



**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Н.П. Медведева

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ БАЛЛИСТИКА

Часть I (Методы измерения давления)

Рекомендовано

*методическим советом Томского государственного университета
в качестве учебного пособия для специальности
160701 –«БАЛЛИСТИКА»*



Томск-2006

Рецензенты:

Ведущий н.с. НИИПММ, доктор ф.м.н. В.А. Архипов
Доцент каф. «Динамика полета», к.ф.м.н. В.В. Фараонов
(Томский государственный университет)

Н.П. Медведева.

Экспериментальная баллистика. Часть I (Методы измерения давления) Учебное пособие. – Томск: Том. ун-т, 2006.– 172с.

В первой части учебного пособия описаны основные методы измерения давления, применяемые в экспериментальной баллистике, с которыми знакомятся студенты ФТФ специальности «Баллистика». Целью курса является ознакомление слушателей с возможностями применения современной электронной аппаратуры для решения задач экспериментальной баллистики.

При подборе материала автор стремился облегчить практическое решение задач экспериментальной баллистики при оценке возможностей существующих образцов аппаратуры и при разработке требований к вновь создаваемым образцам.

© Н.П. Медведева, 2006

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ПРЕДМЕТ И СОДЕРЖАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЛЛИСТИКИ.....	5
1.1. Значение экспериментальных исследований в баллистике.....	5
1.2. Предмет экспериментальной баллистики	8
1.3. Содержание экспериментальной баллистики.....	9
2. СВЕДЕНИЯ ИЗ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ БАЛЛИСТИКИ	14
ГЛАВА I.....	26
МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ	26
1.1 ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ.....	26
1.1.1 Значение измерения давления в баллистике.....	26
1.1.2. Основные методы измерения давления.....	27
1.1.3 Элементы приборов для измерения давления.....	30
1.1.4. Понятие о тарировании индикаторов.....	33
1.2. МЕТОД ПЛАСТИЧЕСКИХ ДЕФОРМАЦИЙ	35
1.2.1. Сущность метода	35
1.2.2. Крешеры и крешерные приборы.....	36
1.2.3. Понятие о теории действия крешерного прибора.....	41
1.2.4. Тарирование крешеров.....	46
1.2.5. Прессы для тарирования крешеров.....	49
1.2.6. Методика применения крешеров для измерения давления	50
1.3. МЕТОД УПРУГИХ ДЕФОРМАЦИЙ.....	52
1.3.1. Сущность метода	52
1.3.2. Понятие о теории метода.....	54
1.3.3. Саморегистрирующий упругий манометр.....	63
1.3.4. Результаты применения упругих манометров.....	67
1.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МЕТОД.....	69
1.4.1. Физические основы метода.....	69
1.4.2. Принцип измерения давлений.....	73
1.4.3. Пьезоманометр	77
1.4.4. Электронный усилитель.....	85
1.4.5. Тарирование	93
1.4.6. Заключение.....	99
1.4.7. Электрическое дифференцирование и интегрирование опытной кривой давления	101

1.5. ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД	107
1.5.1. <i>Сущность метода</i>	107
1.5.2. <i>Типы омических датчиков</i>	108
1.5.3. <i>Физические свойства омических датчиков</i>	110
1.5.4. <i>Конструкции тензоманометров</i>	115
1.5.5. <i>Электрическая схема тензоиндикатора</i>	118
1.5.6. <i>Тарирование тензоиндикатора</i>	126
1.5.7. <i>Заключение</i>	127
1.6. ИНДУКТИВНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ	128
1.6.1. <i>Принцип действия электромеханических ферромагнитных датчиков и преобразователей, классификация</i>	128
1.6.2. <i>Одinarные индуктивные датчики – ОИД</i>	130
1.6.3. <i>Дифференциальные индуктивные датчики – ДИД</i>	131
1.7. ЕМКОСТНЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ.....	135
1.8. ПРИМЕНЕНИЕ ЭВМ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ.....	140
1.8.1. <i>Применения цифровых методов и средств для измерения динамических давлений</i>	141
1.8.2. <i>Аналого-цифровые преобразователи</i>	141
1.8.3. <i>Системы цифровой регистрации динамических давлений</i>	143
1.8.4. <i>Состав и структура автоматизированной системы измерения динамического давления</i>	144
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	146
ЛИТЕРАТУРА	148

ВВЕДЕНИЕ

1. Предмет и содержание экспериментальной баллистики

1.1. Значение экспериментальных исследований в баллистике

Баллистика является прикладной наукой; она изучает законы движения артиллерийских снарядов, бросаемых на расстояние силой упругости пороховых газов для поражения целей, и разрабатывает научные основы способов применения этих законов на практике для управления движением снарядов при проектировании и боевом применении артиллерийских орудий и боеприпасов к ним.

