаровые линии изменяют свою кривизну. Сдвиг муаровых линий в данной точке характеризует ее перемещение, изменение кривизны полосы в данной точке характеризует деформацию.

Для измерения кинематических параметров волны напряжения в направлении  $x$  на поверхность модели наносится сетка таким образом, чтобы ее линии составляли с направлением  $x$  прямой угол или угол, близкий к прямому. Таким углом, в частности, является угол, равный  $90^\circ \pm \frac{\alpha}{2}$ . При такой величине угла, е-

сли параметры базисной сетки и сетки образца одинаковы, начальное направление муаровых полос совпадает с направлением  $x$ .

В работе [15] предложена следующая методика определения кинематических параметров воли напряжений по картинам муаровых полос.

При наложении решеток с параметрами  $l$  (ширина элементов и промежутков решетки, нанесенной на объект, или шаг решетки объекта) и  $a$  (ширина элементов и промежутков базисной решетки, или шаг базисной решетки) под углом  $\alpha$  угол направления муаровых полос  $\gamma_0$ , отсчитываемый от направления элементов решетки, нанесенной на объект, до линии муаровой полосы, определяется по формуле

$$\gamma_0 = \operatorname{arctg} \left( \operatorname{ctg} \alpha - \frac{a}{l} \operatorname{cosec} \alpha \right). \quad (\text{V.6})$$

При прохождении волны напряжений по исследуемому участку модели элементы решетки, нанесенной на модель, смещаются. При этом муаровые линии перемещаются в соответствующих местах пропорционально смещениям элементов решетки в направлении оси  $x$ , т. е. получается функция, описывающая со значительным увеличением смещения за фронтом волны. Связь между смещением точки  $U$  и отклонением муаровой полосы в этой же точке  $h$  записывается в общем случае уравнением, полученным исходя из геометрического представления эффекта:

$$U = h \sqrt{n^2 + 1 - 2n \cos \alpha}, \quad (\text{V.7})$$

где  $n = \frac{l}{a}$ . Наилучший эффект измерений получается при

$n=1$ , т. е. когда  $l=a$  (одинаковые решетки). В этом случае

$$U = 2h \sin \frac{\alpha}{2}. \quad (\text{V.8})$$

Для небольших углов  $\sin \alpha = \alpha$ . Тогда формула для определения смещений принимает вид

$$U = h\alpha. \quad (\text{V.9})$$

Коэффициент увеличения муарового эффекта

$$K_y = \frac{h}{U} = \frac{1}{\alpha}. \quad (\text{V.10})$$

Ввиду трудности точного измерения малых углов коэффициент увеличения муарового эффекта практически более удобно определять по формуле, полученной исходя из геометрического представления эффекта,

$$K_y = \frac{L}{2l}, \quad (\text{V.11})$$

где  $L$  — шаг муара, т. е. расстояние между подобными точками соседних муаровых полос.

Тогда формула для определения смещений

$$U = \frac{h}{K_y} \quad (\text{V.12})$$

примет вид

$$U = \frac{2l}{L} h. \quad (\text{V.13})$$

Таким образом, задачей эксперимента является получение значений  $h(x)$  для отдельных моментов времени  $t$ . Эти значения легко получить при обработке картины муаровых полос, полученных с помощью скоростной киносъемки, производимой с необходимостью для данной задачи частотой. По полученным значениям  $h(x, t)$  определяются смещения  $U(x, t)$ . Дифференцируя функцию  $U(x, t)$ , несложно определить деформации и скорости деформаций, скорости и ускорения смещений. По картинам смещения муаровых полос легко определить скорость распространения волны напряжений. Следовательно, для волны напряжений в направлении  $x$  полностью определяются параметры деформированного состояния и кинематические параметры.

Методика проведения экспериментов, аппаратура. Методика проведения экспериментов по исследованию деформированного состояния прозрачных моделей при действии динамических нагрузок состоит в следующем.

Модель с нанесенной на нее сеткой помещается в поле импульсного источника света. Неподвижная базисная сетка накладывается в непосредственной близости к сетке на поверхности образца. При использовании эффекта параллельных сеток линии сетки образца и базисной сетки должны быть строго параллельны, а при использовании эффекта скрещенных сеток линии сеток должны накладываться под углом, соответствующим принятой для эксперимента величине коэффициента увеличения муарового эффекта  $K_u$ . Расстояние между сетками должно быть таким, чтобы обеспечивались четкость муаровых полос и неподвижность базисной сетки в процессе проведения эксперимента.

Регистрация движения муаровых полос при нагружении модели осуществляется с помощью скоростной фоторегистрирующей установки, которая должна иметь достаточно высокую разрешающую способность во времени, обеспечивающую регистрацию волновых процессов в материале исследуемой модели. Оптическая система фоторегистрирующей установки должна иметь разрешающую способность, достаточную для качественной передачи экспонируемого изображения муаровых полос на фотопленку.

Фотопленка для получения четких и контрастных фотоснимков должна обладать достаточной разрешающей способностью и высокой чувствительностью, обеспечивающей экспонирование муаровых полос. Поэтому источник света должен обеспечивать высокую степень освещенности модели.

В приведенных в литературе исследованиях динамических процессов с помощью метода муаровых полос [5, 6, 7] регистрация движения муаровых полос от действия динамических нагрузок осуществлялась с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР.

Способы изготовления муаровых сеток. Муаровые сетки наносятся на поверхность исследуемой модели двумя способами. Первый заключается в том, что на поверхность модели с помощью пульверизатора наносится слой специальной фоточувствительной эмульсии. После просушки эмульсии на поверхность модели накладывается эталонная сетка и методом контактной фотопечати сетка экспонируется на поверхность модели. Затем эмульсия проявляется. Фоточувствительная эмульсия хорошо приклеивается к различным видам материалов, что позволяет широко использовать указанный способ получения сеток на поверхности моделей из различных материалов.

Второй способ состоит в приклеивании к поверхности моделей специальной фотопленки, на которой предварительно контактным способом нанесена сетка. При приклеивании пленки эмульсия должна находиться со стороны модели. После отверждения клея целлулоидная основа специальной пленки удаляется и на поверхности модели остается только эмульсия с нанесенной сеткой.

Применяемая в практике французских лабораторий пленка называется стриппинг-фильм.

При всех способах изготовления сеток необходимо иметь точные эталонные сетки. Изготовление таких сеток в лабораторных условиях представляет большие трудности. Обычно сетка вычерчивается на ватмане и затем фотографируется с большим уменьшением. Сетки, получаемые таким способом, не совсем точны. В работе [13] в качестве эталона предлагается использовать растровые стекла, употребляемые в типографском деле для изготовления иллюстраций. База сеток на растровых стеклах составляет 40, 80 и 160 мкм.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ахметзянов М. Х.—Изв. АН СССР, ОТН, Механика и машиностроение, 1964, 1.
2. Богдыль П. Т., Пригоровский Н. И.—В кн.: Проблемы прочности в машиностроении, 1962, 8.
3. Дульнев Р. А. Автореферат канд. дисс. Московский авиационный технологический институт, 1962.
4. Дульнев Р. А.—В кн.: Методы исследования напряжения. «Наука», М., 1965.
5. Журба В. Г., Мишин В. В., Шароваров В. А.—Прикладная механика, 1966, 11, 3.
6. Журба В. Г., Мишин В. В.—Зав. лаборатория, 1966, XXXII, 5.
7. Журба В. Г.—ПМТФ, 1966, 6.
8. Костов Г. Д.—В кн.: Методы исследования напряжений. «Наука», М., 1965.
9. Пригоровский Н. И., Богдыль П. Т. Определение деформаций и напряжений при помощи оптически чувствительных покрытий. ГОСИНТИ. «Наука», М., 1964.
10. Пригоровский Н. И. и др. Модели из нового оптически активного материала для поляризационно-оптического метода исследования напряжений. Филлал ВИНТИ, АН СССР, М., 1958.
11. Трумбачев В. Ф., Молодцова Л. С. Применение оптического метода для исследования напряженного состояния пород вокруг горных выработок. Изд-во АН СССР, М., 1953.
12. Dantu P.—Ann. des Ponts et Chaussées 110, 1940, 1.
13. Dantu P. An. contr., 1944, 2, 2.
14. Dantu P. Utilisation des reseaux l'etude des deformation Conf. C.E.J.T.V et des Tz. Puble 5 Marz 1957, LCPC.
15. Durelli A. J., Daniel I. M.—Proc. ASCE. 1960, ST 12.
16. Theocaris P.—Mech. Reviews May. 1962.

1. Исследование деформаций  
проволочными датчиками сопротивления

Проволочные датчики сопротивления в настоящее время широко используются в различных областях горнодобывающей промышленности. Внедрение их в практику позволяет успешно совершенствовать существующие машины и создавать новые, сокращать сроки освоения новых конструкций и внедрения их в практику производства. Способы тензометрирования с помощью проволочных датчиков удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к точности измерений при работе в наиболее трудных условиях.

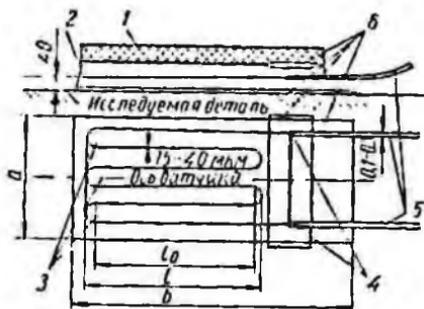


Рис. 63. Схема устройства проволочного датчика:  
1 — фетровое покрытие; 2 — клей; 3 — решетка датчика; 4 — место припайки; 5 — выводы; 6 — бумага.

Особенно широкое распространение проволочные датчики получили при измерении быстро изменяющихся во времени механических величин, т. е. при исследованиях быстротекающих динамических процессов.

Конструкции датчика сопротивления. Проволочный датчик сопротивления представляет собой очень тонкую (10—40 мкм) проволоку из константана, нихрома или другого сплава, образующую внутри слоя клея плоскую тензочувствительную решетку в виде нескольких петель, приклеенную к одному листику тонкой бумаги или заклеенную между двумя листиками (рис. 63).

При растяжении металлической проволоки электрическое сопротивление ее изменяется. Коэффициент чувствительности проволоки к удлинению  $K$  можно выразить в дифференциальной форме следующим образом:

$$K = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{de} = (1 - 2\mu) + \frac{1}{\nu} \cdot \frac{de}{de} \quad (VI.1)$$

Как видно из этой формулы, коэффициент чувствительности состоит из геометрической части, зависящей от коэффициента Пуассона  $\mu$ , и из физической части — коэффициента изменения

удельного сопротивления при удлинении. Коэффициент Пуассона  $\mu$  для большинства чистых металлов и сплавов по условиям постоянства объема материала близок к величинам 0,3 в упругой области и 0,5 — в пластической. Таким образом, величина геометрической части коэффициента  $K$  может быть приблизительно 1,6—2,0. Коэффициент изменения удельного сопротивления при удлинении зависит от типа металла или сплава и по экспериментальным данным изменяется от  $-13,6$  (никель) до  $+3,3$  (олово).

Требования, которым должны отвечать материалы проволочного тензодатчика сопротивления, следующие: наличие линейной зависимости между удлинением и относительным изменением сопротивления в возможно более широкой области; большая величина коэффициента чувствительности  $K$ ; отсутствие гистерезиса; вы-

сокое удельное сопротивление, позволяющее получить при заданном диаметре проволоки большое сопротивление на единицу длины проволоки и, следовательно, высокую чувствительность тензометра. Наиболее полно отвечают указанным требованиям такие сплавы, как константан, нихром и железохромоалюминиевый сплав № 2.

Для механического закрепления проволоки к электрической изоляции ее от исследуемого объекта, на который наклеивается тензодатчик, служит основание. Требования, предъявляемые к материалу основания, следующие: отсутствие гистерезиса и ползучести; нечувствительность к действию сырости; хорошая склеиваемость; гибкость; механическая прочность; наличие хороших изолирующих свойств. Почти всем этим требованиям хорошо отвечает бумага.

Проволочные датчики различают по способам размещения проволоки на плоском основании (рис. 64). В наиболее распространенном тензодатчике с параллельной решеткой (рис. 64, а) проволока образует прямоугольную решетку из параллельных линий, сопряженных по концам полуокружностями. В местах сопрягающих полуокружностей ей часто сообщается удлинение исследуемого объекта в направлении, перпендикулярном к продольной оси тензодатчика, что может привести к искажению результатов измерения. Тензодатчик с плоской катушкой изготавливается путем намотки проволоки в виде цилиндрической катушки, которую затем сплющивают и в таком виде наклеивают на

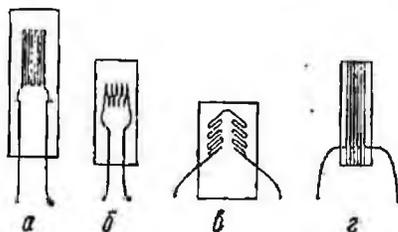


Рис. 64. Различные типы проволочных тензодатчиков сопротивления:

а — с параллельной решеткой; б — с плоской катушкой; в — с двойной решеткой; г — с поперечными перемычками.

плоское основание (рис. 64, б). Тензодатчики этого типа могут быть изготовлены с меньшей длиной базы. Недостаток их в том, что проволоки, образующие верхние половинны сплюснутых витков решетки, находятся на сравнительно большом расстоянии от основания тензодатчика. Поперечная чувствительность тензодатчиков с плоской катушкой в большинстве случаев незначительна, а иногда даже отрицательна в связи с тем, что участки проволоки в месте сопряжения верхней и нижней половин витков расположены перпендикулярно к исследуемой поверхности.

Тензодатчик с одиночной проволокой состоит из одной проволоки, размещенной вдоль продольной оси тензодатчика. Такие тензодатчики не чувствительны к удлинениям в поперечном направлении, но имеют малое сопротивление или выполняются с большой длиной базы.

В тензодатчике напряжения, показанном на рис. 64, в, проволока расположена в виде двойной решетки, параметры которой подобраны так, что отношение поперечной чувствительности к продольной равно коэффициенту Пуассона для материала исследуемого объекта. При выполнении этого условия выходное напряжение измерительного устройства с тензодатчиком пропорционально напряжению в материале объекта, действующему в направлении продольной оси датчика.

Крепление проволочных датчиков. Тензодатчики наклеивают на поверхность исследуемого объекта, которая должна быть тщательно подготовлена. Необходимо с поверхности удалить грязь, краску, жиры и ржавчину. Последнюю следует удалять твердой стальной щеткой. После очистки поверхность должна быть тщательно обработана мелкой наждачной бумагой. Перед наклейкой поверхность протирается ваткой, смоченной в чистом ацетоне или толуоле. Существует несколько различных составов клея для крепления проволоки чувствительной решетки к бумаге и для приклеивания готовых датчиков к исследуемой детали. Эти составы можно разделить на две группы: высыхающие и полимеризующиеся.

К высыхающим относится широко распространенный ацетоно-целлулоидный клей, представляющий собой раствор чистого целлулоида (коллоксилина) в ацетоне. Этот клей в густом виде можно употреблять для наклейки датчиков на объект при работе в лабораторных условиях. Он является быстросохнущим, время его схватывания составляет несколько минут, хотя полное высыхание происходит через 6—8 ч.

Состав ацетоно-целлулоидного клея следующий: коллоксилина средней вязкости № 2 15%; ацетона 23%; амилацетата 30%; серого эфира 30%; канифоли светлой 2%.

К полимеризующимся относятся клеи типа БФ, бакелитовый лак, кремнийнитроглифталцевые клеи, карбинольный клей, а также специальные клеи для защиты от влаги.

При наклеивании проволочного датчика существенное значение имеет толщина слоя клея. Установлено, что толстый слой клея не обеспечивает хорошей передачи деформаций, поэтому расстояние от оси проволоки до поверхности объекта должно быть не более 0,4 мм, что ограничивает диаметр проволоки (40 мкм), толщину клея и толщину бумаги.

При наклейке проволочного датчика ацетоно-целлулоидным клеем необходимо сначала нанести на подготовленную поверхность слой клея толщиной около 0,2 мм; на него накладывается тензодатчик, который следует ориентировать в нужном направлении.

После наклейки следует проверить тензодатчик. Прежде всего проверяют целостность проволоки тензодатчиков, которая могла быть случайно повреждена во время наклейки. Для этого определяют приблизительное значение сопротивления тензодатчика с помощью омметра. Затем с помощью того же омметра убеждаются в отсутствии короткого замыкания тензодатчика на корпус, которое может иметь место при протыкании основания тензодатчика измерительной проволокой или выводным проводником.

Далее тензодатчик высушивают. При сушке тензодатчиков на воздухе в условиях нормальной температуры и влажности уже через 1 ч можно производить измерения динамических напряжений при условии не очень высоких требований к точности измерений. Идеальным средством сушки на крупных конструкциях является освещение прямыми лучами солнца при очень сухом воздухе, однако такие благоприятные условия встречаются крайне редко. Проще сушить тензодатчики электрическим током после присоединения к ним соединительных проводов, используемых при измерениях. Этот способ сушки особенно выгоден при большом числе установленных датчиков. Большинство тензодатчиков выдерживает по меньшей мере трех-, четырехкратную величину допустимого рабочего тока и при этом нагревается до температуры 40—50° С. Для обеспечения медленной сушки следует постепенно увеличивать ток.

При сушке небольшого числа тензодатчиков с успехом можно пользоваться инфракрасным излучателем. Лучше применять не стеклянный, а керамический излучатель как более прочный и не слепящий. При весе исследуемого объекта примерно 30 кг, мощности керамического излучателя 150 Вт и расстоянии от излучателя до объекта 200 мм через полчаса температура поверхности достигает примерно 60° С, что вполне достаточно для сушки тензодатчиков. Для полной сушки тензодатчиков с бумажным основанием достаточно нескольких часов выдержки при этой температуре.

**Измерительные цепи и приборы.** Для измерения электрических сигналов, поступающих от проволочного датчика, подвер-

гаемого деформированию, применяются мостовая и потенциометрическая схемы электрических цепей.

Мостовая схема основана на использовании в качестве электрической цепи измерительного моста, питаемого постоянным или переменным током (рис. 65). Мост может использоваться для измерения омического сопротивления датчика как в равновесном (сбалансированном) состоянии, так и в состоянии неравновесного режима (дебаланса), широко распространенного при динамических измерениях.

В случае несбалансированного моста (рис. 66), имеющего место при измерении динамических нагрузок, для изучения его

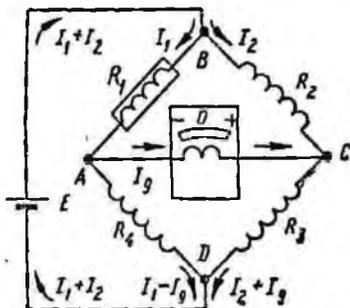


Рис. 65. Схема для измерения деформации с помощью проволочных тензодатчиков сопротивления.

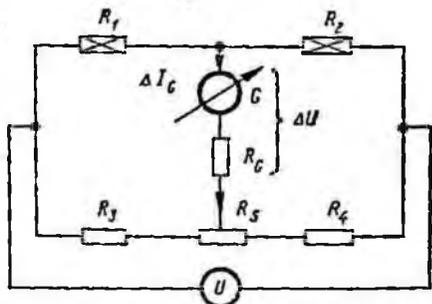


Рис. 66. Цепь несбалансированного моста.

работы используется закон Кирхгофа о напряжениях и токах в сложных электрических цепях. Согласно закону Кирхгофа сумма токов, притекающих в точку соединения нескольких ветвей, равна сумме токов, вытекающих из нее; в замкнутом контуре сумма напряжений равна нулю.