Движение снаряда есть результат проявления большого числа физических явлений, возникающих при выстреле из артиллерийского орудия. В конечном итоге все эти явления в совокупности определяют силы, под действием которых снаряд движется в канале ствола орудия и описывает траекторию в воздухе до момента попадания в цель.

Движение снаряда и весь комплекс обуславливающих его и связанных с ним процессов внутри и вне канала ствола обычно называют явлением выстрела.

Изучить законы движения снаряда можно лишь при изучении закономерностей явления выстрела в целом. В этом состоит главная задача основных частей баллистики: внутренней баллистики, изучающей движение снаряда в канале ствола орудия, и внешней баллистики, занимающейся изучением движения снаряда в воздухе.

Явление выстрела весьма сложно. Многие составляющие его процессы сами отличаются большой сложностью, взаимно связаны друг с другом и сильно зависят от схемы устройства и конструкции орудия, порохового заряда и снаряда, от свойств пороха и от состояния атмосферы, в которой снаряд движется. Кроме этого, значительная часть процессов явления выстрела протекает в весьма короткие промежутки времени и характеризуется высокими значениями физических параметров: скорости, давления, температуры и т. д.

Сложность и напряженность явления выстрела не позволяют изучить его в полном объеме. Поэтому в баллистике ограничиваются изучением основных закономерностей явления выстрела, от которых существенно зависит движение снаряда. Это изучение с не-

обходимой для артиллерийской практики полностью осуществляется теоретическими и экспериментальными методами исследования.

При теоретическом изучении сложное явление выстрела расчленяют на более простые процессы, выделяют из них наиболее существенные и отбрасывают те процессы, которые для баллистики имеют второстепенное значение или не поддаются пока изучению. Выделенные таким образом главнейшие процессы схематизируются с целью применения математического аппарата к каждому из них и к их совокупности, характеризующей тот или иной период развития явления выстрела. При этом схематизация процессов основывается на наблюдениях, накопленных фактах и общих соображениях физики, химии и других наук.

В результате такой схематизации действительное явление выстрела заменяется его некоторой упрощенной физической моделью, которая описывается определенной системой уравнений. Характер этих уравнений зависит от выбора схемы явления выстрела. Решение системы уравнений приводит к установлению зависимостей, выражающих основные закономерности явления выстрела. Точность этих зависимостей зависит от того, как полно охватывает выбранная схема наиболее существенные стороны явления выстрела.

Система полученных зависимостей и их обоснований составляет теорию баллистики. Теория баллистики приводит многообразие различных сторон явления выстрела к единству; она дает возможность производить общий анализ явления выстрела, предвидеть характер его развития и управлять им в нужном направлении.

Практическая ценность теории состоит в том, что она позволяет рассчитывать элементы движения снаряда в различные периоды явления выстрела и определять условия, необходимые для практического осуществления желаемых результатов выстрела.

Правильность теоретических положений баллистики определяется тем, насколько они подтверждаются на практике. Поэтому каждое теоретическое решение баллистики, как бы строго оно ни было получено, всегда проверяется на опыте, в реальных условиях, т. е. при действии всех факторов, которые отбрасываются при теоретическом исследовании.

Заключительная опытная проверка теории необходима для явления того, насколько удачно произведена схематизация явления выстрела, как полно теория описывает его основные процессы и какова степень точности ее расчетных методов. Опытная проверка

дает возможность исправлять теоретические зависимости при помощи так называемых опытных коэффициентов.

Однако этим не исчерпывается значение опытов в баллистике. К опытам постоянно прибегают для исследования мало изученных или вновь обнаруженных сторон явления выстрела и для уточнения уже имеющихся представлений о различных его процессах.

При экспериментальных исследованиях процессы явления выстрела изучаются во всем многообразии присущих им качеств, отображаемых измеряемыми в процессе опытов величинами, называемыми в баллистике характеристиками процессов выстрела или баллистическими элементами выстрела. Эти опытные данные выражают в совокупности зависимости, существующие между различными сторонами явления выстрела.

Подвергнутые теоретическому обобщению опытные данные дают возможность выявить общие, наиболее существенные свойства изучаемых процессов. Благодаря этому удается глубже выяснить физическую природу явления выстрела.

Обобщенные опытные данные позволяют количественно оценить влияние тех или иных факторов в явлении выстрела, установить, какие из них необходимо учитывать, и тем самым правильно произвести схематизацию явления выстрела. Все это делает теорию баллистики более обоснованной, а результаты ее более близкими к действительности.

В этом смысле теоретические основы баллистики представляют собой систему закономерностей, выведенных из опытов, путем их анализа и обобщений. Следует отметить, что и опыты в свою очередь требуют предварительного теоретического освещения ряда вопросов. Это делает экспериментальные исследования более целенаправленными, повышает их качество и позволяет производить опыты с меньшей затратой сил, средств и времени.

Экспериментальные исследования имеют большое значение как средство определения разнообразных констант, характеризующих баллистические свойства пороха, снаряда и оружия. Определение этих величин путем теоретических расчетов не всегда возможно и к тому же менее точно.

Наконец, экспериментальные исследования имеют широкое применение при баллистических контрольных и приемных испытаниях артиллерийских систем. Данные этих исследований служат основанием для заключения о соответствии баллистических свойств орудий, пороховых зарядов и снарядов установленным тактико-

техническим требованиям. Таким образом, экспериментальные исследования в баллистике являются необходимой частью научного изучения явления выстрела. Они неразрывно связаны с теоретическими исследованиями, дополняют их опытными данными для обобщений и вместе с тем служат критерием правильности теории баллистики.

1.2. Предмет экспериментальной баллистики

Основными элементами всяких экспериментальных исследований являются, во-первых, измерение физических величин, характеризующих изучаемые процессы, и, во-вторых, обработка результатов, получаемых при измерениях.

Измерения обычно осуществляются при помощи измерительной аппаратуры, а обработка результатов выполняется с помощью математических приемов. Эти технические и математические средства изучения явлений опытным путем чрезвычайно разнообразны.

Под измерительной аппаратурой понимается совокупность технических средств – приборов, установок и приспособлений, которыми осуществляется измерение той или иной величины.

Многие из них являются общими для различных областей науки и техники. Вместе с этим в каждой области знаний применяются специальные средства экспериментального исследования.

Баллистика в этом отношении не является исключением. Изучаемое ею явление выстрела отличается рядом специфических особенностей. Главнейшие из них заключаются в многочисленности процессов, протекающих при выстреле, в сложной связи между ними, в малой продолжительности и большой напряженности многих процессов выстрела.

Сложность явления выстрела крайне затрудняет изучение отдельных его процессов в их общем комплексе. Такие процессы часто приходится воспроизводить в иных условиях, чтобы исключить в той или иной мере влияние посторонних факторов. Кроме того, некоторая часть процессов выстрела не поддается прямым методам опытного изучения. Их приходится изучать косвенными путями, через процессы, непосредственно связанные с ними и уже достаточно изученные.

Кратковременность многих процессов выстрела осложняет измерение характеризующих их величин, вынуждая применять сложные измерительные приборы, позволяющие фиксировать ход разви-

тия изучаемых процессов в короткие промежутки времени, измеряемые часто тысячными и еще меньшими долями секунды.

Сложный характер связей между процессами выстрела и их взаимная обусловленность накладывают также некоторую специфику на приемы и способы обработки результатов измерений, отличающихся, как правило, большой сложностью и трудоемкостью.

Таким образом, специфические особенности явления выстрела заставляют прибегать к особым методам организации и проведения опытов, применять специальные измерительные приборы, а также пользоваться своеобразными способами и приемами обработки результатов измерения.

Вопросы, связанные с экспериментальными исследованиями в баллистике, настолько разнообразны и обширны, что их содержание требует самостоятельного изучения. Поэтому эти вопросы выделены в специальную часть баллистики, которая называется экспериментальной баллистикой.

Предметом экспериментальной баллистики является изучение методов измерений, организации и проведения опытов и приемов обработки результатов измерений, применяемых при экспериментальных исследованиях явления выстрела и баллистических свойств артиллерийских орудий, зарядов и снарядов.

В этом общем определении предмета экспериментальной баллистики под методами измерений понимается совокупность различных видов баллистических измерений, принципов устройства и действия применяемой при этом аппаратуры, а также способов проверки, оценки точности и применения аппаратуры на практике.

1.3. Содержание экспериментальной баллистики

Не анализируя подробно явление выстрела, можно выделить в нем следующие основные процессы:

1. горение пороха, т.е. превращение твердого вещества—пороха в газы с выделением большого количества тепла;
2. превращение тепловой энергии пороховых газов в механическую и другие виды энергии;
3. движение снаряда в канале ствола под действием давления пороховых газов и различного рода сил сопротивления;
4. движение снаряда в воздухе под действием силы тяжести снаряда и силы сопротивления воздуха.

Опытное изучение этих процессов основывается на измерении разнообразных баллистических величин. С помощью последних производится анализ явления выстрела, определяется влияние раз

личных факторов на характер его развития и устанавливаются количественные соотношения между отдельными характеристикам выстрела в виде зависимостей и формул. Последние представляют собой математическое выражение закономерностей, которым подчинены отдельные связанные с выстрелом процессы.

Особое значение при экспериментальных исследованиях имеют измерения величин давления пороховых газов и скорости снаряда, также определение характера их изменения во времени. Измерения давления пороховых газов и скорости снаряда служат самым широким средством для разностороннего изучения многих процессов явления выстрела. Поэтому эти измерения являются основными видами измерений, применяемыми в экспериментальной баллистике.