Для цепи, состоящей из батарей  $E$  и сопротивлений  $R_1$  и  $R_4$ , исходя из закона Кирхгофа, получаем

$$R_1 I_1 + R_4 (I_1 - I_g) = E \quad \text{или} \quad I_1 (R_1 + R_4) - I_g R_0 = E; \quad (\text{VI.2})$$

для замкнутой цепи, состоящей из сопротивлений,

$$I_1 R_1 + I_g R_g - I_2 R_2 = 0; \quad (\text{VI.3})$$

для цепи, состоящей из сопротивлений,

$$I_g R_g + R_3 (I_2 + I_g) - R_4 (I_1 - I_g) = 0 \quad (\text{VI.4})$$

или

$$-I_1 R_4 + I_2 R_2 + I_g (R_g + R_2 + R_4) = 0.$$

Из уравнений (VI.2) — (VI.4) можно исключить  $I_1$  и  $I_2$  и найти величину тока в гальванометре  $R_g$ , выраженную через напряже-

ние батареи и сопротивления элементов цепи. После преобразований получим

$$I_g = \frac{E(R_2R_4 - R_1R_3)}{R_2(R_1 + R_4)(R_g + R_3 + R_4) + R_1R_3R_4 - R_2R_4^2 + R_g + R_3(R_1 + R_4)} \quad (VI.5)$$

Из этого уравнения при известном напряжении батареи  $E = I_1(R_1 + R_4)$  получаем

$$I = \frac{A - BR_1}{CR_1 + D}, \quad (VI.6)$$

где  $A, B, C$  и  $D$  — постоянные величины.

По уравнению (VI.6) можно построить график зависимости тока гальванометра  $I_g$  от сопротивления тензодатчика  $R_1$ . Строго говоря, эта зависимость не будет линейной, но так как нас интересуют лишь малые изменения сопротивлений  $R_1$  тензодатчика, соответствующие изменениям деформаций только в упругой области, где они не достигают даже 1%, то в этой ограниченной области измерений можно практически считать, что зависимости  $I_g$  и  $R_1$  будут описываться прямой линией.

Таким образом, для неуравновешенного моста по показаниям гальванометра можно определить омическое сопротивление тензодатчика, а следовательно, и деформацию исследуемого объекта. Мост можно питать не только постоянным, но и переменным током, и не обязательно, чтобы все четыре плеча моста были омическими сопротивлениями.

Под чувствительностью моста понимается величина тока гальванометра, приходящаяся на единицу измеряемого сопротивления. Эту величину можно получить по графику зависимости  $I_g$  от  $R_1$ , в котором чувствительность определяется тангенсом угла наклона кривой  $\frac{dI_g}{dR_1}$ . Чем больше этот угол наклона, тем выше

сила тока, приходящегося на единицу сопротивления датчика, тем выше чувствительность и больше выходной сигнал моста.

Продифференцировав равенство (VI.6) по  $R_1$ , по обычной формуле производной дробей получим

$$\frac{dI_g}{dR_1} = \frac{-B(CR_1 + D) - C(A - BR_1)}{(CR_1 + D)^2} \quad (VI.7)$$

Если в формулу (VI.7) подставить известное номинальное сопротивление, то можно найти чувствительность датчиков, которая представляет тангенс угла наклона кривой, описываемой уравнением (VI.6). На эту чувствительность сопротивление гальванометра или датчиков не оказывает влияния.

Несомненно, что разность потенциалов между точками  $A$  и  $C$  будет максимальной (при этом максимальным будет и выходной

сигнал моста) в случае, когда сопротивление гальванометра бесконечно велико. В самом деле, при бесконечно большом полном сопротивлении между точками  $A$  и  $C$

$$U_{\text{вых}} = U_{A-C} = I_1 R_1 - I_2 R_2. \quad (\text{VI.8})$$

Если ток через гальванометр не протекает, то

$$I_1 = \frac{U_1}{R_1 + R_4} \quad \text{и} \quad I_2 = \frac{U}{R_2 + R_3},$$

следовательно,

$$U_{\text{вых}} = \frac{U_1 R_1}{R_1 + R_4} - \frac{U R_2}{R_2 + R_3}. \quad (\text{VI.9})$$

Дифференцируя выражение (VI.9) по  $R_1$ , находим

$$\frac{dU_{\text{вых}}}{dR_1} = \frac{(R_2 + R_3)U - UR_2}{(R_1 + R_4)^2} \quad \text{или} \quad dU_{\text{вых}} = U \frac{R_4}{(R_1 + R_4)} dR_1, \quad (\text{VI.10})$$

но так как  $K = \frac{dR_1/R_1}{\Delta l/l}$ , то  $dR_1 = KR_1 \frac{dl}{l}$ ,

где  $K$  — чувствительность тензодатчика.

Подставив в выражение (VI.10) значения  $dR_1$ , получим

$$dU_{\text{вых}} = U \frac{R_1 R_4}{(R_1 + R_4)^2} K \frac{dl}{l}. \quad (\text{VI.11})$$

Выражение (VI.11) дает величину выходного сигнала моста при бесконечно большом сопротивлении гальванометра; из него следует, что выходное напряжение пропорционально напряжению источника тока, коэффициенту тензочувствительности и относительной деформации.

В частном случае при  $R_1 = R_4$  уравнение (VI.11) значительно упрощается и приаодится к виду

$$dU_{\text{вых}} = \frac{UK}{4} \cdot \frac{dl}{l}. \quad (\text{VI.12})$$

Как видно из выражения (VI.12), выходной сигнал моста не зависит от сопротивления плеч только в том случае, если эти сопротивления равны между собой. Если сопротивление гальванометра  $R_g$  меньше бесконечности, то напряжения гальванометра и выходного сигнала связаны между собой равенством

$$U_g = \frac{R_g}{R_g + R_1} dU_{\text{вых}}, \quad (\text{VI.13})$$

где  $\frac{R_g}{R_g + R_1}$  — степень снижения напряжения по сравнению с тем напряжением, которое имелось бы при бесконечно большом

сопротивлении гальванометра. Чем больше  $R_g$  по сравнению с  $R_1$ , тем ближе величина этой дроби к единице, а следовательно, величина  $U$  приближается к величине  $dU_{\text{вых}}$ .

Для измерения только динамических деформаций применяется потенциометрическая схема. Она состоит из батареи  $E$ , балластного сопротивления  $R_g$ , сопротивления датчика  $R_d$  и конденсатора  $C$ . Последний необходим для того, чтобы не пропускать постоянный ток. В этом случае постоянная составляющая падения напряжения на сопротивлении датчика  $R_d$ , в сотни раз превышающая переменную составляющую, отфильтровывается этим конденсатором. В качестве измерителей в этой схеме, как правило, используются электроннолучевые трубки.

По закону Ома мгновенный ток в цепи потенциометрической схемы

$$I_t = \frac{E}{R_g + R_d}, \quad (\text{VI.14})$$

а напряжение на концах датчика

$$E_d = I_t R_d = \frac{R_d}{R_g + R_d} E. \quad (\text{VI.15})$$

Продифференцировав выражение (VI.15) по  $R_d$ , получим

$$\frac{dE_d}{dR_d} = E \frac{R_g}{(R_g + R_d)^2}. \text{ или } dE_d = \frac{R_g}{(R_g + R_d)^2} dR_d; \quad (\text{VI.16})$$

правую часть выражения (VI.16) умножим и разделим на  $R_d$ , тогда

$$dE_d = E \frac{R_g R_d}{(R_g + R_d)^2} \cdot \frac{dR_d}{(R_g + R_d)^2} \cdot \frac{dR_d}{R_d} = E \frac{R_g R_d}{(R_g + R_d)^2} K \frac{dI}{I}. \quad (\text{VI.17})$$

Действие балластного сопротивления в этой схеме состоит в том, чтобы при изменении сопротивления датчика предотвратить значительное изменение тока в цепи, которое может вызвать снижение выходного сигнала датчика.

Балластное сопротивление  $R_g$  должно быть как можно большим, но практически его ограничивают удвоенной величиной сопротивления датчика, так как дальнейшее его увеличение, неизбежно сопровождающееся увеличением напряжения питания для сохранения номинального тока в датчике, не экономично. Иногда оказывается целесообразным выходной сигнал в потенциометрической схеме получать не от датчика, а от балластного сопротивления.

При постоянном напряжении батареи  $E$  некоторое увеличение напряжения на зажимах датчика  $E_d$  вследствие деформации его под нагрузкой неизбежно должно сопровождаться уменьшением

напряжения  $E_G$  на зажимах балластного сопротивления, чтобы сумма падений напряжения в замкнутой цепи равнялась нулю.

Таким образом, выходной сигнал потенциометрической схемы зависит от отношения сопротивлений  $\frac{R_G}{R_d}$  и от напряжения  $E$  батареи. При постоянном напряжении батареи максимальный выходной сигнал получается при  $R_G = R_d$ .

Тарировка потенциометрической схемы производится так же, как и цепи измерительного моста. Балластное сопротивление или датчик шунтируется большим сопротивлением так, чтобы эквивалентное сопротивление параллельно включенных элементов было меньше начального на величину, соответствующую тарировочной деформации.

Значения коэффициента чувствительности проволочных тензодатчиков при допустимых отклонениях его от номинала приводятся заводом-изготовителем, поэтому обычно при измерении деформаций от действия статических нагрузок не требуется производить тарировку тензометров. Однако при желании получить очень точные результаты измерений можно произвести тарировку нескольких экземпляров, отобранных из партии тензодатчиков и одновременно проверить технику приклейки тензодатчиков. Тарировку лучше всего производить, наклеив датчики на тарировочную пружину или на стержень из высокопрочной стали, в которых под действием нагрузки возникает равномерно распределенное относительное удлинение известной величины.

Значительно проще производить тарировку тензодатчиков на изогнутой балке. При этом, однако, необходимо учитывать расстояние от нейтральной линии балки до проволоки тензодатчика и вводить соответствующие поправки. Найденное путем тарировки значение коэффициента чувствительности верно только при измерении одноосных напряжений в материале с тем же коэффициентом Пуассона, что и у материала тарировочной балки.

При исследовании динамических процессов тарировку проволочных датчиков сопротивления следует производить в лабораторных условиях для каждой получаемой партии.

Исследование деформации тензодатчиками при напряженном состоянии. Тензодатчики сопротивления способны реагировать на деформации высокой частоты (до 50 кгц) при обеспечении безынерционности регистрации этих процессов. Однако с помощью одного тензодатчика может быть определена деформация только для случая одноосного (линейного) напряженного состояния. При более сложных напряженных состояниях необходимо использовать группу датчиков, наклеенных либо один возле другого, либо один на другой. Такое расположение датчиков принято называть розеткой. Розетки часто делают из трех датчиков. Когда же в розетке применяются четыре датчика, то

последний из них, дополнительный, обычно употребляется для проверки и уточнения результатов, полученных от первых трех датчиков.

Для плоского напряженного состояния при известном направлении главных деформаций и неизвестном их соотношении требуется, как минимум, два датчика. Располагать эти датчики следует по известным направлениям главных деформаций. В общем случае объемного напряженного состояния (трехосного) или в случае плоского напряженного состояния с неизвестными главными направлениями требуется три датчика. Располагать их следует под углами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и  $\varphi_3$  к направлению, принимаемому за основное. Обычно углы между датчиками принимаются в  $45^\circ$  и  $60^\circ$ . При указанной величине углов погрешности вычисления величин и направлений главных деформаций меньше, что существенно упрощает решение уравнений.

Наиболее широко распространены два вида розеток с тремя датчиками каждый: розетка с датчиками, расположенными под углами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $90^\circ$ , называемая прямоугольной, и розетка с датчиками, расположенными под углами  $0^\circ$ ,  $60^\circ$  и  $120^\circ$ , называемая равноугольной, или дельта-розеткой (рис. 67, б и в). Некоторую разновидность последней розетки представляет Т-дельта-розетка, имеющая четыре датчика, причем четвертый, дополнительный, расположен перпендикулярно к одному из трех основных (рис. 67, г). Точный результат при использовании розеток получится только в том случае, если деформации на площадке, занимаемой розеткой, сохраняют постоянство. Это обстоятельство из-за отсутствия датчиков с малой базой накладывает большие ограничения на тензометрирование.

Погрешности при тензометрировании с помощью проволочных датчиков обуславливаются, с одной стороны, качеством применяемой аппаратуры, в том числе датчиков и измерительных цепей, а с другой — влиянием внешних условий (изменение тем-

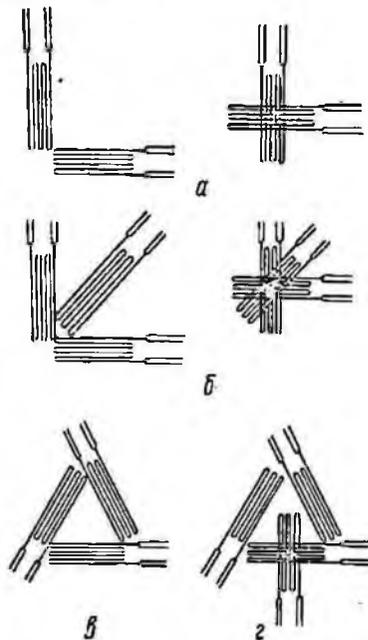


Рис. 67. Различные виды розеток датчиков:

а — розетки из двух датчиков; б — прямоугольная розетка; в — дельта-розетка (равноугольная); г — Т-дельта-розетка.

пературы, влажности, напряжения и частоты тока источников питания).

Причины, вызывающие погрешности тензометрирования и обусловленные качеством применяемых датчиков, следующие:

1. Плохая наклейка датчиков и неидентичность их чувствительных решеток. Погрешности, вызванные этими причинами, особенно существенны в тех случаях, когда отградуировать каждый датчик непосредственно на месте наклейки не представляется возможным, т. е. когда коэффициент тензочувствительности определяется на другом аналогичном датчике, наклеенном на тарировочном устройстве. Величина погрешности в этом случае зависит от тщательности изготовления и наклейки датчиков. Однако самый тщательный отбор и качественная наклейка датчиков не могут исключить разброса их по чувствительности, достигающего 2—3%. Величина погрешности от изменения коэффициента тензочувствительности не зависит от величины измеряемой деформации.

2. Ползучесть клея. Погрешность вследствие этого свойства клея тем больше, чем большая деформация измеряется и чем продолжительнее действие нагрузки.

3. Неточность градуировки приборов. При динамических измерениях, если градуировка статическая, эта погрешность зависит от отношения частоты вынужденных (измеряемых) колебаний к частоте собственных колебаний и может быть снижена путем применения динамической градуировки.

4. Ошибки в измерительных приборах и в отсчетных устройствах. Эти погрешности при измерении на несбалансированном мосте увеличиваются с уменьшением измеряемой деформации. Погрешность, вносимая в общую мостовую схему шлейфовым осциллографом, весьма значительна, так как вибратор этих осциллографов зачастую дает ошибки до 2—3%.

Таким образом, погрешность всей схемы, возникающая при тензометрировании, когда невозможна градуировка датчика на месте и проверка его тензочувствительности перед измерением, может достигать 10—15%.

## 2. Измерение напряжений пьезоэлектрическими датчиками

Пьезокерамические материалы, применяющиеся для электрических измерений механических величин, получают все более широкое распространение. Пьезокерамические материалы представляют собой неорганические диэлектрики с высокой диэлектрической проницаемостью. Для этих материалов характерна зависимость диэлектрической проницаемости от напряженности электрического поля и температуры.

Пьезоэлектрические датчики из титаната бария имеют ряд преимуществ по сравнению с другими датчиками. Они отличаются высокой механической прочностью и достаточной чувствительностью. Применяемые титанато-бариевые кристаллы предназначены для регистрации только нормальных напряжений, перпендикулярных к поверхности датчика. Для исключения воздействия других составляющих тензора напряжений датчик помещается внутрь специальной обоймы.

Тарировка пьезодатчиков из титаната бария. Тарировка пьезодатчиков производится следующим образом. Образец, помещенный между двумя электродами держателя, подвергается сжатию прессом. Измерение заряда, возникающего на обкладках образца при резком снятии нагрузки, производится баллистическим гальванометром. Величина заряда  $Q$  рассчитывается по формуле

$$Q = C_{\delta} \alpha, \quad (\text{VI.18})$$

где  $C_{\delta}$  — постоянная баллистического гальванометра;  $\alpha$  — отклонение гальванометра.

Пьезоэлектрический модуль определяется следующим образом:

$$d = \frac{I}{\sigma} = \frac{Q/S}{P/S} = \frac{\alpha C_{\delta}}{P} = \alpha k, \quad (\text{VI.19})$$

где  $I$  — электрическая поляризация в направлении механического сжатия образца;  $\sigma$  — механическое напряжение;  $P$  — давление на образец;  $S$  — площадь рабочей поверхности датчика;  $k$  — постоянная прибора.

Выполнение необходимого условия при тарировке — отсутствие механических воздействий в других направлениях — достигается специальной конструкцией держателя. Поскольку тарировка пьезодатчиков производилась при постоянной величине нагрузки, необходимо было исследовать зависимость пьезоэлектрического модуля от приложенной импульсивной нагрузки. С помощью специальной обоймы датчик плотно зажимался между поверхностью стального массивного куба и стальным бойком, и производился удар стальным шариком, подвешенным на нити. По углу отклонения шарика и длительности удара (длительность удара фиксируется электронным осциллографом) вычисляется максимальная сила удара:

$$F = \frac{2m \sqrt{2gh}}{\Delta t}, \quad (\text{VI.20})$$

где  $m$  — масса шарика;  $\Delta t$  — длительность удара;

$h$  — высота, с которой падает шарик.

Изменяя угол отклонения нити и вес шарика, можно варь-

ровать силу удара в широком диапазоне. Заряд, возникающий на электродах датчика при ударе, определяется соотношением

$$Q = CV, \quad (\text{VI.21})$$

где  $C$  — емкость датчика;  $V$  — амплитуда сигнала, полученного на осциллографе в результате действия нагрузки. С другой стороны,

$$Q = dF. \quad (\text{VI.22})$$

Таким образом, согласно (VI.6) и (VI.7)

$$d = \frac{CV}{F}. \quad (\text{VI.23})$$



Рис. 68. Осциллограмма, полученная при измерении напряжений в воде, возникающих при взрыве 100 мг тэна на расстоянии 20 радиусов от центра заряда.

Кроме того, была исследована зависимость пьезоэлектрического модуля от величины динамической нагрузки в пределах 100—1500  $\text{дан/см}^2$ . В исследованных пределах изменения нагрузки величина пьезомодуля не изменялась, что свидетельствует о возможности

применения описанного метода тарировки датчиков при использовании их в импульсном режиме.

Проверка правильности тарировки при действии взрывной нагрузки осуществляется замером напряжений в воде. Для этого в аквариум с водой помещают кольца разных диаметров. В центре меньшего кольца укрепляется заряд ВВ, а по окружности — пьезоэлектрические датчики. Пьезодатчики и заряд ВВ покрывают изолирующей пленкой. Индикатором могут служить капли азуда свинца. По осциллограммам напряжение — время (рис. 68) рассчитывают напряжение в заданной точке.

Б. С. Яковлев [9] приводит соотношение для вычисления максимального давления  $P_{\text{max}}$  при подводном взрыве в безграничной жидкости

$$P_{\text{max}} = \beta \left( \frac{G^3}{r} \right)^{1,13}, \quad (\text{VI.24})$$

где  $\beta$  — постоянный коэффициент;  $G$  — вес заряда ВВ;  $r$  — расстояние, на котором измеряется давление.

Согласно принципу энергетического подобия значение коэф-

коэффициента  $\beta_i$  для любых ВВ может быть вычислено с помощью приближенной зависимости  $\beta_i = \gamma_i B$ ,

$$\gamma_i = \left( \frac{Q_i}{Q_T} \right)^{\frac{1,13}{3}} = \left( \frac{Q_i}{Q_T} \right)^{0,376}, \quad (\text{VI.25})$$

где  $Q_i$  — удельная энергия данного ВВ, ккал/кг;  $Q_T$  — удельная энергия тротила,  $Q_T = 1000$  ккал/кг.

Для безразмерных расстояний выражение для максимального давления преобразуется к виду

$$P_{\max} = \frac{14700}{\bar{r}^{1,13}}, \quad (\text{VI.26})$$

где  $\bar{r}$  — относительное расстояние. Для заряда тэна это выражение имеет вид

$$P_{\max} = \frac{1680}{\bar{r}^{1,13}}, \quad (\text{VI.27})$$

В табл. 8 приведены некоторые данные вычислений, проведенных для относительных расстояний 20 и 30 радиусов заряда. Из этих данных видно, что различие между расчетными и экспериментальными значениями  $P_{\max}$  составляет 8—10%. Это свидетельствует о возможности применения пьезоэлектрических датчиков для замера напряжений при взрывных нагрузках.

Таблица 8

Значение величины давления  $P_{\max}$

№ датчиков	Относительное расстояние, радиусы	$P_{\max}$ , дан/см	
		экспериментальное	расчетное
1	20	52	56,7
2	20	57,2	56,7
3	20	56,9	56,7
4	30	37,5	36
5	30	33,7	36
6	30	35,3	36

Методика измерения напряжений пьезоэлектрическими датчиками. При измерении напряжений в среде, проводимость которой выше проводимости датчика, последний должен быть тщательно изолирован. В противном случае среда будет шунтировать датчик, что неизбежно отразится на точности его показаний. В качестве изолирующего материала можно использовать пленки высокомолекулярных соединений. Кроме того, можно применять

слои изолирующих материалов конечной ширины. Однако напряжения, возникающие в среде, не должны превышать предел пропорциональности материала изолятора. Только при этом условии наличие изолятора не отразится на величине измеряемых напряжений.

При возникновении в разрушаемой среде поля напряжений на датчик действует сила

$$F = \sigma S, \quad (\text{VI.28})$$

где  $\sigma$  — величина нормальных напряжений;  $S$  — площадь рабочей поверхности датчика.

Под воздействием этой силы на поверхности датчика возникает электрический заряд  $Q$ , пропорциональный величине последней:

$$Q = Fd, \quad (\text{VI.29})$$

где  $d$  — пьезоэлектрический модуль.

Это количество электричества создает потенциал  $U$ :

$$U = \frac{Q}{C}, \quad (\text{VI.30})$$

где  $C$  — емкость измерительной системы.

Емкость измерительной системы  $C$  складывается из емкости датчика  $C_d$ , емкости подводящих проводов  $C_{пр}$ , входной емкости пластин осциллографа  $C_{пл}$  и добавочной емкости  $C_{доб}$ , если она необходима:

$$C = C_d + C_{пр} + C_{пл} + C_{доб}. \quad (\text{VI.31})$$

По величине отклонения луча на экране осциллографа можно определить величину напряжения в данной точке в любой момент времени:

$$\sigma = \frac{\alpha h C}{sd}, \quad (\text{VI.32})$$

где  $\alpha$  — чувствительность электроннолучевой трубки осциллографа;  $h$  — величина отклонения луча.

Необходимо отметить, что подача сигнала от датчика непосредственно на пластины осциллографа практически исключает искажение его формы. Для регистрации сигналов от пьезоэлектрических датчиков можно использовать электронные осциллографы типа ОК-17М и С1-29. Время обычно тарировано подачей на луч осциллографа сигналов от кварцевого генератора.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Богородицкий Н. П., Пасынков В. В. Материалы в радиоэлектронике. Госэнергоиздат, М., 1961.
2. Пасынков В. В. и Виноградов В. Б.—Изв. АН СССР, сер. физ., 1957, XXI, 3.
3. Пригоровский Н. И.—В кн.: Теоретические основы конструирования машин. Машгиз, М., 1957.
4. Пригоровский Н. И. Экспериментальное определение деформаций, напряжений и усилий. Справочник машиностроителя № 3, Машгиз, 1955.
5. Пятницкий А. А. Введение в теорию и практику тензометрирования. Изд. Новочеркасского политехнического института, 1960.
6. Раевский Н. П. Датчики механических параметров машин, Изд-во АН СССР, М.
7. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике. Гостехиздат, М., 1957.
8. Турчин А. М. и Новичкий П. В. Проволочные преобразователи и их техническое применение. Госэнергоиздат, М., 1957.
9. Яковлев Б. С. Гидродинамика взрыва. Судпромгиз, Л., 1961.
10. Matthias and A. Hippel.—Phys. Rev. 1948, 73, 11, 1378.

В последнее время среди исследователей все шире распространяется мнение, что скорость развития трещин является одной из важнейших характеристик процесса разрушения хрупких тел, так как она в значительной степени определяет временные характеристики процесса разрушения. Измерения этой величины начаты сравнительно недавно, но разнообразие и противоречивость фактического материала, полученного при экспериментах, говорит о сложности природы развития трещин.

### 1. Литературный обзор исследуемого вопроса

Серия экспериментов, проведенных на стекле, позволила Х. Шардину и А. Смекалу [1] прийти к выводу, что по мере распространения трещины от источника разрушения скорость ее развития увеличивается и достигает максимального значения, равного значению постоянной конечной скорости разрушения при идеальном хрупком разрушении.

Шардин и Штрут [1] не обнаружили в пределах опыта влияния общего напряжения на максимальную скорость разрушения. Найденная ими максимальная скорость разрушения обычного стекла, равная 1500 м/сек, не зависит от температуры материала, но резко изменяется с введением в стекло незначительных добавок, т. е. зависит от разрушаемого материала. Шардин считает, что в общем случае скорость распространения является функцией физико-механических свойств данного материала, поверхностного натяжения, т. е.

$$v_f = f(T, \rho, E, \mu, \chi), \quad (\text{VII.1})$$

где  $T$  — поверхностное натяжение;  $\rho$  — плотность материала;  $E$  — модуль упругости;  $\mu$  — коэффициент Пуассона;  $\chi$  — остаточная пластическая энергия в материале.

В работе Е. А. Кузьмина и В. П. Пуха [3] предпринята попытка установить закономерности развития хрупких трещин. Материалом исследований были стекло и канифоль. Авторы утверждают, что скорость развития хрупких трещин зависит от величины напряжений в разрушаемой среде и с увеличением послед-

них растет до некоторого предела. Значение максимальной скорости развития трещин для стекла получено при приблизительно таком же, как и у Шардина — 1520 м/сек для стекла и 430 м/сек для канифоли.

В последнее время начаты исследования скорости развития трещин в горных породах при взрывных нагрузках. В работе Ф. И. Кучерявого, М. Ф. Друкованого, Ю. В. Гаека [4] описан метод измерения скорости развития трещин проволочными датчиками. На блок с пробуренным в центре шпуром наклеивались тонкие проволочки диаметром 0,02 мм в виде концентрических окружностей — колец. При взрыве в шпуре заряда ВВ трещины, распространяющиеся от заряда, последовательно рвали эти кольца, а разрывы фиксировались осциллографом МПО-2. Зная расстояние между кольцами и моменты их разрывов, по обычным кинематическим соотношениям вычисляли скорость развития трещин. Полученное авторами значение скорости развития трещин в известняках шестой зоны карьеров Еленовского рудоуправления (удельный расход 300 г/м<sup>3</sup>) составляет 1700 м/сек.

Скорости разрушения уступа равны 0,6—0,9 скорости развития трещин в массиве. Коэффициент 0,6—0,9 учитывает степень трещиноватости уступа. Подобным образом проволочными датчиками измеряли скорость разрушения уступа Н. У. Турута и др. [6]. Они определили, что скорость сдвижения массива зависит от физико-механических свойств горных пород, особенностей их структуры, параметров расположения скважинных зарядов и энергетических факторов. Скорость разрушения известняков шестой зоны карьеров Еленовского рудоуправления при удельном расходе 290 г/м<sup>3</sup> составила 58—427 м/сек. Авторы считают, что скорость разрушения массива горных пород по высоте уступа не является постоянной величиной. Наименьшее значение она имеет в отдаленной зоне. По мере приближения к заряду величина скорости увеличивается и достигает максимального значения.

В Уральском филиале АН СССР П. С. Данчев [2] исследовал скорость распространения трещин на плоских моделях из бетона. Он установил, что после прохождения волны сжатия возникают радиальные трещины, скорость распространения которых убывает с увеличением расстояния от центра взрыва, затем — от кольевые и последними — концентрические. Время разрушения зависит от скорости распространения трещин, т. е. от свойств среды и параметров поля напряжений.

Таким образом, как свидетельствуют приведенные работы, по вопросам изучения скорости распространения разрушений нет единого мнения. Результаты экспериментов часто противоречивы. Это является стимулом для проведения дальнейших исследований скорости разрушения твердых тел и горных пород при импульсивных нагрузках с помощью более совершенных методик.

## 2. Новые методики исследования скорости развития трещин

В лаборатории механики взрыва Института геотехнической механики АН УССР скорость развития трещин замерялась на моделях из обычного стекла, на цементных и алебастровых блоках, на блоках горных пород и непосредственно в массиве.

При попытке производить замеры с помощью проволочных датчиков обнаружилось, что они разрываются после того как трещина раскроется на некоторую величину. Такое явление можно объяснить большими деформациями самой проволоки и клея. В связи с этим при проведении дальнейших исследований вместо проволочных датчиков применяли серебряную пасту (контактол), основным компонентом которой является коллоидное серебро. Добавляя различные связующие вещества, подбирали ее состав таким образом, чтобы физико-механические свойства пластины были близкими к физико-механическим свойствам исследуемых пород и материалов. Например, при экспериментах на цементных и алебастровых блоках в качестве связующего вещества применяли цемент и алебастр, а при экспериментах на блоках горных пород — эпоксидный клей.

Преимущество пасты по сравнению с проволочными датчиками заключается в хорошем сцеплении с породой и в возможности регулирования ее свойств при достаточно высокой проводимости (удельное сопротивление для большинства исследованных пород не более 0,0365 ом·см).

Рис. 69. Электрическая схема подсоединений при измерении скорости развития трещин.

Методика эксперимента следующая. На поверхности исследуемого образца наносится проводящее кольцо шириной 0,2—0,4 мм на расстоянии нескольких миллиметров друг от друга (в зависимости от исследуемой породы и параметров импульса). Кольца являются шунтом пластины осциллографа ОК-17М, на которые подается постоянное напряжение. В качестве источника питания используются батареи БАО-100.

При разрыве колец на пластинах осциллографа изменяется потенциал, что приводит к отклонению луча на экране. Электрическая схема подсоединений приведена на рис. 69. Время разры-

ва определяется из осциллограмм по времени отклонения луча на осциллографе (рис. 70).

Для блоков с большой проводимостью сопротивление 2—5 ком шунтируется сопротивлением  $R_1$  порядка нескольких мегаом, чтобы обеспечить большее отклонение луча на экране. Запуск осциллографа осуществляется от пьезоэлектрического дат-



Рис. 70. Осциллограммы, полученные при измерении скорости развития трещин.

чика, расположенного на заряде ВВ. На схеме рис. 69 приведено подключение только двух колец к одному осциллографу. Подсоединение других колец аналогично.

Таблица 9  
Значения скорости развития трещин

№ модели	$\Delta t$ , мксек		Скорость развития трещин, м/сек	
	по осциллограммам	по пленке СФР	по осциллограммам	по пленке СФР
1	4,35	4,8	2000	1830
2	4,5	4,8	1950	1830
3	4,5	4,8	1950	1830

Разрыв кольца в момент прохождения через него трещины можно проверять на прозрачных материалах с одновременной регистрацией разрыва кольца на осциллографе и на сверхскоростной фоторегистрирующей установке (СФР-1). По кадрам СФР можно визуальным образом проследить за развитием трещин и определить время разрыва полуколец (рис. 71). Как следует из табл. 9, промежуток времени между разрывами двух колец  $\Delta t$ , найденный по пленке СФР, составляет во всех моделях 4,8 мксек. На первый взгляд кажется, что этот результат можно принять за истинный, и тогда показания, полученные по осциллограммам, несколько отличаются от него. Однако запись на СФР дискрет-

ная и время между соседними кадрами 1,6 мксек. Если рассмотреть пленку СФР с записью разрушения моделей, то можно заметить, что на каком-то кадре (обозначим его I) трещина подходит к кольцу I. На следующем кадре II — кольцо I разорвано, трещина движется по кольцу II; на кадре III — кольцо II еще не разрушено. На кадре IV видим разорванное кольцо II и рас-

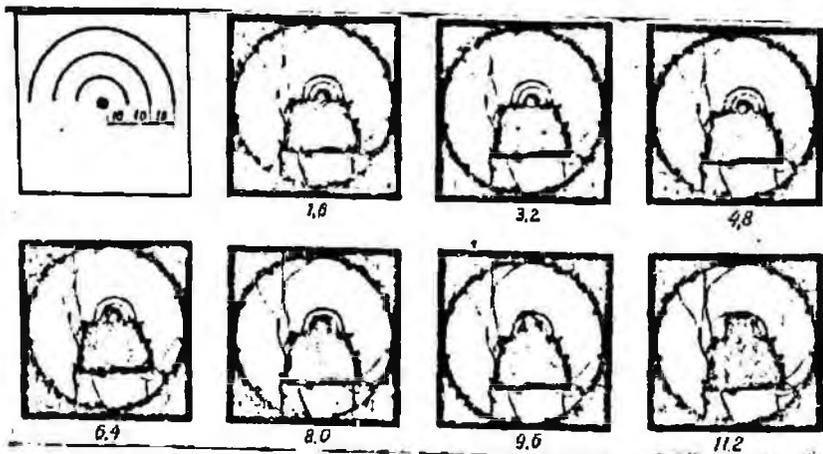


Рис. 71. Кинокадры процесса разрушения модели взрывом (цифры означают время от начала взрыва в мксек).

пространившиеся от него трещины. Таким образом, можно сказать, что промежуток времени между разрывами колец I и II не больше 4,8 мксек (от кадра I до кадра IV).

На осциллографе запись времени не дискретная, а непрерывная. Промежутки времени  $\Delta t$ , найденные по осциллограммам, несколько меньше, чем на СФР, но попадают в тот же интервал. Следовательно, по описанной методике (запись времени на ОК-17) с применением серебряной пасты можно определять скорость развития трещин как на прозрачных, так и на непрозрачных материалах.

По утверждению некоторых авторов скорость развития трещин внутри и на поверхности разрушаемых блоков существенно различна. Чтобы проверить это, были изготовлены цементные и алебастровые кубики размерами  $20 \times 20 \times 20$  см, внутри которых были сделаны полукольца из проводящего состава. Над ними на поверхности блока также напосились такие же полукольца. Замеры показали, что скорость трещин внутри и на поверхности блока одна и та же. Результаты экспериментов, проведенных в ИГТМ АН УССР, позволяют сделать вывод, что при небольших

размерах образцов достаточно измерить скорость развития трещин на поверхности испытуемых объектов.

При проведении экспериментов было обнаружено, что трещины возникают одновременно на разных расстояниях от центра взрыва. Подобные результаты получены П. С. Данчевым и др. Это явление можно объяснить, если исходить при рассмотрении процесса разрушения из гипотез М. В. Мачинского и А. А. Гриффитса, согласно которым во всяком материале до появления поля напряжений имеются точки разрушения, откуда начинают прорастать трещины.

Число зарождающихся трещин в единице объема не представляет собой неизменную величину для данной породы. С ростом величины напряжения число точек разрушения возрастает, а длина единичной трещины уменьшается. Это подтверждается экспериментальными работами. Например, В. Р. Регель [5] обнаружил, что с увеличением приложенного напряжения резко возрастает число трещин на  $1 \text{ см}^2$  поверхности образца из полметилметакрилата, а длина отдельных трещин существенно уменьшается при неизменной длительности нагружения.

Рассматривая процесс разрушения, необходимо различать скорость развития отдельной трещины и скорость процесса разрушения. Скорость развития отдельных трещин, которые исходят из зон пониженной прочности, обычно называют скоростью развития трещин  $v_{тр}$ . Среднюю скорость распространения всех трещин за время разрушения называют скоростью процесса разрушения  $v_p$ . Если материал тела описывается моделью Гриффитса, эти скорости различаются по величине. Естественно, что средняя скорость разрушения должна быть больше скорости развития трещин.

В экспериментах скорость развития трещин определяется по известному расстоянию между соседними кольцами и времени разрыва этих колец:

$$v_{тр} = \frac{r_{m, m+1}}{|t_{m+1} - t_m|} \quad (VII.2)$$

где  $r_{m, m+1}$  — расстояние между  $(m+1)$ -м и  $m$ -м кольцами;  $t_{m+1}$  — соответственно время разрыва  $(m+1)$ -го и  $m$ -го колец.

Среднюю скорость разрушения находят по известному расстоянию между первым и крайним кольцами и по промежутку времени между разрывами первого ( $t_{min}$ ) и последнего ( $t_{max}$ ) кольца:

$$v_p = \frac{r_k - r_1}{t_{max} - t_{min}} \quad (VII.3)$$

где  $r_1$  — расстояние от центра заряда до первого кольца;  
 $r_k$  — расстояние от центра заряда до крайнего  $k$ -го кольца.

В описанных в литературе [4, 6] экспериментах по определению скорости развития трещины расстояния между проволочными кольцами выбирались произвольно. Однако от расстояния между кольцами зависит вероятность получения достоверного результата. Если между кольцами расположено несколько центров трещинообразования, то вероятность разрыва обоих колец одной трещиной ничтожна и необходимо решить вопрос о максимально возможном расстоянии между измерительными кольцами. Для его выяснения в ИГТМ АН УССР была предпринята попытка в первом приближении определить расстояние между центрами трещинообразования. Предполагалось, что центры трещинообразования равномерно расположены по всему блоку. Тогда число точек разрушения на промежутке  $r_n - r_1$  будет

$$n = \frac{v_p}{v_{tp}} \quad (\text{VII.4})$$

Среднее расстояние между ними

$$a_n = \frac{r_n - r_1}{n} \quad (\text{VII.5})$$

Из формул (VII.3) и (VII.4) получаем

$$a_n = v_{tp} t_p \quad (\text{VII.6})$$

где  $t_p$  — время разрушения блока,  $t_p = t_{\max} - t_{\min}$ .

Нетрудно установить, что при расстоянии между кольцами  $a_n/3$  и наличии не менее четырех колец при любом их расположении обеспечивается не менее  $1/3$  достоверных результатов. При сокращении расстояния вероятность получения достоверных результатов скорости развития отдельных трещин стремится к  $1/2$ . Поэтому наиболее целесообразно принимать расстояния между кольцами  $a_n/4$ , а размеры образца такими, чтобы рядом разместилось не меньше пяти колец. В этом случае вероятность получения истинной скорости развития трещины составляет около 0,5 всех полученных значений. Эксперимент следует провести таким образом, чтобы имелось не менее десяти результатов, из которых четыре-пять результатов должны совпадать в пределах погрешности измерений. В этом случае может быть гарантирована истинная величина скорости развития трещин.

Поскольку расстояние между точками трещинообразования не известно, то кольца следует наносить на расстоянии 3—5 мм друг от друга, допустив, что  $a_n' = 12 \div 20$  мм. На основании эксперимента при таких расстояниях между кольцами определяют величину  $a_n''$ . Если окажется, что  $a_n'' > a_n'$ , то исследования можно продолжать при том же расстоянии между кольцами до накопления необходимого числа результатов. В том случае, когда

$a_n'' > a_n'$ , необходимо уменьшить расстояние между кольцами до величины  $a_n''/4$  и произвести последующую проверку до выполнения условия  $a_n'' \geq a_n'$ .

Исследования по определению скорости развития трещин и скорости разрушения позволяют в первом приближении подойти количественно к построению модели твердого тела Гриффитса и задать начальные параметры для моделирования процесса разрушения.