Давление пороховых газов выражает силу, движущую снаряд в канале ствола. Опытные кривые давления в функции времени или пути снаряда дают возможность исследовать действие пороха в орудии, определить путь, скорость и ускорение снаряда в канале ствола и связать элементы движения снаряда с условиями заряжания орудия. Кривые давления применяются при расчете прочности ствола, действия выстрела на лафет и действия механизмов взрывателей. С помощью кривых давления, получаемых при сжигании пороха в постоянном объеме в так называемых манометрических бомбах, производится баллистический анализ порохов, т.е. определяются их свойства и характеристики процесса горения пороха и образования пороховых газов.

Столь же большое значение имеют измерения скорости снаряда на различных участках его пути. Знание величин скорости снаряда в любые моменты движения позволяет сделать анализ сил, действующих на снаряд, определить силы сопротивления воздуха летящему снаряду и оценить баллистические качества снаряда. Особенно важно определение начальной скорости снаряда, под которой понимают скорость снаряда в момент вылета из канала ствола. Начальная скорость является при прочих равных условиях мерой полезного действия порохового заряда в орудии и служит характеристикой состояния артиллерийских орудий в отношении стабильности свойств пороховых зарядов и износа канала ствола. Знание начальной скорости необходимо также для расчета траектории снаряда и для составления таблиц стрельбы.

Определение скорости снаряда основывается на измерении весьма малых промежутков времени, в течение которых снаряд проходит определенные расстояния на траектории. Измерение времени производится также при исследовании изменений во времени многих других баллистических величин. Вследствие этого измерениям

малых промежутков времени в экспериментальной баллистике при­дается большое значение.

Важное место в экспериментальной баллистике занимают изме­рения элементов отката ствола: пути, скорости и ускорения, измере­ния сил сопротивления врезанию пояска снаряда в нарезы и сил трения пояска о нарезы, измерения температуры пороховых газов и скорости их течения, определение аэродинамических характеристик снарядов и различных характеристик движения их в воздухе.

Для выполнения перечисленных измерений в эксперименталь­ной баллистике применяется самая разнообразная измерительная аппаратура. Устройство этой аппаратуры, принципы действия и способы её применения определяются родом измеряемых величин, характером их изменения и условиями, в которых производятся изме­рения. В подавляющем большинстве баллистическая аппаратура построена на использовании электрических принципов измерения и регистрации быстро изменяющихся механических величин: пере­мещений, скоростей, ускорений, сил и давлений.

Кроме того, используются специальные способы фотографиро­вания различных фаз развития процессов выстрела, например, дви­жения снаряда и пороховых газов непосредственно после вылета снаряда из канала ствола и дальнейшее движение его в воздухе, распределение плотности воздуха и образование волн вокруг летя­щего снаряда.

Из приведенной выше характеристики значения измерений в балли­стике следует важное требование к ним. Результаты измерений должны быть прежде всего достоверными, т. е. правильными и достаточными по точности. Они должны позволять делать возможно более широкие обобщения и не должны содержать противоречий, приводящих к неод­нозначному истолкованию опытных данных.

Это фундаментальное требование прежде всего относится к из­мерительной аппаратуре. Поэтому в экспериментальной баллистике большое внимание уделяется изучению физических основ принци­пов устройства и действия измерительной аппаратуры, изучению способов проверки и контроля за постоянством ее показаний, а так­же исследованию точности аппаратуры.

С измерениями непосредственно связана обработка результатов измерений. Задачей последней является вычисление искомых вели­чин по ряду измеренных величин, нахождение различных поправок, определение точности окончательных результатов измерений и,

наконец, установление тех или иных закономерностей в изучаемых процессах.

Обработка результатов измерений является завершающим этапом процесса измерений. Она должна в такой же мере, как и измерения, удовлетворять высоким требованиям в отношении достоверности. Только при этом условии конечные результаты экспериментальных исследований могут служить основанием для создания теории баллистики и критерием ее правильности.

Обычно вопросы обработки результатов измерений излагаются в специальной литературе и руководствах. Экспериментальная баллистика заимствует из них необходимые приемы и способы обработки и дополняет их, учитывая специфику опытного материала, получаемого при изучении баллистических явлений.

Особое значение в экспериментальной баллистике имеют вопросы организации и проведения опытов. Вследствие практической невозможности осуществить явление выстрела во всей полноте в закрытом помещении опытные исследования процессов выстрела проводятся как в лабораторных, так и в полигонных условиях.

Лабораторные исследования имеют целью изучение физического существа отдельных процессов выстрела или совокупности их, составляющей лишь некоторую часть явления выстрела. При этом процессы выстрела воспроизводятся нередко в искусственных условиях, что ограничивает возможности применения лабораторных исследований для разнообразных условий стрельбы из орудий различного типа и калибра.

Полигонные исследования имеют более широкий характер, чем лабораторные. Они позволяют изучать явление выстрела и его процессы в естественных для них условиях. Это достигается путем проведения специальных опытных стрельб и обобщений большого фактического материала, получаемого при опытах.