Приведем некоторые результаты исследований скорости развития трещин и скорости процесса разрушения. Блоки выбирались непосредственно на карьерах. По форме они были близки к кубическим, с ребром 30—40 см. В центре блока пробуривали шпур, вокруг которого в сторону ЛНС серебряной пастой наносились полукольца через 5—10 мм. Удельный расход ВВ, в качестве которого применяли аммонит В-3, был 600 г/м<sup>3</sup>.

Таблица 10

Характеристики процесса разрушения при разрушении негабаритных блоков

Место отбора образцов	Наименование пород	$v_{тр}$ , м/сек	$v_p$ , м/сек	$a_n$ , мм
Ново-Криворожский ГОК	Мартито-магнетитовые роговики	176—315	490—1040	18,2—21,8
	Карбонатно-магнетитовые роговики	173—360	445—530	18—23
	Сланцы биотито-хлоритовые	315	940	29
Центральный ГОК	Карбонатно-магнетитовые роговики	220—368	620—1200	Около 30
	Магнетитовые роговики	86—101	331—392	18—24
	Силикатно-магнетитовые роговики	312	1450	24
Ингулецкий ГОК	Сланцы хлоритовые	580—670	985—1050	40—50
	Гематито-мартитовые роговики	611	1170	40
Южный ГОК	Гематито-магнетитовые роговики	236	630	30
Коломоевский гранитный карьер	Диабазы	185—220	980	27
	Граниты	120—170	500—710	32
Дочучаевский флюсо-доломитный комбинат	Доломиты	356—553	1040—1380	20—24
	Известняки сливные серые	290—480	1170—1410	23—28
	Доломитизированный известняк	350—370	910—1110	23—27
Винницкая область, Гниваньский гранитный карьер	Граниты серые	210—230	550—820	31—39

По полученным осциллограммам и формулам (VII.1—VII.6) определяли  $v_{тр}$ ,  $v_p$ ,  $a_n$ . Результаты исследований по типам пород представлены в табл. 10. Из таблицы следует, что средняя скорость разрушения в 1,5—2,5 раза больше, чем скорость развития отдельных трещин.

По описанной методике для некоторых пород определялись скорость развития трещин и скорость разрушения непосредственно в массиве при взрывах шпуровых зарядов. При этом диаметры шпуров были 36 мм; глубина шпуров 2 м; ЛНС 1,4 м; ВВ — аммонит № 6; удельный расход 600 г/м<sup>3</sup>.

Кольца шириной 1 мм наносили вокруг шпура на расстоянии 10 мм одно от другого. Расстояние между первым и последним кольцами 100 мм.

Таблица 11

Характеристика процесса разрушения при разрушении массива шпуровыми зарядами

Место проведения эксперимента	Наименование породы	$v_{тр}$ , м/сек	$v_p$ , м/сек
ДФДК, доломитный рудник Коломоевский гранитный карьер	Известняки серые	300—370	1200—1310
	Граниты	130—200	700—800
	Диабазы	245—270	1000—1200

Данные табл. 10 и 11 свидетельствуют о совпадении скорости разрушения и скорости развития трещин при разрушении уступа шпуровыми зарядами и взрывами негабаритных блоков. При взрывании скважинных зарядов процесс разрушения может протекать с различной скоростью из-за неоднородности пород и различий в параметрах поля напряжения по высоте уступа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Атомный механизм разрушения. Материалы Международной конференции по вопросам разрушения, состоявшейся в апреле 1959 г. в Свонспотте (США), Москва, 1963.
2. Данчев П. С., Пучков Я. М., Ветлужских В. П. — В кн.: Труды Института горного дела, 7,5—14. Уральский филиал АН СССР, 1963.
3. Кузьмин Е. А., Пух В. П. — В кн.: Некоторые проблемы прочности твердого тела. Изд-во АН СССР, М., 1959.
4. Кучерявый Ф. И., Друкованый М. Ф., Гаек Ю. В. Короткозамедленное взрывание на карьерах. Госгортехиздат, М., 1962.
5. Регель В. Р. — ЖТФ, 1951, 21, 3; 1956, 26, 2.
6. Турута Н. У. и др. — В кн.: Взрывное дело, 54/11. «Недра», М., 1964.

Взрывы в карьере и шахте служат источником возбуждения в массиве горных пород сейсмических упругих волн, которые распространяются на значительные расстояния. Существует два вида волн: объемные и поверхностные. Объемные волны могут быть продольными и поперечными. Направление колебания среды в продольных волнах совпадает с направлением их распространения от источника возбуждения, а в поперечных — колебания среды происходят перпендикулярно к направлению их распространения. При таком волновом движении среды материал испытывает сдвиговые деформации, поэтому поперечные волны иногда называют сдвиговыми волнами.

Поверхностные волны довольно разнотипны, но главными из них являются волна Рэлея и волна Лява. Поверхностная волна Рэлея вызывает движение частиц среды по эллиптическим орбитам, где главная ось, как правило, вертикальна. В верхней части эллипса частицы движутся в направлении к источнику, а в нижней — в противоположном направлении.

Сейсмические волны имеют различные скорости распространения. Наибольшая скорость распространения у продольных волн, наименьшая — у поверхностных волн. В теории упругости установлены следующие значения скоростей волн в зависимости от свойств среды:

для продольных волн

$$C_P = \sqrt{\frac{E\eta}{\gamma}}, \quad (\text{VIII.1})$$

для поперечных волн

$$C_S = \sqrt{\frac{E\eta}{2\gamma(1-\sigma_1)}}, \quad (\text{VIII.2})$$

для волн Рэлея

$$C_R = \varepsilon C_S, \quad (\text{VIII.3})$$

где  $E$  — модуль Юнга;  $\sigma_1$  — коэффициент Пуассона;  $\eta$  — ускорение силы тяжести;  $\gamma$  — плотность породы;  $\varepsilon$  — показатель, зависящий от коэффициента Пуассона: при  $\sigma_1 = 0 \div 0,5$   $\varepsilon = 0,874 \div 0,955$ .

Соотношение скоростей продольных и поперечных волн при  $\sigma_1 = 0,25$  близко к 1,73. Скорость поверхностных волн в аналогич-

ной среде приблизительно равна  $0,9 C_s$ . Скорость распространения упругих волн в однородной крепкой породе — величина постоянная и не зависит от источника возбуждения.

Интенсивность сейсмической волны характеризуется такими кинематическими параметрами колебаний среды или сооружения,

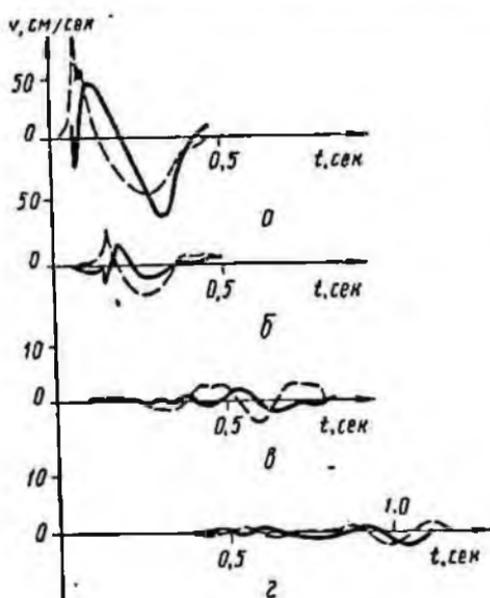


Рис. 72. Примеры осциллограмм колебаний грунта при взрыве на различных расстояниях от центра взрыва  $R$  (величина заряда  $1 \tau$ ):

$a-R=15 \text{ м}$ ;  $б-R=30 \text{ м}$ ;  $в-R=150 \text{ м}$ ;  $г-R=300 \text{ м}$ .

как скорость смещения, амплитуда смещения, ускорение колебания, энергия, период или частота колебаний; длительность колебаний и пр. На рис. 72 приведены типичные осциллограммы колебаний среды, зарегистрированные на различных расстояниях от центра взрыва  $R$  (сплошная линия — колебания среды в вертикальном направлении, штриховая — колебания среды в горизонтальном направлении). Колебательный процесс имеет сложную форму. Количественные значения параметров колебаний среды в зависимости от расстояния и величины заряда могут отличаться в десятки и сотни раз. Частоты колебаний могут также изменяться в значительных

пределах, а именно, от нескольких герц до десятков и сотен герц.

С сейсмическим проявлением при промышленных взрывах на горных предприятиях связаны многие инженерные и научные задачи, к числу которых следует отнести следующие: 1) исследование и установление сейсмической безопасности при взрывах для зданий и различных сооружений, инженерных коммуникаций; 2) исследование воздействия сейсмозрывных волн на устойчивость уступов и бортов карьеров и степени воздействия взрывов на режимы работы точных машин и оборудования, установление предельных значений колебаний для них; 3) исследование воздействия и обеспечение устойчивого состояния горизонтальных и вертикальных выработок, междукамерных целиков, рудных потолочин; 4) разработка инженерных методов управления (регулирования) сейсмическим проявлением при промышленных взрывах на горных предприятиях.

В настоящее время при непрерывно возрастающих масштабах взрывных работ на горнодобывающих предприятиях указанные вопросы очень важны. Поэтому не случайно в последние годы им уделяется большое внимание. В связи с развитием и совершенствованием технологии и практики буровзрывных работ, применением новой технологии и высокопроизводительных систем разработки месторождений возникают новые задачи, в том числе и в области сейсмического проявления при промышленных взрывах.

## 1. Приборы для исследования сейсмических колебаний

Приборы, применяемые в исследованиях сейсмического воздействия взрывов для измерения и регистрации параметров колебаний, можно разделить на две категории — основные и вспомогательные. К основным относятся датчики, воспринимающие и регистрирующие колебания среды или интересующего исследователя объекта. К вспомогательным относятся в первую очередь записывающие приборы — осциллографы, устройства и приспособления для запуска записывающей аппаратуры перед взрывом, анализирующая аппаратура — анализаторы и, наконец, приборы, устройства и оборудование для настройки и калибровки регистрирующей и записывающей аппаратуры.

По измеряемому параметру применяемые приборы (датчики) для регистрации колебаний при взрыве можно разделить на следующие группы: измерители скорости смещений — велосиметры; измерители смещений — амплитудомеры; измерители ускорения — акселерометры.

Для регистрации колебаний при взрыве применяются датчики, чувствительным элементом которых служит инерционная масса (сейсмическая), связанная определенным образом с исследуемым объектом. В этих датчиках измерение абсолютных колебаний заменяется измерением относительных колебаний массы и объекта. Такие приборы относятся к типу инерционных, или сейсмических.

Наибольшее применение нашли электродинамические (магнитоэлектрические) приборы и в меньшей степени — электромагнитные, индукционные, трансформаторные и емкостные приборы. Кроме того, иногда применяют пьезоэлектрические и омические приборы. Так как в исследованиях сейсмического воздействия взрывов ВВ в основном используются датчики сейсмического типа с гальванометрической регистрацией и записью колебательного процесса на пленку или фотобумагу, то остановимся на теоретических основах, технической характеристике, устройстве и условиях применения приборов только этого типа.

Принцип измерения колебаний объекта с помощью приборов сейсмического или инерционного типа сводится к тому, что измерение абсолютных значений колебаний объекта как бы заменяется измерением вынужденных относительных колебаний объекта и связанного с ним основания прибора, который, в свою очередь, через пружину связан с инерционной массой.

В приборах данного типа преобразование механических колебаний упругой системы в электрические токи осуществляется вследствие возбуждения электродвижущих сил, создаваемых в катушках преобразователя при изменении в них потока магнитной индукции.

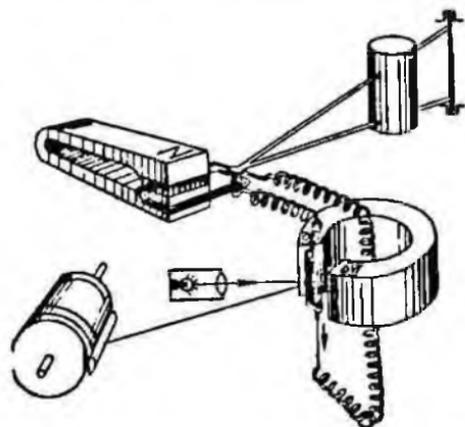


Рис. 73. Схема гальванометрической регистрации колебаний.

Принцип работы сейсмического прибора электродинамического типа заключается в том, что индукционная катушка, жестко скрепленная с маятником, перемещаясь в однородном магнитном поле, вызывает изменение магнитного потока. В электрической цепи, состоящей из катушки и гальванометра, возбуждается электрический ток.

Этот ток регистрируется фотографическим путем с помощью зеркального гальванометра (рис. 73).

В приборах электромагнитного типа изменение потока, проходящего через катушку преобразователя, происходит вследствие изменения сопротивления магнитной цепи при перемещениях железного якоря, связанного с инертной массой прибора. Следует отметить, что электродинамические приборы позволяют получить большие периоды собственных колебаний, что имеет важное значение при регистрации колебаний. Кроме того, приборы этого типа обладают значительной устойчивостью работы. Поэтому электродинамическим приборам отдается предпочтение. Э.д. с. в катушках преобразователя сейсмического прибора имеет следующее значение:

$$e_s = N_1 \frac{d\Phi_1}{dt}, \quad (\text{VIII.4})$$

где  $\Phi_1$  — поток магнитной индукции через каждый виток катушки;  $N_1$  — число витков в катушке.

Поскольку зависимость э.д.с. от времени находится через перемещение катушки, то

$$e_s = N_1 \frac{d\Phi_1}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = M\dot{x}, \quad (\text{VIII.5})$$

где  $M$  — коэффициент электромеханической связи;  $\dot{x}$  — скорость смещений.

Перемещение маятника

$$x \approx \theta L_k. \quad (\text{VIII.6})$$

Тогда

$$e_s = ML_k \dot{\theta} = G_1 \dot{\theta}, \quad (\text{VIII.7})$$

где  $L_k$  — расстояние от центра витков катушки, расположенной в магнитном поле, до оси вращения маятника;  $G_1$  — электродинамическая постоянная маятника.

Возникновение э.д.с. в катушке сейсмического прибора вызывает движение рамки гальванометра, которое также наводит э.д.с., противодействующую движению и вызывающую дополнительный ток в цепи гальванометра и индукционной катушки маятника. В связи с этим колебание такой системы описывается системой дифференциальных уравнений маятника и гальванометра, которая в окончательном виде выражается следующим образом:

$$\ddot{\theta} + 2\varepsilon_1 \dot{\theta} + n_1^2 \theta = -\frac{\ddot{x}}{l} + k \frac{K_2}{K_1} \dot{\varphi}; \quad (\text{VIII.8})$$

$$\ddot{\varphi} + 2\varepsilon_2 \dot{\varphi} + n_2^2 \varphi = k\dot{\theta}, \quad (\text{VIII.9})$$

где  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ ,  $\ddot{\theta}$  — соответственно угловое отклонение, скорость и ускорение маятника;  $\varphi$ ,  $\dot{\varphi}$ ,  $\ddot{\varphi}$  — соответственно угловое отклонение, скорость и ускорение гальванометра;  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  — коэффициенты затухания;  $n_1$ ,  $n_2$  — собственные круговые частоты колебаний;  $K_1$ ,  $K_2$  — моменты инерции;  $l$  — приведенная длина маятника;  $k$  — переводной множитель гальванометрической регистрации;  $\ddot{x}$  — ускорение колебаний исследуемого объекта.

При гальванометрической регистрации в уравнении движения маятника появляется слагаемое, которое характеризует реакцию гальванометра на маятник. Эта реакция называется связью и выражается через затухание. Связь обычно характеризуется коэффициентом связи  $\sigma^2$ , который равен произведению безразмерных коэффициентов  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , т. е.

$$\sigma^2 = \sigma_1 \sigma_2, \quad (\text{VIII.10})$$

где

$$\sigma_1 = k \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{1}{2\varepsilon_1}, \quad \sigma_2 = k \frac{1}{2\varepsilon_2}.$$

Следовательно,

$$\sigma_2 = k^2 \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{1}{4e_1 e_2} \quad (\text{VIII.10}')$$

Выполнив определенные преобразования, коэффициент связи можно выразить следующим образом:

$$\sigma^2 = \frac{(D_1 - D_{10})(D_2 - D_{20})}{D_1 D_2} \cdot \frac{r^2}{(R_S + R_1 + r)(r_g + R_2 + r)}; \quad (\text{VIII.11})$$

где  $D_1 = D_{10} + D_{11} + D_{12}$ ;  $D_2 = D_{20} + D_{21}$ ;  $D_{10}$  — воздушное затухание;  $D_{20}$  — воздушное или масляное затухание;  $D_{11}$  — затухание, обусловленное специальной демпфирующей катушкой;  $D_{12}$  — затухание, обусловленное рабочей индукционной катушкой;  $D_{21}$  — затухание вследствие взаимодействия переменного магнитного поля рамки гальванометра с магнитным полем постоянного магнита гальванометра.

В случае, когда  $R_1 = R_2 = 0$ ,  $r = \infty$ , т. е. когда гальванометр подключен на прямую к катушке маятника датчика (полная чувствительность прибора), коэффициент связи

$$\sigma^2 = \frac{D_{12} D_{21}}{D_1 D_2} \quad (\text{VIII.11}')$$

В том случае, когда нет никаких дополнительных затуханий,  $D_{12} \approx D_1$ ;  $D_{21} \approx D_2$  и, следовательно,  $\sigma^2 = 1$ .

Для схемы соединения с дополнительными сопротивлениями и шунтом

$$\sigma^2 = \frac{D_{12} D_{21}}{D_1 D_2} \cdot \frac{r^2}{(R_c + R + r)(r_g + R_2 + r)} \quad (\text{VIII.12})$$

Так как в гальванометр почти никогда не вводится дополнительное затухание, практически  $D_{21} \approx D_2$ , а если воздушное затухание очень мало, коэффициент связи будет иметь несколько иной вид:

$$\sigma^2 \approx \frac{D_{12}}{D_1} \cdot \frac{r^2}{(R_S + R_1 + r)(r_g + R_2 + r)} \quad (\text{VIII.12}')$$

При полной чувствительности  $\sigma^2 \approx \frac{D_{12}}{D_1}$ . Несмотря на некоторую разницу в принципе работы сейсмодатчиков электродинамического и электромагнитного типов, структура дифференциальных уравнений совершенно одинакова.

При экспериментальных исследованиях по регистрации колебаний могут ставиться самые различные задачи. Во многих случаях ставится вполне определенная задача получить измерения в виде записи прибором, соответствующие скорости смещения,

перемещению, ускорению или интегралу по времени от перемещений маятника. С помощью сейсмических приборов с гальванометрической регистрацией можно достаточно правильно записать необходимые кинематические параметры движения объекта, на котором выполняются замеры.

В исследованиях по замеру колебаний прежде всего необходимо получить запись, удовлетворяющую следующим условиям: частота колебаний в записи должна быть такой же, как и частота колебания объекта; соотношения между амплитудами записи и исследуемых колебаний должны быть одинаковыми; возникающие в записи сдвиги фаз должны быть равны нулю или пропорциональны частоте данной составляющей.

Первое условие должно выполняться при записи смещения и удовлетворяться при линейной амплитудной характеристике приборов. Амплитудная характеристика сейсмического прибора представляет собой зависимость чувствительности прибора от амплитуды смещения на заданной частоте вынужденных колебаний.

Второе условие относится к записи смещений, скоростей и ускорений колебаний и выполняется при линейной частотной характеристике, параллельной оси частот (частотной характеристикой называется зависимость чувствительности прибора от частоты колебаний).

Третье условие необходимо для определения временных соотношений между записью и колебанием объекта. Полное отсутствие фазовых искажений может быть достигнуто, когда отсутствуют силы сопротивления (демпфирование). Однако демпфирование во многих случаях необходимо (особенно при измерениях с целью определения одних только амплитуд смещения, ускорения, скорости), так как оно уменьшает продолжительность собственных колебаний прибора и сглаживает резонансный пик частотной характеристики. Демпфирование применяется почти исключительно путем введения сил сопротивления, пропорциональных первой степени относительной скорости инерционного элемента.

Таким образом, основным показателем измерительного прибора инерционного типа являются амплитудно-частотная и фазо-частотная характеристики упругой системы. Для измерения амплитуды смещения амплитудно-частотная характеристика системы инерционного типа выражается следующим образом:

$$U_0 = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{r^2}{\omega_1^2}\right)^2 + \frac{r_1^2}{\omega_1^2} D_1^2}}, \quad (\text{VIII.13})$$

где  $U_0$  — амплитудно-частотная характеристика, или коэффициент увеличения, показывающий, во сколько раз амплитуда вынужденных колебаний превышает статическое смещение;

$f_1$  — частота вынужденных колебаний объекта;  $\omega_1$  — собственная частота колебаний упругой системы;  $D_1$  — затухание системы.

Амплитудно-частотная характеристика (рис. 74) при измерении скорости смещения записывается в несколько ином виде:

$$U' = \frac{\frac{f}{\omega_1}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{\omega_1^2}\right)^2 + \frac{f_k^2}{\omega_1^2} D_1^2}} \quad (\text{VIII.14})$$

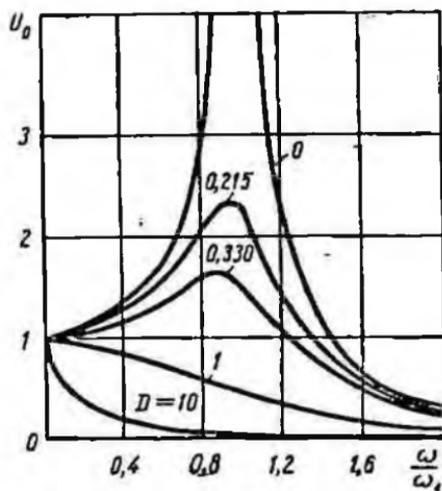


Рис. 74. Амплитудно-частотная характеристика сейсмодатчика при различных затуханиях.

Коэффициент усиления прибора при регистрации ускорения имеет следующий вид:

$$U'' = \frac{\frac{f^2}{\omega_1^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{\omega_1^2}\right)^2 + \frac{f_k^2}{\omega_1^2} D_1^2}} \quad (\text{VIII.15})$$

Фазо-частотная характеристика во всех трех случаях одинакова и выражается следующим уравнением:

$$\operatorname{tg} \gamma_1 = \frac{2 \frac{f_1}{\omega_0} D_1}{1 - \frac{f_1^2}{\omega_1^2}} \quad (\text{VIII.16})$$

Из рис. 74 видно, что амплитудно-частотная характеристика представляет собой серию резонансных кривых.

Согласно второму условию записи колебаний без искажений необходимо, чтобы амплитудно-частотная характеристика была равна единице. Это условие при регистрации смещений и скоростей сейсмодатчиками выполняется в том случае, когда собственная частота колебаний упругой системы датчика значительно больше частоты колебаний объекта ( $f_1 \gg \omega_0$ ), а при регистрации ускорений, наоборот, когда частота собственных колебаний датчика значительно превышает колебания объекта.

Как было отмечено выше, при гальванометрической регистрации колебаний при промышленных взрывах измерительная система (регистрирующий канал) состоит из сейсмоприемника и гальванометра. Гальванометр так же, как и сейсмоприемник имеет свои амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики.

Амплитудно-частотная характеристика гальванометра

$$U_2 = \frac{2D_2 \frac{f}{\omega^2}}{\sqrt{\left(1 - \frac{f^2}{\omega_2^2}\right)^2 + \frac{f^2}{\omega_2^2} D_2^2}}, \quad (\text{VIII.17})$$

фазо-частотная характеристика гальванометра

$$\text{tg } \gamma_2 = \frac{\frac{f^2}{\omega_2^2} - 1}{2 \frac{f}{\omega_2} D_2}. \quad (\text{VIII.18})$$

В связи с этим амплитудно-частотная характеристика регистрирующего канала состоит из двух сомножителей, один из которых представляет собой амплитудно-частотную характеристику сейсмоприемника, а второй — амплитудно-частотную характеристику гальванометра, т. е.

$$\bar{U} = U_1 U_2. \quad (\text{VIII.19})$$

При определении амплитудно-частотной характеристики регистрирующего канала необходимо учитывать также влияние коэффициента связи  $\sigma^2$ . Тогда выражение для частотной характеристики регистрирующего канала примет вид

$$\bar{U} = U_1 U_2 W. \quad (\text{VIII.20})$$

Здесь

$$W = \frac{1}{\sqrt{1 + \eta^2 - 2\eta \sin(\gamma_1 + \gamma_2)}}. \quad (\text{VIII.21})$$

где

$$\eta = \sigma^2 \sin \gamma_1 \cos \gamma_2. \quad (\text{VIII.22})$$

Величиной связи можно пренебречь в том случае, когда  $\sigma^2 < 0,1$ . Если  $\sigma^2 > 0,1$ , влияние связи следует обязательно учитывать.

Фазо-частотная характеристика канала  $\gamma_0$  определяется выражением

$$\text{tg } \bar{\gamma}_0 = \text{tg}(\gamma_1 - \gamma_2). \quad (\text{VIII.23})$$

При учете связи она имеет иной вид:

$$\text{tg } \bar{\gamma}_1 = (1 + \delta) \text{tg } \bar{\gamma}_0. \quad (\text{VIII.23}')$$

где

$$\delta = -\sigma^2 \frac{\text{tg } \gamma_1}{\text{tg } \gamma_1 + \text{tg } \gamma_2}. \quad (\text{VIII.24})$$

Частотная и фазовая характеристики канала являются основными функциями, оценивающими амплитудные и временные погрешности, вносимые прибором в запись исследуемого колебательного процесса.

Для сейсмоприемников с гальванометрической регистрацией увеличение канала представляется в виде произведения двух безразмерных величин

$$\alpha = \bar{V}_0 \bar{U}, \quad (\text{VIII.25})$$

где  $\bar{V}_0$  — масштабный коэффициент увеличения;  $\bar{U}$  учитывает изменение масштаба увеличения при различных частотах.

Для сейсмических приборов электродинамического типа масштабный коэффициент

$$\bar{V}_0 = \frac{2A}{l} \sqrt{\sigma^2 \frac{e_1}{e_2} \cdot \frac{K_1}{K_2}}, \quad (\text{VIII.26})$$

где  $A$  — длина оптического рычага;  $l$  — приведенная длина маятника.

Из выражения (VIII.26) видно, что увеличение канала тем больше, чем больше значение  $\sigma^2$  и чем больше отношение моментов инерции  $K_1 : K_2$ . При малых значениях  $\sigma^2$  для получения большого увеличения необходимо условие  $K_1 \gg K_2$ . Увеличение сейсмического канала зависит также от длины оптического рычага и длины маятника: чем больше оптический рычаг и чем меньше приведенная длина маятника, тем больше  $\bar{V}_0$ . Главную роль в повышении увеличения отводят обычно отношению моментов инерции.

## 2. Условия регистрации кинематических параметров колебаний

С помощью сейсмических приборов с гальванометрической регистрацией можно регистрировать движения исследуемых объектов, начиная от третьей производной смещений и кончая интегралом смещений по времени. Правильность записи зависит от подбора приборов с необходимыми для записи того или иного кинематического параметра значений постоянных, которые устанавливаются из анализа амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик.

Для получения неискаженной записи смещений объекта необходимо выполнение следующих условий: амплитудно-частотная характеристика сейсмического прибора должна быть равна единице ( $U_1 \approx 1$ ), а фазо-частотная характеристика его должна быть равной нулю ( $\gamma_1 = 0$ ); фазо-частотная характеристика гальванометра должна быть значительно меньше единицы ( $\gamma_2 \ll 1$ ); величина коэффициента, характеризующего связь, должна быть значительно меньше единицы ( $\sigma \ll 1$ ).

Эти условия в свою очередь выполняются в том случае, если собственная частота колебания сейсмического прибора значительно меньше (в 3—4 раза) нижней границы рассматриваемого интервала вынужденных колебаний исследуемого объекта, а затухание  $D_1$  меньше единицы. Желательно, чтобы  $0,3 < D_1 < 0,5$ .

Условие, когда фазо-частотная характеристика гальванометра  $\gamma_2 \ll 1$ , выполняется при собственной частоте гальванометра

$\omega_2 \approx \sqrt{f_1 f_2}$  ( $f_1$  и  $f_2$  — соответственно нижний и верхний пределы частоты) и при  $D_2 \gg 1$ . При этом выполняется и третье условие, т. е.  $\sigma \ll 1$ , так как наименьшая частота  $f$  значительно больше частоты собственных колебаний сейсмического прибора, на которую оказывает влияние связь.

Запись скорости смещений можно получить тремя путями:

1. Если смещение маятника должно воспроизводить перемещение объекта, то гальванометр будет записывать скорость смещения маятника. Для этого необходимо, чтобы амплитудно-частотная характеристика сейсмического прибора была равна единице, а фазо-частотная была равна нулю; чтобы фазо-частотная характеристика гальванометра приблизительно была равна  $\frac{\pi}{2}$ .

Для выполнения этих условий необходимо, чтобы частота собственных колебаний сейсмического прибора была значительно меньше частоты колебания исследуемого объекта, а затухание  $D_1$  было меньше единицы ( $0,3 < D_1 < 0,5$ ); у гальванометра собственная частота колебаний должна значительно превышать частоту колебаний объекта, а затухание, в свою очередь, должно быть равно единице или иметь значение, близкое к единице ( $D_2 = 0,7 \div 1$ ).

2. Если поменять местами значения параметров сейсмического прибора и гальванометра, указанных в пункте 1, то в этом случае будет также регистрироваться скорость смещения.

3. Запись скорости смещений можно осуществлять при условии, если перемещение маятника будет соответствовать скорости смещения, а гальванометр будет записывать перемещения маятника. Это возможно в том случае, когда собственная частота сейсмического прибора примерно равна частоте колебания объекта, а затухание прибора равно или больше единицы.

У гальванометра собственная частота должна быть значительно больше частоты вынужденных колебаний, а затухание — несколько меньше единицы или равно ей ( $D_2=0,8 \div 1$ ).

Запись ускорений осуществляется при следующих условиях: амплитудно-частотная характеристика прибора равна отношению квадратов частот колебания объекта к собственной частоте

$$\left( U_1 \approx \frac{f_1^2}{\omega_1^2} \right),$$
 фазовая характеристика прибора равна  $\pi$ ; фазовая

характеристика гальванометра равна нулю. Эти условия соблюдаются в том случае, если собственные колебания сейсмического прибора значительно больше (минимум в 3—4 раза) частоты вынужденных колебаний, а затухание близко к единице. Гальвано-

метр в этом случае используется при  $D_2 \gg 1$  и  $\omega_2 \approx \sqrt{f_1 f_2}$ .

Условия записи интеграла смещения следующие: собственная частота сейсмического датчика должна быть значительно меньше вынужденных колебаний, затухание должно быть меньше единицы; собственная частота гальванометра должна быть также значительно меньше вынужденных колебаний, а затухание меньше единицы.

Третью производную смещения на записи можно получить при условии, когда собственная частота сейсмического прибора и гальванометра значительно больше вынужденных колебаний объекта, а затухание обеих систем меньше единицы или равно ей. Подбор регистрирующего канала согласно требуемым условиям, строго соответствующим каждому кинематическому параметру, позволяет правильно, без особых искажений записывать необходимый параметр.

### 3. Сейсмические приборы для гальванометрической регистрации колебаний при взрывах

В последние годы в нашей стране разработан ряд сейсмических приборов, нашедших применение при исследовании взрывов. Здесь описываются конструкции таких приборов.

Сейсмоприемник ВБП-3 (виброграф больших перемещений). Сейсмоприемник ВБП-3 предназначен для записи пе-

ремещений объекта во времени по вертикальной или горизонтальной составляющей с амплитудами колебаний 1—300 мм при интервале частот 1—100 гц, что соответствует минимальному ускорению 50 g. Этот прибор разработан в Институте физики Земли им. О. Ю. Шмидта [6, 8]. Средние параметры прибора следующие. Период собственных колебаний маятника  $T_1=1,6$  сек; постоянная затухания  $D_1=0,7 \div 1,0$ ; приведенная длина маятника  $l_0=65$  см; сопротивление индукционной катушки преобразователя  $R_c=55$  ом; масса маятника  $m=110$  г; момент инерции маятника вокруг оси вращения  $K_1=2300$  гсм<sup>2</sup>; расстояние от центра тяжести до оси вращения  $r_0=3,5$  мм; чувствительность  $S_c=$

$$= 1 \frac{\text{мм} \cdot \text{сек}}{\text{см}}.$$

При работе с этим прибором особое внимание необходимо уделять состоянию шариковых подшипников, которые поддерживают полуоси маятника. Наличие трения в подшипниках является вредным, так как оно повышает порог чувствительности прибора и влияет на его частотную характеристику.

Для проверки качества подшипников у прибора снимается маятник вместе с подшипниками. Затем посаженному на полуоси подшипнику вместе с обоймой сообщается быстрое вращательное движение. У подшипников хорошего качества вращение продолжается 30—60 сек. Кроме этого производится проверка маятника на свободные качания. Для этого маятник на подшипниках в обоймах устанавливают на перевернутых накладках на две горизонтальные плоскости и отклоняют его на 90° от положения равновесия. Далее подсчитывают число полных колебаний до полной остановки. У подшипников удовлетворительного качества число качаний не менее 70—80. Если подшипники не удовлетворяют этим требованиям, то их следует хорошо промыть. Для промывки используется последовательно авиационный бензин и спирт-ректификат. После этого рекомендуется сделать легкую смазку подшипников.

Для получения записи отклонений, пропорциональных перемещению объекта, регистрация может осуществляться с использованием гальванометров с частотой 3—10 гц в переускоенном режиме при  $D_2 > 10$ . Запись скорости смещений объекта производится при использовании гальванометров с частотой собственных колебаний более 100 гц при  $D_2 \approx 1$ .

Сейсмоприемник ВИБ-У. Сейсмоприемник ВИБ-У разработан в Институте химической физики АН СССР [4]. Рассчитан на регистрацию значительных массовых скоростей смещения. Это прибор также маятникового типа с магнитоэлектрическим преобразователем. С его помощью можно регистрировать колебания, имеющие предельное значение амплитуды смещения до 8—10 см. Прибор допускает установку в вертикальном, горизонтальном и любом наклонном положении. Принцип действия

его состоит в том, что при колебаниях происходит взаимное перемещение постоянного магнита и индукционной катушки. Эд.с., наводимая в катушке, пропорциональна скорости смещения основания прибора.

Прибор ВИБ-У имеет свободный ход качания маятника  $\pm 10$  мм. Для регистрации больших перемещений приведенная длина маятника может быть увеличена в 3; 5; 10 раз, что позволяет производить измерение скорости колебаний при смещении основания прибора соответственно на  $\pm 30$ ;  $\pm 50$ ;  $\pm 100$  мм. Изменение приведенной длины маятника достигается в результате установки съемных грузов-противовесов. Для каждого прибора имеется три груза-противовеса (груз I, груз II и груз III). Без груза-противовеса приведенная длина маятника около 100 мм; с установкой грузов I, II и III приведенная длина маятника соответственно равна 300—400 мм, 350—800 мм и 800—1200 мм.

Магнитная система сейсмоприемника состоит из постоянного магнита, выполненного из сплава магнито и башмаков из арможелеза. Между полюсами имеется воздушный зазор 3 мм, в котором перемещается плоская фигурная индукционная катушка. Рабочий орган прибора помещен в герметичный корпус.

При установке маятника в нужное положение, которое достигается натяжением рабочей пружины на тубусе, особое внимание необходимо уделять возможному появлению люфта в упорных подшипниках оси вращения маятника. Величина остаточного люфта должна быть минимальной. Проверка нормального положения маятника производится свободным его качанием. При нормальном положении должно быть не менее 100 свободных качаний. Регулировка люфта в подшипниках производится затяжкой шайбы на тубусе или винтов на подшипниках.

Данный прибор не имеет дополнительного затухания, поэтому в спектре регистрируемых колебаний не должно быть составляющих, близких к периоду собственных колебаний. Сопротивление индукционной катушки у сейсмоприемника ВИБ-У 4,5—5 ом. Средняя чувствительность его к скорости перемещений около

$7-8 \frac{\text{мв} \cdot \text{сек}}{\text{см}}$ , а минимально допустимая для работы — не менее

$5 \frac{\text{мв} \cdot \text{сек}}{\text{см}}$ .

Сейсмоприемник ВЭГИК. Этот сейсмоприемник разработан в Институте физики Земли. Прибор предназначен для регистрации колебаний с амплитудой до 2 мм в интервалах частот 1—100 *гц*. По принципу действия данный прибор относится к типу электродинамических. Основной его частью, как и любого другого сейсмодатчика, является маятник, состоящий из индукционной катушки, которая перемещается в поле постоянного магнита, и цилиндрической массы. Все это закреплено на рам-

ке и подвешено на двух парах плоских пластин, расположенных крестообразно, к стойкам.

Индукционная часть прибора представляет собой кольцевой цилиндрический каркас из оргстекла, на который намотаны две катушки. Одна катушка является рабочей, другая обеспечивает дополнительное электромагнитное затухание. С помощью этого прибора можно регистрировать как вертикальные, так и горизонтальные колебания. Когда регистрируются вертикальные колебания, маятник устанавливается в рабочее положение натяжением цилиндрической пружины, которая компенсирует момент силы тяжести маятника.

При регистрации горизонтальных колебаний цилиндрическая пружина снимается. Прибор поворачивается на  $90^\circ$  и ставится на установочные винты, с помощью которых путем изменения наклона оси вращения регулируется положение маятника и период его собственных колебаний.

При подготовке прибора к работе особое внимание необходимо обращать на состояние пластин, образующих ось вращения маятника, и на положение цилиндрической индукционной катушки в зазоре магнита.

В исправном приборе пластины образуют крест и не должны быть погнутыми или поломанными.

Индукционная катушка в зазоре магнита должна ходить свободно без трения и соприкосновения со стенками магнита. Если обе индукционные катушки (рабочая и затухания) разомкнуть, то после толчка исправный маятник должен совершить не менее 40—50 свободных качаний, постепенно убывающих по амплитуде. Внезапная остановка при малых амплитудах свидетельствует о наличии трения.

При обнаружении неисправных пластин их необходимо заменить, а ход катушки в зазоре отрегулировать легким перемещением маятника при ослабленных винтах, крепящих пластины. Кроме этого, трение в зазоре можно устранить путем перемещения магнита, предварительно ослабив его крепление.

Сейсмоприемник ВЭГИК имеет следующие параметры: период собственных колебаний маятника  $T_1 = 1,0 \div 1,2$  сек; постоянная затухания  $D_1 = 0,5 \div 0,7$ ; приведенная длина маятника  $l_0 = 10$  см; сопротивление рабочей катушки  $R_c = 50 \div 55$  ом; сопротивление катушки затухания  $R_n = 27$  ом; масса маятника  $m = 1000$  г; момент инерции маятника относительно оси вращения  $K_1 = 10^5$  г·см<sup>2</sup>; чувствительность рабочей катушки  $S_c = 210 \div 220 \frac{\text{мв} \cdot \text{сек}}{\text{см}}$ ; чувствительность катушки затухания  $S_n = 165 \div 175 \frac{\text{мв} \cdot \text{сек}}{\text{см}}$ . Благодаря устойчивой и надежной работе прибор получил очень широкое применение.