Однако полигонные исследования требуют значительно больших материальных затрат, чем лабораторные. Последние более просты в отношении организации опытов и допускают применение тонких методов эксперимента. Это делает лабораторные опыты весьма важным элементом экспериментальных исследований. Как правило, лабораторные исследования предшествуют полигонным и создают необходимые предпосылки для более глубокого изучения явления выстрела в реальных условиях с меньшими затратами средств и времени.

Лабораторные и полигонные исследования позволяют более глубоко и всесторонне изучать различные вопросы баллистики. Соот-

ветственно с задачами и возможностями этих видов экспериментальных исследований разрабатываются методы проведения опытов и способы использования измерительной аппаратуры.

Ввиду большого разнообразия вопросов, возникающих при опытных исследованиях, методика их проведения не отличается постоянством. Она представляет собой изменяющийся от одного исследования к другому комплекс способов, приемов и операций, обеспечивающих изучение тех или иных процессов выстрела. При этом нередко имеет место комплексное использование различной измерительной аппаратуры в целях одновременного исследования определенного круга процессов во взаимной их связи в условиях одного и того же опыта.

Все приведенные выше вопросы, представленные в систематическом и подробном изложении с необходимыми теоретическими обоснованиями, составляют содержание экспериментальной баллистики.

Резюмируя изложенное, можно сказать, что *содержание экспериментальной баллистики* составляет в основном разработку следующих вопросов:

1. экспериментальное исследование работы пороховых газов при выстреле и измерения параметров его состояния: давления, плотности и температуры;

2. измерение перемещений, скоростей и ускорений снаряда, откатных частей и газовых потоков;

3. измерение времени в баллистических процессах;

4. экспериментальное изучение процессов, связанных с движением снаряда, и методов определения сил и моментов, действующих на снаряд в различные периоды выстрела;

5. экспериментальное исследование работы различных элементов артиллерийских орудий и боеприпасов при выстреле (исследование дульных тормозов, газоотводных устройств, сопел, элементов автоматики, ведущих устройств снарядов и мин и т. д.);

6. экспериментальное определение баллистических характеристик порохов, зарядов, снарядов (пуль, мин) и орудий;

7. организация и проведение лабораторных и полигонных испытаний и методика обработки результатов измерений.

На основе этого внутренняя и внешняя баллистика создают методы решения практических задач, связанных с проектированием, изготовлением и боевым применением объектов артиллерийского вооружения.

2. Сведения из истории развития баллистики

Баллистика ведет свое начало с XVI века. Ее теоретические основы, методы исследования и решения задач создавались в процессе развития артиллерии и в связи с ее практическими потребностями.

Важнейшим этапом в развитии баллистики явилась вторая половина XIX века. Этот период характеризуется крупными преобразованиями в артиллерии. Артиллерия переходила от гладкоствольных орудий и сферических ядер к нарезным орудиям, стреляющим продолговатыми снарядами, получающими при выстреле вращательное движение. Переход к нарезным орудиям устранял весьма существенный недостаток гладкоствольной артиллерии – неправильный полет снарядов. Вследствие этого значительно повышались кучность и дальность стрельбы; артиллерия приобрела большую мощь и действенность огня.

Технические преобразования в артиллерии поставили перед баллистикой ряд новых вопросов, для решения которых к этому времени было сделано очень мало как в теоретическом, так и в практическом отношении. Развитие нарезной артиллерии требовало от баллистики изучения основных процессов явления выстрела. Особенно большое значение имело изучение горения пороха и действия пороховых газов в орудии в зависимости от условий заряжания и от способов ведения снаряда по нарезу. Совершенно новых исследований требовал вопрос о сопротивлении воздуха вращающимся снарядам различных форм и размеров. Наконец, ощущалась большая потребность в практических приемах использования закономерностей, которым подчинялось явление выстрела в нарезном орудии.

Все эти важные задачи вызвали широкие теоретические и экспериментальные исследования, а также усиленную разработку специальных измерительных приборов и методов их применения для изучения баллистических явлений. Успешному подъему научных исследований в баллистике в сильной степени способствовали бурное развитие промышленности и общий прогресс науки и техники в XIX веке.

Выдающаяся роль в развитии баллистики на этом этапе принадлежала русским ученым-артиллеристам. Среди них особенно выделяются имена К.И. Константинова, Н.В. Маиевского. Им принадлежит неоспоримый приоритет в разработке ряда важнейших вопросов баллистики. Своими научными трудами эти ученые заложили теоретические и экспериментальные основы баллистики в

России и оказали сильное влияние на развитие баллистики в других странах.

Крупный вклад в баллистику был сделан талантливым ученым-изобретателем, творцом боевых ракет, генералом К.И. Константиновым. Он впервые применил электричество и магнетизм для целей измерения скорости снарядов и для регистрации во времени быстропротекающих баллистических процессов.

Этим было положено начало новому направлению развития баллистических приборов и методов применения их в исследованиях процессов явления выстрела.

Лично К.И. Константиновым был изобретен ряд электромагнитных баллистических приборов: в 1842 г. – электрический хроноскоп, в 1843 – электромагнитный маятниковый хронограф и в 1844 – электробаллистический хронограф. Эти приборы были использованы им для измерения времени полета снарядов сперва на одном отрезке траектории, а затем на большем количестве отрезков траектории при одном выстреле.

Несколько позже, в 1847г., Константинов изобрел электрический ракетный баллистический маятник, при помощи которого он определял не только реактивную силу пороховых газов, движущую ракету, но и закон изменения этой силы во времени.

Идея использования электричества для баллистических измерений и оригинальность принципов устройства приборов Константинова быстро получили всеобщее признание и распространение. Многие исследователи плодотворно использовали их для изучения явления выстрела и для разработки различных электромагнитных хронографов и других баллистических приборов.

Свои изобретения К.И. Константинов использовал для изучения работы и действия боевых ракет и для усовершенствования их конструкции и изготовления. В этой области он достиг исключительно больших результатов, доставивших ему мировую известность.

Трудами К.И. Константинова были заложены основы для дальнейшего развития реактивного оружия, а также экспериментальной



Генерал К.И. Константинов

баллистики и ее методов измерения баллистических величин при помощи электрических устройств.

Появление электромагнитных хронографов способствовало экспериментальному и теоретическому изучению сопротивления воздуха вращающемуся продолговатому снаряду. С этой целью в ряде стран на протяжении 1865–1880 гг. были проведены широкие опыты. В каждой стране делались попытки установить закон сопротивления воздуха.

Сделать это удалось выдающемуся ученому профессору Артиллерийской академии артиллеристу Н.В. Маиевскому. На основании своих многолетних опытов и исследований он в 1882 г. устанавливает закон сопротивления воздуха в виде одночленных степенных зависимостей для различных участков скоростей снаряда, в пределах от 0 до 700 м/с. Позднее его ученик профессор Н.А. Забудский на основании новейших опытов расширяет пределы закона сопротивления воздуха до 1000 м/с.



Генерал Н.В. Маиевский

Особенно ценны проведенные Н.В. Маиевским исследования вращательного движения продолговатого снаряда. Разработанное им в 1865 г. решение этого вопроса по новизне, полноте и глубине исследований не имело себе равных в мировой литературе того времени. Многочисленные исследования Н.В. Маиевского нашли наиболее полное отражение в его фундаментальном «Курсе внешней баллистики», изданном в 1870 г. Этот труд получил широкое распространение в разных странах, где использовался в качестве основы решения многих вопросов, связанных с переходом к нарезным орудиям.

Наряду с опытным изучением сопротивления воздуха во всех странах большое значение уделяется изучению действия пороховых газов в орудии. Важность этого вопроса определялась необходимостью рационально проектировать орудия и особенно создать методы расчета стволов на прочность.

Оригинальные исследования в этом направлении были сделаны Н.В. Маиевским. В 1855 г. он разработал новый способ определения

давления пороховых газов в различных сечениях канала. Полученные при этом кривые давления в зависимости от пути снаряда он впервые в артиллерийской практике применил при расчете проектировавшейся им 60-фунтовой пушки. Эта пушка показала значительно лучшие результаты, чем пушки других авторов, в том числе и иностранных.

В 1867 г. Н.В. Маиевский экспериментальным путем определил кривые давления и скорости снаряда в канале ствола. Для этой цели был применен разработанный им способ измерения скорости снаряда на последовательно расположенных коротких участках его пути в канале ствола.

Указанные исследования Маиевского имели большое значение для внутренней баллистики; они способствовали развитию правильных представлений о закономерностях движения пороховых газов. Результаты этих исследований нашли непосредственное практическое применение в ряде стран.

Большое значение во второй половине XIX века имел вопрос о порохе для нарезной артиллерии. Несмотря на многовековое применение в артиллерии дымного пороха, законы его горения не были изучены в достаточной мере.

Первые исследования процесса горения дымного пороха были произведены в 1851–1857 гг. русским химиком и артиллеристом Л.Н. Шишковым. На основании опытов по сжиганию пороха в калориметрической бомбе им был дан анализ продуктов разложения пороха, была определена температура его горения и установлена эмпирическая зависимость величины наибольшего давления пороховых газов от свойств пороха и плотности заряжания. Позднее, в 1868 г., артиллерийский инженер Н.П. Федоров опытными стрельбами из пистолета, а затем из пушки исследовал влияние условий заряжания на состав продуктов разложения.

Работы Л.Н. Шишкова и Н.П. Федорова положили начало разработке теории горения порохов и были использованы в последующих работах различных исследователей.