Сейсмоприемник ВИБ-А. С помощью этого прибора можно регистрировать колебания, перпендикулярные к основанию прибора и имеющие амплитуду перемещения до  $\pm 10$  мм в диапазоне частот 5—200 гц. Прибор дает возможность записывать колебания в горизонтальном, вертикальном и любом другом положении. Принцип работы сейсмоприемника ВИБ-А точно такой же, как у предыдущих, а устройство его такое же, как у прибора ВИБ-У (рис. 75). Разница заключается в разрешающей способности, а следовательно, в некоторых количественных показателях параметров прибора. Диапазон регистрируемых ско-

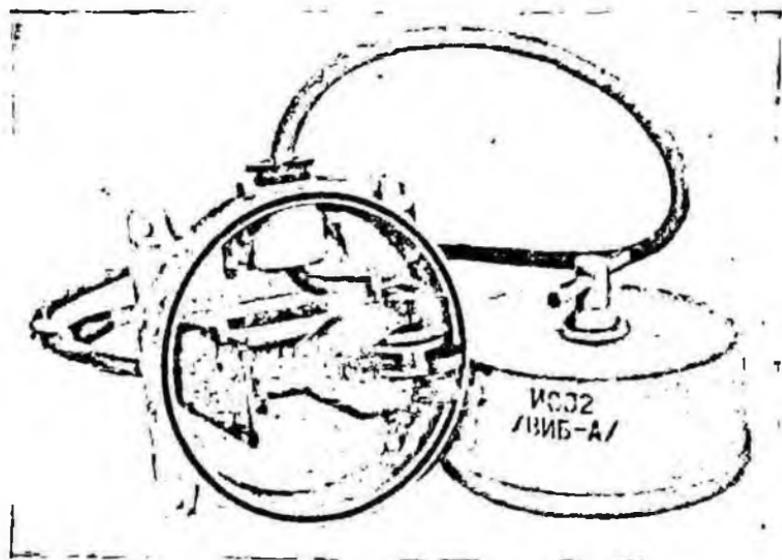


Рис. 75. Сейсмоприемник ВИБ-А.

ростей смещения 0,1—10 м/сек. Параметры прибора следующие: период собственных колебаний при регистрации вертикальных колебаний  $T_1=0,6$  гц, при горизонтальных колебаниях  $T_1=0,4$  гц; приведенная длина маятника  $l_0=7 \div 10$  см; сопротивление индукционной катушки  $R_c=4,5 \div 5$  ом; момент инерции маятника  $K_1=1100 \div 1200$  г·см. Чувствительность катушки  $S_c=8 \div 10 \frac{\text{мв} \cdot \text{сек}}{\text{см}}$ .

Этот прибор, как и прибор ВИБ-У, не имеет специального гасителя собственных колебаний маятника. Разработан он в Институте химической физики АН УССР.

Вибродатчик ИОО1. В последние годы выпускается комплект приборов для замера колебаний КОО1, в состав которого входят вибродатчики ИОО1. Эти вибродатчики предназначены для гальванометрической регистрации колебаний в преде-

лах 2—200 гц при максимальной амплитуде  $\pm 1$  мм и максимально допустимом ускорении колебаний  $7g$ . С помощью датчика ИОО1 можно производить замеры колебаний в вертикальном и горизонтальном направлениях.

Конструкция датчика представлена на рис. 76. На стойках основания с помощью крестообразных пластин 13 подвешивается маятник 1. На свободном конце маятника установлены две цилиндрические катушки 6, каждая из которых находится в своей

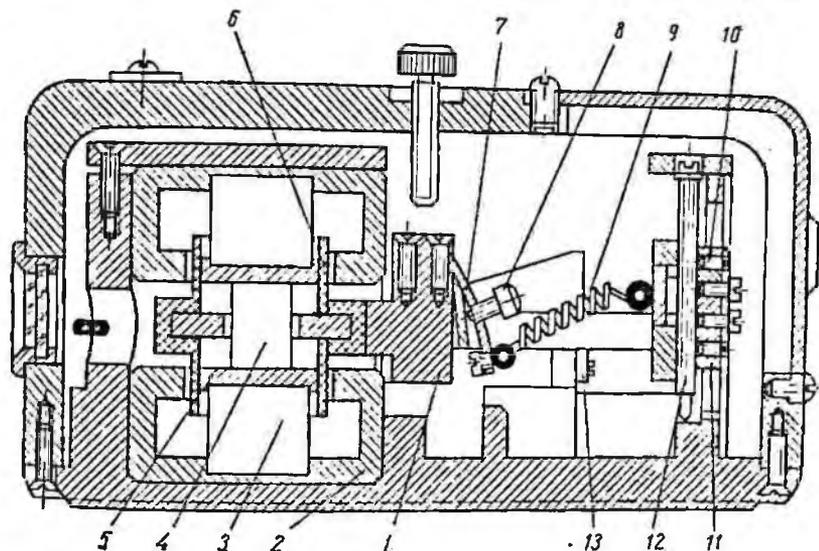


Рис. 76. Схема вибродатчика типа ИОО1.

магнитной системе, состоящей из магнитопровода 2, постоянного магнита 3 с полюсным наконечником 5. Вся магнитная система помещена в специальный цилиндр в корпусе датчика. Между магнитами помещен латунный цилиндр 4.

Для удержания маятника в положении равновесия имеется цилиндрическая пружина 9, которая одним концом крепится к регулировочному устройству в виде стойки с винтами, а другим к пластинке 7, установленной на маятнике. В горизонтальных датчиках эта пластинка изготовлена из латуни, а в вертикальных — из биметалла.

Биметаллическая пластинка, дополнительно натягивая или ослабляя пружины при изменении температуры, выполняет роль температурного компенсатора. Благодаря этому маятник не выходит из положения равновесия. Регулировка температурной компенсации осуществляется поворотом винта 8, входящего в биметаллическую пластинку и упирающегося в бронзовую пла-

стинку. Обычно температурная компенсация регулируется при больших перепадах температуры. Регулировка производится с установкой датчика в термошкаф с перепадом температуры и подбором такого положения регулировочного винта, при котором нет отклонения маятника.

Регулировочное устройство датчика состоит из ползунка 11, регулировочных вертикального 12 и горизонтального 10 винтов. Так как с ползунком связана цилиндрическая пружина, то, изменяя положение его с помощью винтов, можно менять положение маятника и регулировать его собственную частоту.

Маятник находится в равновесии, если центральная риска на нем совпадает с указателем на смотровом окошечке. При транспортировке маятник закрепляется специальным винтом в крышке корпуса.

Период собственных колебаний вибродатчика  $T_1=1$  сек и может изменяться в пределах 0,5—1 сек. Затухание  $D_1$  практически постоянно и равно 0,5. Сопротивление индукционной катушки  $R_1=35$  ом. Для этих вибродатчиков в комплекте прилагается ступенчатый регулятор увеличения. При использовании регулятора можно получить коэффициент усиления, равный 500, 200, 50 и 30, с использованном гальванометра МОО2.

**Виброграф ВДЦ.** Вибрографы типа ВДЦ предназначены для замера горизонтальных и вертикальных колебаний и вибраций с амплитудой смещения до 1 мм в диапазоне частот 1—200 гц. Эти вибрографы созданы на базе сейсмических приборов ВЕГИК [12], но их размеры значительно меньше, особенно у вибрографа ВДЦ-3.

Вибродатчик имеет две катушки: рабочую, расположенную на маятнике, и компенсационную, расположенную на сердечнике магнита коаксиально с рабочей. Принцип устройства и конструктивные особенности этого датчика примерно такие же, как и у описанного выше вибродатчика типа ИОО1, созданного на базе разработанного позднее малогабаритного вибродатчика ВДЦ-3.

Некоторые геофизические сейсмоприемники. Для исследования воздействия взрывов успешно применяются некоторые типы сейсмических геофизических приборов. К ним относятся приборы СПМ-16, СПЭД-56М, СПЭД-62, имеющие небольшие размеры и малый вес (если вес сейсмоприемников ВБП-3, ВЭГИК, ВПБ достигает 10 кг, то вес датчиков не превышает 1 кг). Указанные приборы разработаны для проведения сейсмической разведки методом отраженных и преломленных волн.

Принцип действия приборов этого типа такой же, как и других электродинамических сейсмоприемников. Инертная масса катушки прикрепляется к корпусу прибора с помощью двух фасонных плоских пружин. Корпус является магнитопроводом приемника. На рис. 77 приведена схема сейсмоприемника СПЭД-62. С помощью указанных сейсмоприемников можно регистрировать

вертикальные и горизонтальные колебания, а также ускорения и скорости смещения. Техническая характеристика сейсмоприемника СПЭД-62 следующая: собственная частота  $\omega_0 = 31$  гц; сопротивление индукционной катушки  $R_1 = 500$  ом.

Параметры сейсмоприемника СПМ-16 немного отличаются от параметров сейсмоприемника СПЭД-62: собственная частота  $\omega_0 = 28 \div 32$  гц; сопротивление индукционной катушки  $R_1 = 400$  ом.

Специальной настройки или подготовки исправные сейсмоприемники не требуют. К неисправностям этих приборов при наличии электрической цепи следует отнести застывание катушки прибора в зазоре из-за попадания металлической пыли, оставшейся на магните, или неисправных пружин.

Кроме описанных выше сейсмических приборов иногда используются приборы, предназначенные для замера очень малых колебаний и отличающихся большой чувствительностью. К их числу следует отнести такие, как СВК-М, СГК-М, УСФ и др. Эти приборы обычно предназначены для оборудования сейсмических станций при наблюдениях за удаленными землетрясениями и взрывами. При исследованиях сейсмического воздействия взрывов в промышленных условиях, в условиях шахты или карьера, они имеют очень ограниченное применение.

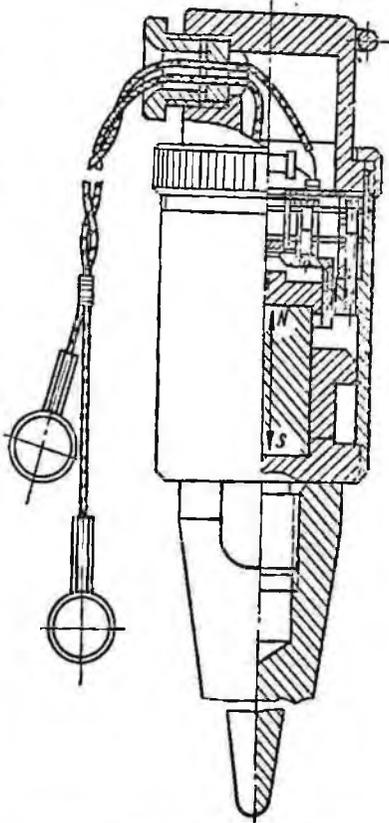


Рис. 77. Схема сейсмоприемника СПЭД-62.

#### 4. Записывающая аппаратура и вспомогательные приборы

В качестве записывающей аппаратуры при исследованиях сейсмического воздействия взрывов с использованием инерционных датчиков применяют световые осциллографы магнитоэлектрического типа.

В настоящее время в нашей стране выпускается большое количество светолучевых магнитоэлектрических осциллографов. Приведем описание лишь тех типов осциллографов, которые

удобны для применения в сложных полевых условиях и используются для исследования воздействия взрывов в горном деле.

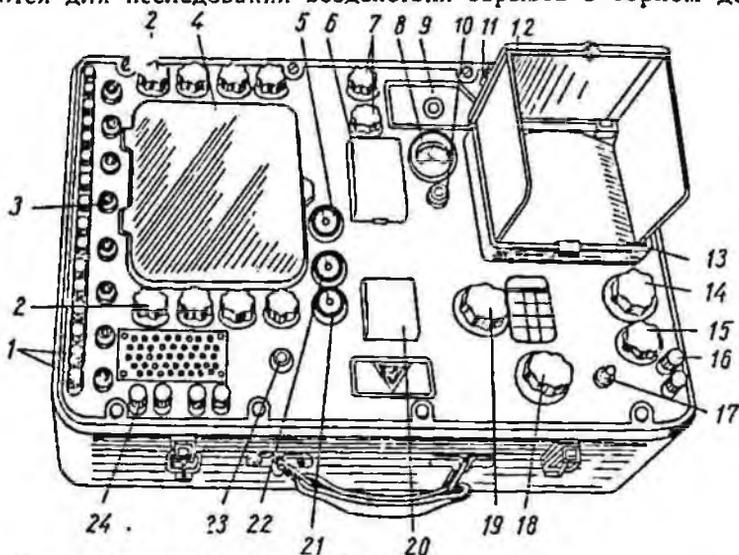


Рис. 78. Осциллограф Н-102 (МПО-2).

1 — клеммы для подвода сигналов к вибраторам; 2 — рукоятки, регулирующие положение вибратора; 3 — выключатели вибраторов; 4 — крышка, закрывающая гнезда вибраторов; 5 — указатель запаса пленки; 6 — приемная кассета; 7 — рукоятки для регулирования ширины щелей диафрагмы; 8 — вольтметр для контроля накала осветительной лампы; 9 — крышка, закрывающая лампу осветителя; 10 — выключатель пуска и остановки электродвигателя; 11 — клеммы, связанные с контактами, управляющими исследуемым процессом; 12 — крышка со створками, закрывающая экран; 13 — экран для визуального наблюдения; 14 — рукоятка регулятора скорости вращения зеркального барабана; 15 — рукоятка реостата накала лампы осветителя; 16 — клеммы для дистанционного пуска осциллографа; 17 — кнопка пуска пленки; 18 и 19 — рукоятки для переключения скоростей; 20 — падающая кассета; 21 — регулятор длины кадра; 22 — выключатель отметчика времени; 23 — указатель установки контактов, управляющих исследуемым процессом; 24 — клеммы для включения токовой цепи вибраторов мощности.

Сравнительно большое применение получил переносный осциллограф МПО-2, в последние годы несколько модернизированный и выпускаемый под маркой Н-102 (рис. 78). Данный осциллограф относится к типу универсальных. Все его узлы сконструированы на одной общей плате, помещенной в металлический кожух в виде чемодана.

Запись процессов производится на черно-белую или цветную фотопленку шириной 35 мм, при этом активная ширина фотоленты равна 26 мм. Осциллограф рассчитан на выполнение записи при двенадцати скоростях движения фотопленки (0,1—500 см/сек). Скорость переключается ступенчато. Зарядная и приемная кассеты вмещают до 10 м пленки. Длина осциллограмм регулируется специальным устройством и изменяется в пределах 0,1—500 см. Длина оптического рычага равна 2500 мм.

В осциллографе Н-102 (МПО-2) устанавливается восемь левых гальванометров типа Н-135 (МОВ-2). На место одного из гальванометров при необходимости устанавливается отметчик времени с частотой 500 *гц*. На место двух обычных гальванометров могут устанавливаться два гальванометра для измерения мощности.

Таблица 12

Характеристика гальванометров осциллографа Н-102 (МПО-2)

Тип гальванометра	Рабочий диапазон частот, <i>гц</i>	Постоянная по току, <i>м/мм</i>	Внутреннее сопротивление, <i>ом</i>	Допустимая величина тока, <i>ма</i>	Успокоение
МОВ-2-Х	0—100	$1 \cdot 10^{-6}$	55	0,25	—
МОВ-2-1Х	0—200	$4 \cdot 10^{-6}$	55	1,0	—
Н-135-0,6	0—600	$1,9 \cdot 10^{-5}$	9	2,0	Жидкостное
Н-135-0,9	0—900	$5,0 \cdot 10^{-5}$	9	5,0	»
Н-135-1,5	0—1500	$1,7 \cdot 10^{-4}$	9	16	»
Н-135-2	0—2000	$5 \cdot 10^{-4}$	4	50	»
Н-135-3	0—3000	$1,0 \cdot 10^{-3}$	4	1000	»
Н-135-6	0—6000	$6,25 \cdot 10^{-3}$	2	250	»

В табл. 12 приведена техническая характеристика указанных гальванометров. Для получения стандартных отметок времени в комплекте с осциллографом Н-102 (МПО-2) поставляется электронный отметчик времени типа П104. Отметчик позволяет записывать отметки времени в виде синусоиды, интервал между вершинами которой соответствует времени 1; 0,1; 0,01 и 0,001 *сек* соответственно при положении переключателя частоты на отметчик 1; 10; 100 и 1000 *гц*. Кроме этого, в комплект с этим осциллографом входит магазин шунтов Р1 и увеличитель П10.

В связи с тем, что гальванометры осциллографов в некоторых случаях необходимо шунтировать, так как они не рассчитаны на пропускание больших токов и напряжений, предусматривается переносный магазин сопротивлений. Увеличитель П10 предназначен для пятикратного увеличения осциллограмм с фотопленки шириной 35 *мм* и перезаписи ее на фотобумагу шириной 120 *мм*.

Большое применение нашел осциллограф Н-700 (ПОБ-14М). В настоящее время благодаря сравнительно небольшому весу и простоте устройства он является наиболее распространенным универсальным светолучевым осциллографом. Отличительной чертой этого осциллографа является компактность гальванометров, установленных в одном общем магните, который занимает немного места. Предусмотренные амортизационные устройства предохраняют блок гальванометров от внешних механических воздействий в виде ударов, вибрации и т. д.

Питание осциллографа электрическое. Имеются три кассеты, предназначенные для записи на различных скоростях: одна — позволяет производить запись на фотобумагу с малыми скоростями — 0,25—4 см/сек, вторая — со скоростями 16—250 см/сек, а третья позволяет записывать кратковременные быстропротекающие процессы со скоростью протяжки 50—800 см/сек. Последняя кассета имеет специальный фотозатвор.

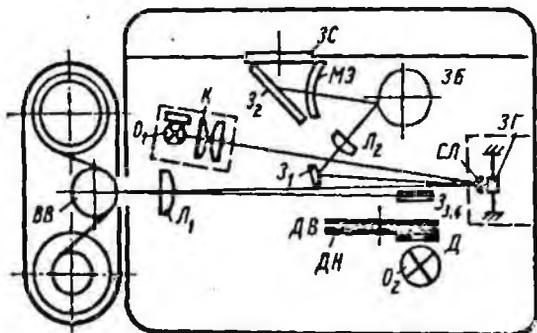


Рис. 79. Оптическая схема осциллографа Н-700:

$O_1$  — осветитель гальванометра;  $K$  — конденсатор цилиндрический;  $C_1$  — сферическая линза;  $ЗГ$  — зеркало гальванометра;  $L_1, L_2$  — линзы цилиндрические;  $ВВ$  — вращающийся вал;  $З_1, З_2, З_3, З_4$  — зеркала;  $ЗБ$  — зеркальный барбин;  $МЭ$  — матовый экран;  $ЗС$  — защитное стекло;  $O_2$  — осветитель отметчика;  $Д$  — диафрагма шелевая;  $ДН$  — диск нижний со шелями;  $ДВ$  — диск верхний со шелями.

Осциллограф Н-700 имеет специальную электрофотографическую приставку А-002 для получения видимой записи. Эта приставка устанавливается на место обычной кассеты. Через смотровое окно приставки видна запись осциллограммы, которая ведется на фотополупроводниковой бумажной ленте типа ЭФО-2 шириной 120 мм и длиной 20 м. Скорость движения бумаги 3,12 и 48 мм/сек. Зарядка может осуществляться на свету, так как бумага этого типа не чувствительна к свету. Проявление производится автоматически внутри приставки с помощью специального быстропроявляющегося проявителя Б-1. Оптическая схема осциллографа показана на рис. 79. В осциллографе имеется отметчик дискового типа, который приводится в движение индивидуальным электродвигателем, стабилизированным по скорости. Отметки времени в виде поперечных полос на фотоленте наносятся с частотой 10 и 200 гц, что соответствует 0,1 и 0,005 сек.

В осциллографе четырнадцать каналов. Длина светового указателя равна 300 мм. В осветителе гальванометров устанавливается лампочка СИ-78 (7в, 0,5 а). Для визуального наблюдения за процессом записи имеется матовый экран с развертывающим устройством.