Дальнейшее исследование этого вопроса нашло продолжение в более поздних работах ряда ученых. В опытах этих ученых применялась более совершенная аппаратура: манометрическая бомба – для сжигания в ней порохов и медные столбики (крешеры) – для определения по величине их сжатия наибольшего давления пороховых газов в бомбе.

Эти исследования расширили сведения о составе продуктов разложения пороха при горении и подтвердили ранее установленную Л.Н. Шишковым зависимость для наибольшего давления пороховых газов при горении пороха в постоянном объеме.

С установлением зависимости для наибольшего давления пороховых газов в постоянном объеме была получена возможность определять силу пороха по данным опытов в манометрической бомбе.

В конце XIX века в артиллерии вместо дымного пороха стал применяться новый, более сильный бездымный порох. Последний позволял получать при стрельбе из орудий значительно большие скорости снарядов, чем заряды того же веса из дымного пороха. Исследование горения бездымного пороха привело к усовершенствованию манометрической бомбы; к ней было добавлено устройство, позволяющее с помощью крешера регистрировать часть кривой давления пороховых газов в бомбе в функции, времени.

На основании анализа кривых давления и обобщения опытов различных исследований был предложен и получил применение геометрический закон горения бездымного пороха. Основой этого закона являлось предположение о горении бездымных порохов параллельными слоями.

Геометрический закон горения в дальнейшем был использован во внутренней баллистике для анализа и регулирования процесса образования пороховых газов при горении пороха в орудии и для установления аналитическим методом основных зависимостей, описывающих движение снаряда в канале ствола.

Для развития нарезной артиллерии большое практическое значение имели исследования действия бездымного пороха непосредственно в орудиях. Впервые такие исследования провел в 1893–1894 гг. Н.А. Забудский. Стрельбой из орудия, снабженного крешерными приборами вдоль оси канала ствола, он выявил характер распределения давления при движении снаряда в канале ствола и установил эмпирические зависимости для опреде-



Н.А. Забудский

ления давления в орудии при изменении условий заряжания: объема каморы, веса заряда, толщины пороха и веса снаряда.

Эти зависимости длительное время использовались на практике при подборе зарядов из бездымного пороха к артиллерийским орудиям и при анализе влияния условий заряжания на характер протекания явления выстрела.

В исследованиях процессов явления выстрела, проведенных во второй половине XIX века, большое место занимали опыты, специальные стрельбы и лабораторные эксперименты. К концу XIX века техника экспериментальных исследований стала настолько обширна и разнообразна, что она стала выделяться в особую часть баллистики, которая вначале получила название опытной, а затем экспериментальной баллистики.

Первые труды, систематически излагающие вопросы экспериментальной баллистики, были изданы в Артиллерийской академии. Так, в 1885–1891 гг. профессором академии В.А. Пашкевичем был написан курс внутренней баллистики, в котором вторая часть была посвящена описанию приборов и методов экспериментальных исследований. В 1901 г. профессор академии А.Ф. Бринк написал наиболее полный для того времени курс внутренней баллистики. Второй частью этого курса была экспериментальная баллистика.

Перечисленные труды были переизданы в Германии, Франции, Англии и США и долгое время были единственными в литературе руководства по внутренней и экспериментальной баллистике в учебной и научной работе артиллерийских учреждений разных стран.

Начало XX века характеризуется дальнейшим совершенствованием артиллерии главным образом в направлении повышения мощности, дальнобойности и увеличения скорострельности орудий. Решение этих задач требовало от баллистики более полного раскрытия закономерностей явления выстрела и выяснения зависимости его процессов от разнообразных факторов.

В первые два неполных десятилетия двадцатого столетия наша отечественная баллистика обогатилась рядом новых и важных исследований.

В области внешней баллистики продолжались работы конца XIX века по изучению законов сопротивления воздуха, законов движения снарядов в воздухе и разработка методов расчета траекторий снаряда. В этот период получили дальнейшее развитие идеи Н.В. Маиевского. Его ученик Н.А. Забудский разработал табличный способ расчета траекторий, уточнил законы сопротивления воздуха для

больших скоростей, исследовал влияние вращательного движения Земли на полет снаряда.

В области внутренней баллистики были расширены исследования горения порохов, характера действия пороховых газов и движения снаряда в канале ствола.

Особенно крупной работой начала XX века был труд выдающегося ученого-артиллериста, профессора Артиллерийской академии Н.Ф. Дроздова. В своем труде Н.Ф. Дроздов в 1903–1910гг. впервые в мировой литературе по баллистике дал математически точное решение основной задачи внутренней баллистики при геометрическом законе горения пороха. Этот труд лежит в основе современной внутренней баллистики.