В комплект осциллографа Н-700 кроме упомянутых выше устройств входят также пульт дистанционного управления ПУ-001 и магазин шунтов и добавочных сопротивлений типа Р-155 для регулировки чувствительности гальванометров. Прибор выпускается серийно. Для этого осциллографа используются гальванометры М-001, ГБ-IV или ГБ-III. При использовании гальванометров первых двух типов имеется 14 записывающих каналов, а при использовании ГБ-III—7. Гальванометры данных типов имеют одинаковые устройства и отличаются главным образом частотой собственных колебаний и чувствительностью, а гальванометр ГБ-III отличается от гальванометров ГБ-IV и М-001 еще и размерами. Указанные гальванометры относятся к типу рамочных.

Гальванометры типа ГБ-IV в обычном исполнении изготавлиются с собственными частотами 20—10 000 гц. Гальванометры с частотой больше 500 гц заливаются демпфирующим кремнийорганическим маслом.

Технические характеристики гальванометров типа ГБ-III, ГБ-IV и М-001 приведены соответственно в табл. 13, 14 и 15.

Таблица 13

Характеристика гальванометров типа ГБ-III

Марка гальванометра	Собственная частота, гц	Рабочая полоса частот, гц	Постоянная по току, м/мм	Сопротивление, ом		Максимальный ток, ма	Момент инерции, г·см <sup>2</sup>
				внутреннее	внешнее		
ГБ-III-Б-0,8	0,8	0—0,4	$2,5 \cdot 10^{-9}$	52	5000	0,001	$1,2 \cdot 10^{-2}$
	0,8	0—0,4	$5 \cdot 10^{-9}$	52	800	0,002	$1,2 \cdot 10^{-2}$
ГБ-III-Б-1	1,25	0—0,6	$4 \cdot 10^{-9}$	64	6000	0,001	$1,15 \cdot 10^{-2}$
	1,25	0—0,6	$1 \cdot 10^{-8}$	64	950	0,03	$1,15 \cdot 10^{-2}$
ГБ-III-Б-2,5	2,5	0—1,25	$1,5 \cdot 10^{-8}$	60	3000	0,005	$1,15 \cdot 10^{-2}$
	2,5	0—1,25	$4 \cdot 10^{-8}$	60	420	0,010	$1,15 \cdot 10^{-2}$
ГБ-III-Б-2,5	2,5	0—1,25	$7 \cdot 10^{-9}$	76	2300	0,003	$0,2 \cdot 10^{-2}$
	2,5	0—1,25	$1,4 \cdot 10^{-8}$	76	350	0,005	$0,2 \cdot 10^{-2}$
ГБ-III-Б-5	5,0	0—2,5	$6 \cdot 10^{-8}$	58	1500	0,022	$1,15 \cdot 10^{-2}$
	5,0	0—2,5	$1,3 \cdot 10^{-7}$	58	220	0,045	$1,15 \cdot 10^{-2}$
ГБ-III-Б-10	10	0—5,0	$2,5 \cdot 10^{-7}$	58	750	0,090	$1,15 \cdot 10^{-2}$
	10	0—5,0	$5 \cdot 10^{-7}$	58	110	0,180	$1,15 \cdot 10^{-2}$

Примечание. В числителе приведены данные для серии гальванометров ГБ-III-Б с керном, в знаменателе—для серии гальванометров ГБ-III-БС без керна.

Таблица 14

Характеристика гальванометров типа ГВ-IV

Марка гальванометра	Собственная частота, гц	Рабочая полоса частот, гц	Постоянная по току, м/мм	Сопротивление, ом		Максимальный ток, ма
				внутреннее	внешнее	
ГВ-IV-B-1	30	0—15	$2 \cdot 10^{-8}$	58	1200	0,01
ГВ-IV-B-2	60	0—30	$1 \cdot 10^{-7}$	58	350	0,04
ГВ-IV-B-3	120	0—60	$4 \cdot 10^{-7}$	52	175	0,2
ГВ-IV-B-4	300	0—150	$2 \cdot 10^{-6}$	52	37	1,0
ГВ-IV-B-5	600	0—200	$8 \cdot 10^{-6}$	52	—	5,0
ГВ-IV-B-6	1200	0—400	$2,5 \cdot 10^{-5}$	18	—	10,0
ГВ-IV-B-7	2500	0—800	$1,5 \cdot 10^{-4}$	18	—	35
ГВ-IV-B-8	5000	0—1600	$5,5 \cdot 10^{-4}$	18	—	35
ГВ-IV-B-9	10000	0—3000	$3 \cdot 10^{-3}$	11	—	35
ГВ-IV-BC	5	0—2,5	$4 \cdot 10^{-9}$	78	2600	—
ГВ-IV-BC	10	0—5	$2 \cdot 10^{-8}$	54	1200	—
ГВ-IV-BC	15	0—7,5	$4,8 \cdot 10^{-8}$	54	600	—

Таблица 15

Техническая характеристика гальванометров типа М-001

Марка гальванометра	Собственная частота, гц	Рабочая полоса, гц	Постоянная по току, м/мм	Сопротивление, ом		Максимальный ток, ма
				внутреннее	внешнее	
М-001-1	120	0—40	$7,2 \cdot 10^{-7}$	35	180	0,3
М-001-2	400	0—200	$3,7 \cdot 10^{-6}$	40	30	1,5
М-001-3	1200	0—400	$2,9 \cdot 10^{-5}$	13	—	12
М-001-4	2500	0—800	$1,7 \cdot 10^{-4}$	15	—	50
М-001-5	5000	0—1700	$1 \cdot 10^{-3}$	8,0	—	100

### 5. Методы определения параметров сейсмоприемников и тарировка сейсморегистрирующей аппаратуры

Прежде чем приступить к замерам параметров колебаний, необходимо определить постоянные сейсмических приборов и гальванометров, чтобы можно было подобрать правильное сочетание их для записи того или иного показателя исследуемого процесса. Кроме этого, необходимо произвести тарировку (калибровку) приборов. Тарировка включает в себя совокупность испытаний, в результате которых находятся количественные характеристики, необходимые для подсчета данных, записываемых с помощью этой аппаратуры, и действительные величины, определяющие ис-

следуемые колебания. При тарировке определяют следующие параметры: момент инерции и приведенной длины маятника; собственную частоту сейсмоприемника и гальванометра; критическое сопротивление сейсмоприемника; степень успокоения гальванометра; коэффициент связи; чувствительность сейсмоприемников и гальванометра; амплитудную характеристику, амплитудно-частотную характеристику; фазо-частотную характеристику.

Процесс определения параметров сейсмоприемника и гальванометра сводится в основном к измерению длины, времени, силы тока и электрического сопротивления.

**Определение параметров сейсмоприемников.** Период колебаний маятника у сейсмоприемника типа ВЭГИК для записи горизонтальных колебаний в основном определяется упругостью креста пластин. Положение равновесия регулируется боковыми установочными винтами. Период колебаний маятника для регистрации вертикальных колебаний может изменяться в широких пределах вследствие изменения наклона цилиндрической пружины. Для увеличения периода пружина регулировочным винтом поднимается в верхнее положение, для уменьшения — в нижнее. Рекомендуется, чтобы периоды собственных колебаний при регистрации одного и того же процесса были у горизонтального и вертикального маятников одинаковы.

Период колебания маятника определяется секундомером при разомкнутых индукционных катушках. Маятник легким толчком приводится в движение. За определенное время  $t$  подсчитывают количество полных качаний  $n$ . Тогда период  $T = t/n$ . В правильно установленном положении катушка маятника и край кольцевой катушки должны быть на 0,5—1,0 мм ниже края зазора.

Для определения  $T$  у сейсмоприемника типа ВБП-3 снимается маятник — рамка и устанавливается шарикоподшипниками в обоймах на стойки. Затем дается отклонение на 5—10° от вертикали и по секундомеру определяется время  $t$  при 20—30 последовательных колебаниях. Период колебаний должен составлять примерно 1,60—1,65 сек.

Для определения периода собственных колебаний маятника сейсмоприемника типа ВИБ устанавливаются горизонтально ось вращения маятника и сам маятник. При этом предварительно снимаются пружины и грузы-противовесы. Затем замеряются величины  $n$  и  $t$  и рассчитывается  $T$ . Подобным образом определяют значение  $T$  и для других типов сейсмоприемников.

Приведенная длина маятника определяется по следующей формуле:

$$l_0 = 24,86 T^2, \quad (\text{VIII.27})$$

где  $T$  — период колебания физического маятника.

Для установления значения  $T$  у сейсмоприемников типа ВЭГИК маятник снимается и располагается отвесно на стойках,

а у сейсмоприемников типа ВИБ он освобождается от пружин и также располагается отвесно (ось вращения горизонтальна). Затем определяется период свободных колебаний. У сейсмоприемника типа ВБП в расчетную формулу для  $l_0$  подставляется значение  $T$ .

Меняя грузы-противовесы, можно определить  $l_0$  для каждого случая. Рассчитанная приведенная длина маятника  $l_0$  для данного маятника является величиной постоянной.

Момент инерции маятника  $K_1$  так же, как и  $l_0$ , является постоянной паспортной величиной прибора. Зная  $l_0$ , можно рассчитать  $K_1$ , так как они связаны формулой

$$l_0 = \frac{K_1}{MR_0}, \quad (\text{VIII.28})$$

где  $R_0$  — расстояние от центра тяжести маятника до оси вращения;  $M$  — полная масса маятника.

Момент инерции для сейсмоприемника ВБП-3 определяется по следующей формуле:

$$K_1 = \frac{mL^2 - \frac{(T')^2}{4\pi^2} g mL}{\frac{(T')^2}{T^2} - 1}, \quad (\text{VIII.29})$$

где  $T'$  — период колебаний с грузом  $m$ , установленным на отвесную часть рамки снятого маятника ( $m=5$  г);  $L$  — расстояние от оси вращения маятника до центра груза.

Для определения чувствительности сейсмоприемника типа ВЭГИК маятник приводится в положение для регистрации вертикальных колебаний. Вблизи оси вращения к рамке маятника прикрепляется пластилином небольшое зеркальце, установленное вертикально. У сейсмоприемников типа ВБП на полуоси горизонтально установленного маятника таким же образом устанавливается плоское зеркальце. На зеркальце от осветителя с горизонтальной целью направляется пучок света. Отраженный луч света фокусируется в виде тонкой горизонтальной линии на вертикальную шкалу, расположенную на расстоянии 1—1,5 м. Затем исследуемая катушка включается в цепь (рис. 80), которая состоит из источника питания постоянного тока с напряжением 1,5—2,0 в, миллиамперметра, переменного сопротивления  $R_n$  и тумблера  $K$ . Полярность батареи  $B$  подбирается таким образом, чтобы при включении тока маятник, а с ним и световая черта поднимались вверх.

На цилиндрическую массу маятника у сейсмоприемника типа ВЭГИК и на рамку маятника у сейсмоприемника типа ВБП-3 устанавливается гирька весом 10—20 г для первого типа приборов и 5 г — для второго типа. Расстояние от гирьки до оси

вращения  $L$  замеряется. При отклонении маятника на некоторую величину луч на замеряемой шкале также отклонится. Маятник возвращают в первоначальное положение (чтобы световая линия установилась в ту же точку), регулируя сопротивление. Далее делается отсчет по шкале миллиамперметра. Наблюдения повторяются несколько раз. Чувствительность вычисляется по формуле

$$S_c = 98,1 \frac{mL}{I I_0}, \quad (\text{VIII.30})$$

где  $m$  — масса груза,  $г$ ;  $I$  — ток,  $мА$ ;  $L$  — расстояние от оси вращения до груза,  $см$ .

У приборов типа ВИБ определение чувствительности производится без пружин и грузов-противовесов. Маятник и ось вращения располагаются горизонтально. На правую стойку маятника с помощью винта крепится зеркальце. На скобе между двумя гайками устанавливается линза. Затем через катушку маятника пропускается постоянный ток величиной не более  $15 мА$  и замеряется отклонение светового луча на вертикальной шкале. Чувствительность сейсмоприемника типа ВИБ определяют по формуле

$$S_c = 1,978 \frac{MR\theta_D}{T^2 I}, \quad (\text{VIII.31})$$

где  $MR$  — статический момент маятника без груза,  $г \cdot см$ ;  $T$  — период собственных колебаний маятника без груза,  $сек$ ;  $I$  — ток,  $мА$ ;  $\theta_D$  — угол отклонения маятника от положения равновесия,  $рад$ .

Статический момент маятника определяется при горизонтальном расположенных маятнике и оси вращения. Грузы-противовесы снимаются. Над концом маятника располагается одна из чашек весов, которая с помощью шелковой нити связана с маятником сейсмоприемника. На противоположную чашку весов накладываются гири разновесов до возвращения маятника в горизонтальное положение. Расстояние от конца маятника до оси вращения  $106 мм$ . Зная величину уравновешивающей массы, можно определить статический момент маятника по формуле

$$MR = 10,6 M_1, \quad (\text{VIII.32})$$

где  $M_1$  — величина уравновешивающей массы,  $г$ .

Определение затухания  $D_1$ . Затухание сейсмоприемника ВЭГИК складывается из трех составляющих, т. е.

$$D_1 = D_{10} + D_{11} + D_{12}. \quad (\text{VIII.33})$$

Здесь  $D_{10}$  — воздушное затухание;  $D_{11}$  и  $D_{12}$  — затухания вслед-

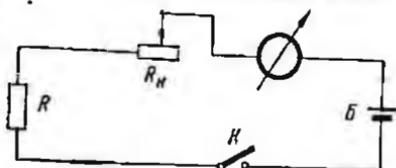


Рис. 80. Схема для определения чувствительности сейсмоприемника.

ствие взаимодействия токов в катушках с магнитным полем постоянного магнита:

$$D_{11} = \frac{g_{11}^2 T_1}{4\pi K_1} \cdot \frac{1}{R_{11}}; \quad (\text{VIII.34})$$

$$D_{12} = \frac{g_{12}^2 T_1}{4\pi K_1} \cdot \frac{1}{R_c + R_{\text{вн}}}, \quad (\text{VIII.35})$$

где  $R_{\text{вн}}$  — внешнее сопротивление гальванометра, *ом*;

$$g_{11} = S_{11} I_0 \cdot 10^5; \quad g_{12} = S_c I_0 \cdot 10^5. \quad (\text{VIII.36})$$

Затухание  $D_{10}$  определяется для сейсмоприемников ВЭГИК по формуле

$$D_{10} = \frac{0,11 T_1}{\Delta t}, \quad (\text{VIII.37})$$

где  $\Delta t$  — время, в течение которого амплитуда колебаний маятника уменьшается вдвое.

Время  $\Delta t$  определяется с помощью отсчетного микроскопа, наведенного на стрелку-указатель маятника. Для сейсмоприемников ВЭГИК величина воздушного затухания изменяется в пределах 0,004—0,006.

Затухание сейсмоприемников типа ВБП-3 определяется по формуле

$$D_1 = D_1' \left( 1 + \frac{\Delta K_1}{K_1} \right) \frac{T_0''}{T_0'}, \quad (\text{VIII.38})$$

где  $D_1'$  — затухание с грузом;  $T_0''$  — период колебаний маятника с грузом  $M$ , *сек*;  $T_0'$  — период собственных колебаний, *сек*;  $K_1$  — момент инерции маятника без груза, *г · см*;

$$\Delta K_1 = ML^2, \quad M = 100 \text{ г.}$$

Груз  $M$  в виде цилиндра ввинчивается снизу в рамку маятника, снятую с прибора и установленную полусоями на опоры.

Определение параметров гальванометра. Период  $T_2$  определяется по записи колебаний на фотобумагу. Для этой цели на гальванометр подается ток, величина которого примерно равна 0,3—0,5 предельной величины тока для данного гальванометра. Затем ток выключают, производя при этом запись на осциллографе с обязательным включением отметчика времени. Время между соседними экстремальными точками затухающей синусоиды и есть период собственных колебаний гальванометра.

Внутреннее сопротивление гальванометра измеряется обычным способом с точностью 1—2%. Внешнее критическое сопротивление определяется следующим путем. Световой луч гальванометра выводится на середину экрана осциллографа. Гальванометр замыкается на переменное сопротивление. Затем через

гальванометр пропускается ток такой величины, чтобы луч переместился к краю экрана. Затем ток выключают и луч возвращается к своему положению равновесия. В зависимости от сопротивления, на которое замкнут гальванометр при отключении тока, имеется два вида движения: 1) периодическое (значение внешнего сопротивления большое); 2) аperiodическое (малая величина внешнего сопротивления).

Увеличением, или чувствительностью, сейсморегистрирующего канала называется величина, которая характеризуется отношением отклонения светового луча гальванометра на фотобумаге  $V_T$  к истинному смещению при колебании исследуемого объекта или его производным — скорости или ускорению.

Увеличение канала  $C$  можно представить в виде произведения двух множителей

$$C = V_0 \bar{U}, \quad (\text{VIII.39})$$

где  $V_0$  — масштаб записи;  $\bar{U}$  — частотная характеристика канала, которая является функцией, оценивающей амплитудные погрешности, вносимые прибором.

Масштаб записи рассчитывается для каждого канала, регистрирующего сейсмического колебания. Частотная характеристика может быть вычислена по средним значениям параметров группы приборов.

Для переуспокоенных гальванометров, имеющих электромагнитное затухание ( $D_{20} \ll 1$ ;  $D_2 \gg 1$ ), масштаб записи можно представить формулой

$$V_0 = \frac{0,314 S_r S_c}{T_2 (R_r + R_{кр})}. \quad (\text{VIII.40})$$

Амплитудно-частотная характеристика канала устанавливается по приведенным выше расчетным формулам или путем испытания аппаратуры на специальных устройствах, называемых вибростендами. Тарировку сейсмоаппаратуры на вибростенде называют динамической. Вибростенд — это специальное устройство, задающее эталонную вибрацию. Он представляет собой площадку, совершающую поступательные движения с определенными амплитудой и частотой смещения. На такой площадке жестко крепится сейсмоприемник. Показания датчика регистрируются на фотопленке с помощью гальванометра.

По приведенным выше формулам или по данным испытания сейсморегистрирующего канала на вибростенде в заданном диапазоне частот производится оценка увеличения канала, т. е. оценка коэффициента усиления при прямом соединении инерционной катушки сейсмоприемника и гальванометра, а также при включении в цепь дополнительных сопротивлений, которые необходимы для регулировки увеличения сейсморегистрирующего канала.

## 6. Методики производства замеров сейсмических колебаний при взрывах

Методика работы и выбор аппаратуры при выполнении экспериментальных работ по замеру колебаний исследуемого объекта при взрыве во многом зависят от поставленных задач, от характеристики объекта и мощности источника колебаний. Тем не менее существуют общие принципы производства замеров.

При решении задач, связанных с сейсмическим воздействием взрывов на здания, инженерные сооружения, горные выработки и т. д., обычно используется многоканальная регистрация колебаний, названная в Институте физики Земли методом МИКС. В этом случае на одном осциллографе регистрируются колебания от 6—10 и более датчиков в зависимости от типа осциллографа. Для этого метода регистрации важно, чтобы лучи равномерно распределялись по всей ширине ленты. Поэтому необходимо заранее ввести соответствующие коррективы, включив в цепь дополнительные сопротивления. В том случае, когда записываются скорости смещений, величина дополнительного сопротивления в цепи гальванометра и сейсмоприемника может быть определена по следующей формуле:

$$R_{\text{доп}} = \frac{a\sqrt{Q} S_r S_c}{r\sqrt{r}} - (R_c + R_r), \quad (\text{VIII.41})$$

где  $Q$  — величина заряда, кг;  $r$  — расстояние от места взрыва до пункта наблюдения, м;  $a$  — коэффициент, для осциллографа Н-700  $a=10$ , для осциллографа Н-102  $a=20$ .

Для установления зависимости кинематических параметров колебаний при взрыве от величины заряда ВВ, расстояния, способа взрывания и т. д. приборы рекомендуется устанавливать по профильным линиям. В близкой зоне взрыва, величина которого может быть несколько сот килограммов и больше, должны устанавливаться сейсмоприемники типа ВБП-3 или ВИБ-У. Величину близкой зоны условно можно ограничить расстоянием 50—70 м. Она характеризуется наличием высоких скоростей колебания.

Поскольку скорости определяются мощностью источника, то размеры близкой зоны также в некоторой степени зависят от величины заряда ВВ. Изменение параметров колебаний за пределами близкой зоны происходит более плавно и значения их относительно невелики. Поэтому на данных расстояниях рекомендуется применять сейсмоприемники типа ВИБ-А, ВЭГНК, СПЭД-62 и т. п., т. е. приборы, которые обладают большой чувствительностью.

При определении направленности взрыва приборы могут устанавливаться по нескольким профильным линиям. По каждому профилю необходимо составление геологического разреза с указанием всех изменений и особенностей. В каждом пункте наблю-

дения рекомендуется установка датчиков по трем составляющим: первый по продольной горизонтальной составляющей  $X$ , второй — по поперечной горизонтальной  $Y$  и третий по вертикальной  $Z$ . При решении некоторых задач достаточно установка приборов по одной составляющей ( $X$  или  $Z$ ) или по двум ( $X$  и  $Z$ ). Расстояние между точками наблюдения в близкой зоне должно быть не более 10—15 м, а на дальних расстояниях 50—100 м и больше.

В том случае когда определяются сейсмические колебания в зданиях или других наземных сооружениях, сейсмоприемники устанавливаются на грунте в 15—20 м от здания, фундаменте и по всей высоте на перекрытиях и стенах. В данном случае приборы ориентируют по главным осям здания.

В подземных выработках датчики устанавливаются на почве, в кровле выработок, в специально пройденных нишах или скважинах.

Важное значение имеет связь прибора с объектом. В близкой зоне взрыва сейсмоприемники к массиву горных пород могут крепиться различными способами: закапыванием в грунт на глубину до 0,5—1 м; цементированием установки на анкерные болты, цементированием в массиве пород; вмораживанием установки в скважинах в зимний период.

Метод закрепления подбирается исходя из местных условий и условий постановки опыта. В дальней зоне датчики могут устанавливаться без дополнительного их крепления. При установке их на слабый или разрушенный грунт необходимо создать устойчивое основание для приборов путем очистки поверхности от слабого слоя или небольшие цементные либо гипсовые площадки.

Записывающая аппаратура устанавливается в безопасное место, защищенное от попадания кусков породы и пыли. Для того чтобы избежать паразитных вибраций и ударов в момент регистрации от толчка, осциллографы обязательно должны подвешиваться или устанавливаться на амортизаторы. На дальних расстояниях это условие может быть не обязательным.

Датчики соединяются с гальванометрами осциллографа с помощью многожильных кабелей или отдельных линий. Перед записью взрыва проверяется работа каналов путем раскочки маятника. Замеряется сопротивление электрической цепи. В случае наличия электрических наводок необходимо применять экранирующий кабель с заземлением экрана. Электрическое питание зависит от типа применяемой записывающей аппаратуры.

После полной наладки и проверки работы приборов устанавливается кассета и производится ее пробная протяжка на том режиме работы, который будет при регистрации колебаний. Расстановка приборов, сопротивление цепи, все особенности постановки опыта, расположение лучей на экране, номера датчиков и гальванометров и т. п. заносятся в полевой журнал.

Запуск записывающей аппаратуры производится за 10—

20 сек, а иногда даже за 2—3 сек до взрыва в зависимости от скорости протяжки ленты и целей опыта.

При обычных сейсмических наблюдениях скорость протяжки ленты должна быть не менее 100—160 м/сек. Когда скорость протяжки составляет не более 100 м/сек, запуск можно осуществлять по звуковому или световому сигналу (ракета), который подается за несколько секунд до взрыва.

В близкой зоне взрыва, где оператору находится опасно, осциллограф выносится за пределы опасной зоны или выводятся линии питания с последующим замыканием электрической цепи по сигналу. При регистрации колебаний на значительном удалении иногда используют теле- или радиосвязь.

Имеются специальные устройства для автоматического запуска аппаратуры, когда используются ВЭГИК (или СПМ-16). С приходом волны к сейсмоприемнику ВЭГИК (или СПМ-16), который выносится перед ближайшей группой, в его катушке вырабатывается ток, поступающий на усилитель, а затем на ждущий мультивибратор, который из устойчивого состояния переходит в неустойчивое. В одно из плеч мультивибратора включается обмотка поляризованного реле РП-5. При срабатывании реле замыкает цепь питания электромагнитной муфты осциллографа. Сейсмоприемник необходимо выносить вперед не менее чем на 100—150 м при скорости распространения сейсмических волн 3000—3500 м/сек. Этот метод применим лишь в дальней зоне на расстояниях от взрыва не ближе 150 м.

В близкой зоне для синхронизации запуска осциллографа и момента взрыва можно успешно применять осциллограф типа Н-102, у которого имеются контакты на разрыв цепи или замыкание для управления процессом. Этот способ может быть использован при электровзрывании, так как замыкание электрической цепи с предварительным пуском аппаратуры осуществляется включением съемки.

При взрывании с детонирующим шнуром можно рекомендовать следующее очень простое устройство. Обычный электрический выключатель закрепляется на деревянном основании. В противоположных направлениях от выключателя по ходу тумблера выключателя устанавливаются жесткие стойки. В сторону выключения устанавливается пружина, которая при сжатом состоянии замыкает цепь. Выключатель устанавливается в цепь электропитания осциллографа. Затем берется отрезок огнепроводного шнура, длина которого равна длине шнура у капсуля детонатора для возбуждения детонации в детонирующем шнуре. Один конец шнура прикрепляется к тумблеру выключателя. Шнур натягивается таким образом, чтобы происходило выключение. Затем шнур прочно закрепляется на второй стойке таким образом, чтобы не происходило предварительного включения. Далее производится некоторое укорачивание шнура с другой стороны (5—10 см),

вследствие чего записывающая аппаратура включается несколько раньше, чем происходит взрыв. В том случае когда работы ведутся в близкой зоне, необходимо обязательное соблюдение общих правил безопасности при взрывных работах. После окончания записи аппаратура отключается, производится демонтаж, проверка состояния аппаратуры, снимается кассета. Все замечания заносятся в журнал наблюдений.

При производстве работ в карьере или шахте для исследования устойчивости выработок обязательно определение упругих и прочностных характеристик массива горных пород в пункте наблюдения и взрываемой породы. Для этого используются специальные методы и соответствующая аппаратура.

Упругие динамические характеристики среды определяются через скорости распространения продольных и поперечных волн. Эти скорости можно определять путем использования ультразвуковой аппаратуры и с помощью сейсмоприемников, установленных на различных расстояниях.

В том случае, когда ведутся большие работы по определению сейсмического воздействия взрывов на дневной поверхности, очень удобны в работе передвижные сейсмические станции типа сейморазведочных, но с соответствующей аппаратурой, установленной на автомашине. При выполнении работ в близкой зоне все оборудование должно быть съемным. Кабели укладываются в специальные катушки, например в переносные катушки для телефонных проводов. При выполнении работ вне опасной зоны производство записи может быть непосредственно в машине. В некоторых случаях передвижная станция оборудуется источником питания в виде генератора с бензиновым двигателем или аккумуляторными батареями.

## 7. Обработка осциллограмм

Обработка осциллограмм включает в себя паспортизацию, т. е. запись на осциллограмме всех данных по условиям регистрации и расстановке аппаратуры. Осциллограммы нумеруются, проставляется дата и место опыта, величина заряда ВВ, расстояние. Для удобства к осциллограммам подклеивают специальные стандартные бланки.

В расшифровку осциллограмм входит нахождение максимальных значений частоты, амплитуды смещения, скорости, ускорения, а также значений длительности колебаний, энергии сейсмических колебаний и т. д.

В том случае когда известен коэффициент чувствительности сейсморегистрирующего канала  $C$ , амплитуда смещения, скорость, ускорение колебания определяются по следующим формулам:

$$A = \frac{Y_T}{C_1}; \quad v = \frac{Y_T}{C_2}; \quad a = \frac{Y_T}{C_3}, \quad (\text{VIII.42})$$

где  $Y_r$  — амплитуда отклонения луча на записи, см;  $C_1$ ;  $C_2$ ;  $C_3$  — тарировочные коэффициенты по смещению и его производным.

В том случае, когда производится запись скорости колебания, скорости перемещения определяют по осциллограмме по следующим формулам: для сейсмоприемников типа ВБП-3, ВЭГНК

$$v = \frac{R_z Y_r}{S_r S_c}; \quad (\text{VIII.43})$$

для сейсмоприемников типа ВИБ

$$v = \frac{R_z Y_r}{S_r S_c K}, \quad (\text{VIII.44})$$

где  $R_z$  — полное сопротивление цепи (сопротивление гальванометра, проводов, дополнительного сопротивления, сейсмоприемника);  $K$  — коэффициент уменьшения чувствительности,

$$K = \frac{l_0}{l_{np}}, \quad (\text{VIII.45})$$

$l_0$  и  $l_{np}$  — приведенная длина маятника соответственно без груза и в рабочем состоянии, см.

Период колебаний в зоне упругих колебаний равен времени между соседними экстремальными точками сейсмограмм. Частота колебаний равна обратной величине периода.

Полная, или абсолютная, продолжительность колебаний — время от начала колебаний до полного их затухания. Относительная продолжительность колебаний — это время от максимальной амплитуды до точки, где амплитуда равна  $1/3$  или  $1/2$  максимальной.

Количество циклов колебания соответствует количеству полных периодов. Затухание колебаний со временем характеризует-ся логарифмическим декрементом затухания

$$\alpha = \lg \left( \frac{A_n}{A_{n+1}} \right), \quad (\text{VIII.46})$$

где  $A_n$ ;  $A_{n+1}$  — отклонение луча.

Зная частоту колебания (или период), скорость колебания и принимая в некоторой точке колебания как гармонические, можно рассчитать амплитуду смещения и ускорение объекта по каждой составляющей колебания:

$$A = \frac{v}{2\pi f} \text{ [см]}, \quad (\text{VIII.47})$$

$$a = 2\pi f v \text{ [см/сек}^2\text{]}. \quad (\text{VIII.48})$$

В том случае, когда отклонение луча гальванометра на сейсмоленде пропорционально амплитуде смещения,

$$A = \frac{Y_T}{C} \text{ [см]}, \quad (\text{VIII.49})$$

а все остальные параметры колебаний рассчитываются через амплитуду смещения и период колебания. В зависимости от поставленных задач указанные характеристики колебаний определяются или для всех типов волн, или для какого-либо определенного типа.

При установке сейсмоприемников на различных расстояниях определяется затухание колебаний с расстоянием и скорость распространения волн для различных типов горных пород. Затухание с расстоянием рассчитывается по формуле

$$\delta = \lg \frac{A_{r_2}}{A_{r_1}}, \quad (\text{VIII.50})$$

где  $A_{r_1}$  и  $A_{r_2}$  — амплитуды колебаний соответственно в точке  $r_1$  и  $r_2$ , см.

Скорость распространения волн

$$C = \frac{r_2 - r_1}{t} \text{ [м/сек]}, \quad (\text{VIII.51})$$

где  $r_1, r_2$  — расстояние от взрыва соответственно до первой и второй групп приборов;  $t$  — время прохождения волной расстояния  $r_2 - r_1$ .

На основании замеров в каждой точке находится суммарное значение скорости, ускорения или перемещения, т. е.

$$v_{\Sigma} = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}; \quad (\text{VIII.52})$$

$$A_{\Sigma} = \sqrt{A_x^2 + A_y^2 + A_z^2}; \quad (\text{VIII.52}')$$

$$a_{\Sigma} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}, \quad (\text{VIII.52}'')$$

где  $v_x, v_y, v_z$  — скорости колебаний по отдельным составляющим;  $A_x, A_y, A_z$  — перемещения по отдельным составляющим;  $a_x, a_y, a_z$  — ускорения по отдельным составляющим.

Энергия сейсмических колебаний в пункте наблюдения определяется по формуле

$$E = \frac{1}{2} \gamma C \Sigma V_i^2 T_i, \quad (\text{VIII.53})$$

где  $\gamma$  — плотность грунта, г/см<sup>3</sup>;  $C$  — скорость распространения волны, см/сек;  $V_i$  — амплитуда скорости, см/сек;  $T_i$  — период колебания, соответствующий  $V_i$ , сек.

Для зданий и сооружений определяется, кроме всего, период

свободных колебаний по хвостовой части осциллограммы, записанной на объекте по обычной методике.

Окончательно измеренные и обработанные данные, полученные из сейсмограмм, содержат некоторые погрешности. Наиболее значительные из них и ориентировочные числовые значения, полученные в результате обобщения опыта работы [4], приведены ниже:

Погрешности	б. %
Нелинейность амплитудно-частотной характеристики канала; несоответствие условий тарировки аппаратуры условиям ее применения (утечкам, наводкам, температуре)	$\pm 15$
Непрямлинейность амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик и неправоильности при их снятии	$\pm 15$
Чувствительность сейсмоприемников не только к компоненте колебаний, действующей в рабочем направлении, но и к остальным действующим компонентам	$\pm 10$
Погрешность, вносимая вычислителем при анализе виброграмм	$\pm 10$

При решении задач, связанных с детальным изучением сейсмических волн, а также с влиянием спектрального состава частот колебания производят гармонический анализ, который включает в себя разложение полученного закона колебаний объекта на гармонические составляющие. Для анализа функций, заданных графически в виде осциллограмм, применяются специальные устройства (анализаторы) или численные методы анализа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бибер Л. А. Вибрографы с гальванометрической регистрацией. Госэнергоиздат, М., 1960.
2. Бурьянов В. П. Магнитоэлектрический осциллограф. Госэнергоиздат, М., 1952.
3. Гамбурчѐц Г. А. Основы сейсморазведки. Гостоптехиздат, М., 1959.
4. Гевондян Т. А., Киселев Л. Т. Приборы для измерения и регистрации колебаний. Машгиз, М., 1962.
5. Голицын Б. Б. Избранные труды, ч. I, II, Сейсмогеология. Изд-во АН СССР, М., 1960.
6. Гурвич И. И. Сейсмическая разведка. Гостоптехиздат, М., 1960.
7. Иорриш Ю. И. Виброметрия. Машгиз, М., 1963.
8. Кириос Д. П. — В кн.: Труды Геофизического института АН СССР, 27 (154). Изд-во АН СССР, М., 1955.
9. Медведев С. В. Сейсмика горных взрывов. «Недра», М., 1964.
10. Саваренский Е. Ф., Кириос Д. П. Элементы сейсмологии и сейсмометрии. ГИТТЛ, М., 1955.
11. Сафонов Л. В., Кузнецов Г. В. Сейсмический эффект скважинных зарядов. «Наука», М., 1967.
12. Сборник научных трудов КГРИ, 9. Госгортехиздат, М., 1962.
13. Сейсмическое действие промышленных взрывов. Инф. вып. № В-161. ИГД им. А. А. Скочинского, 1966.
14. Харин Д. А., Рулев Б. Г. — Изв. АН СССР, Серия геофизическая, 1957, 1.
15. Труды ИФЗ им. О. Ю. Шмидта, 21 (188). Вопросы инженерной сейсмологии, 6. Изд-во АН СССР, М., 1962.

# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	3
Глава I. Приборы для регистрации быстрых кратковременно протекающих процессов . . . . .	5
1. Камеры для скоростной киносъемки . . . . .	5
2. Магнитоэлектрические осциллографы . . . . .	9
Литература . . . . .	18
Глава II. Методы измерения скорости детонации взрывчатых веществ . . . . .	20
1. Измерение интервалов времени электронными хронографами . . . . .	23
2. Датчики для измерения скорости движения фронта детонационной волны . . . . .	25
3. Методика измерения скорости детонации с помощью электронно-лучевого осциллографа . . . . .	29
4. Оптические методы определения скорости детонации . . . . .	33
5. Методика измерения скорости детонации с помощью сверхскоростной фоторегистрирующей установки СФР . . . . .	38
6. Непрерывное измерение скорости детонации с помощью проволочных датчиков сопротивления . . . . .	45
7. Метод Дотриша . . . . .	48
Литература . . . . .	51
Глава III. Измерения быстроменяющихся давлений . . . . .	52
1. Измерение давления системами, чувствительными элементами которых являются упругие мембраны . . . . .	53
2. Измерение давления с использованием пьезоэлектрического эффекта . . . . .	59
3. Измерение давления с помощью пьезоэлектрического манометра . . . . .	64
4. Измерение давления полупроводниковыми датчиками . . . . .	68
5. Измерение давления индукционными в индуктивными датчиками . . . . .	70
6. Измерение давления магнитострикционными датчиками . . . . .	72
Литература . . . . .	73
Глава IV. Поляризационно-оптический метод исследования динамического напряженного состояния твердых сред . . . . .	74
1. Основы оптического метода определения плоского напряженного состояния . . . . .	74
2. Материалы для изготовления моделей . . . . .	80
3. Методы фоторегистрации процесса распространения поля напряжений . . . . .	84
4. Изготовление, исследование и подготовка моделей к взрыву . . . . .	86
Литература . . . . .	89
Глава V. Исследование упруго-пластических деформаций методом фотоупругих покрытий и методом муаровых полос . . . . .	90
1. Метод фотоупругих покрытий . . . . .	90
2. Метод муаровых полос . . . . .	95
Литература . . . . .	101
Глава VI. Исследование деформаций и напряжений в горных породах . . . . .	102
1. Исследование деформаций проволочными датчиками сопротивления . . . . .	102
2. Измерение напряжений пьезоэлектрическими датчиками . . . . .	112
Литература . . . . .	117
	163

Глава VII. Исследование скорости развития трещин . . . . .	118
1. Литературный обзор исследуемого вопроса . . . . .	118
2. Новые методики исследования скорости развития трещин . . . . .	120
Литература . . . . .	126
Глава VIII. Регистрация сейсмического действия взрывов в горных породах . . . . .	127
1. Приборы для исследования сейсмических колебаний . . . . .	129
2. Условия регистрации кинематических параметров колебаний . . . . .	137
3. Сейсмические приборы для гальванометрической регистрации колебаний при взрывах . . . . .	138
4. Записывающая аппаратура и вспомогательные приборы . . . . .	145
5. Методы определения параметров сейсмоприемников и тарировка сейсморегистрирующей аппаратуры . . . . .	150
6. Методики производства замеров сейсмических колебаний при взрывах . . . . .	156
7. Обработка осциллограмм . . . . .	159
Литература . . . . .	162

Друкованый Михаил Федорович, Петряшин Леонид Федорович, Билокопъ Владимир Петрович, Кузнецов Геннадий Васильевич

**МЕТОДЫ И СРЕДСТВА РЕГИСТРАЦИИ ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА В ГОРНЫХ ПОРОДАХ**

*Печатается по постановлению ученого совета Института геотехнической механики АН УССР*

Редактор *Н. Э. Лалгева*, Художественный редактор *И. В. Козий*, Оформление художника *И. В. Немиренко*, Технические редакторы *Б. М. Кричевская, И. П. Савицкая*, Карректор *Л. М. Тищенко*.

Сдано в набор 12.II. 1971 г. Подписано к печати 29.VI. 1971 г. БФ 05546. Зак. № 124. Изд. № 222. Тираж 1200. Бумага № 1, 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Услови. печ. листов 10,25. Учетно-изд. листов 10,64. Цена 1 руб. 22 коп.

Издательство «Наукова думка», Киев, Репина, 3.  
Киевская книжная типография № 5 Комитета по печати при Совете Министров УССР, Киев, Репина, 4.