Из других больших работ того периода весьма ценным для внутренней баллистики был труд виднейшего ученого-баллистика нашей страны профессора Артиллерийской академии И.П. Граве. Этот труд, написанный в 1904 г., посвящен исследованию закона скорости горения пороха и обоснованию различных видов математического выражения этого закона. В числе их было выражение для закона скорости горения, предложенное И.П. Граве.



И.П. Граве

К этому времени также относятся большие экспериментальные исследования различных процессов явления выстрела. В течение 1903–1911 гг. Н.А. Забудским исследовался вопрос об изменении давления пороховых газов и скорости снаряда в канале ствола. Опыты производились с рядом артиллерийских орудий и особенно с разработанной Н.А. Забудским 75-мм скорострельной пушкой обр. 1902 г.

Исследования дали богатый опытный материал, который был неоднократно использован во внутренней баллистике при теоретических обобщениях и при полигонных испытаниях артиллерийских орудий.

Большое значение для внешней баллистики имели экспериментально-теоретические исследования талантливого ученого-артиллериста В.М. Трофимова в 1908–1915 гг.

В проводимых опытах он определял силу сопротивления воздуха движению длинных снарядов различного очертания. Было выявлено большое влияние формы головной части снаряда при больших скоростях полета и установлены наиболее рациональные формы головной и заповясной частей снаряда.

Исследования В.М. Трофимова являлись в то время единственными в мировой литературе и послужили основанием для разработки вопросов стрельбы из орудий на очень большие дистанции.

Не ограничиваясь изучением вопросов внешней баллистики, В.М. Трофимов в 1916 г. разработал газодинамическое орудие и экспериментально исследовал его баллистические свойства. Схема устройства этого орудия составляет основу устройства безоткатных орудий, применяющихся в настоящее время.

Одновременно с работой русских ученых за границей в начале XX века, так же как и во второй половине XIX века, велись в больших масштабах теоретические и экспериментальные исследования явления выстрела и разработка его теории.

С целью дальнейшего развития артиллерии с учетом опыта минувшей войны 1914–1918 гг. в 1918 г. при Главном артиллерийском управлении создается «Комиссия особых артиллерийских опытов», или сокращенно «КОСАРТОП». Во главе этой комиссии был известный ученый-артиллерист В.М. Трофимов. К работе в КОСАРТОП были привлечены виднейшие отечественные ученые: Н.Е. Жуковский, С.А. Чаплыгин, А.Н. Крылов, Н.А. Забудский, Н.Ф. Дроздов, И.П. Граве и много других военных и гражданских специалистов.

Решая крупные задачи по развитию артиллерийской техники, КОСАРТОП большое внимание уделял исследованиям в области внутренней и внешней баллистики. Видное место в этих исследованиях занимали вопросы баллистики, связанные со стрельбой на дальние и сверхдальние дистанции, а также со стрельбой по воздушным целям.

В решении этих вопросов особенно большие исследования экспериментально-теоретического характера были проведены В.М. Трофимовым. Под его руководством в 1919–1922 гг. разрабатывались и испытывались новые снаряды удобообтекаемой формы, определялись законы сопротивления воздуха этих снарядов и устанавливались условия устойчивости их на полете. Одновременно исследовались необходимые для сверхдальной стрельбы конструк-

ции канала ствола, природа пороха и способы получения высокой прогрессивности его горения.

Соответственно с новыми требованиями артиллерийской практики во внешней баллистике были впервые применены численные методы интегрирования дифференциальных уравнений движения снаряда. Этот способ расчета траекторий снарядов был разработан В.М. Трофимовым на основе трудов академика А.Н. Крылова. Несколько позже методы численного интегрирования были успешно применены к решению основной задачи внутренней баллистики.

Помимо вопросов, непосредственно связанных со сверхдальней стрельбой, КОСАРТОП занимался разработкой методов решения основной задачи внутренней баллистики для обычных артиллерийских орудий и орудий газодинамического типа, методики баллистического анализа орудий и установлением критериев для оценки баллистических свойств артиллерийских систем. Большое внимание уделялось также решению специальных задач внутренней баллистики: исследованию горения пороха, разработке прогрессивных форм зерен пороха и др.

В процессе выполнения перечисленных работ в практику баллистики внедрялись новые методы и приборы экспериментальных исследований. В частности, в баллистике впервые применяется метод изучения вращательного движения снарядов стрельбой по ряду картонных щитов, поставленных один за другим. В 1922 г. инженер-артиллерист В.В. Гун предложил использовать явление изменения емкости проводника при прохождении мимо него снаряда для фиксирования моментов прохождения снаряда через заданные точки траектории. Впоследствии с развитием электронной техники этот принцип привел к созданию соленоидной и электростатической блокировки снарядов.

Проф. В.В. Базилевич и П.Я. Сальдау в 1920–1923 гг. предложили для измерения давления пороховых газов применить эффект изменения сопротивления проводников электрическому току при объемном сжатии, растяжении или кручении. Их идеи в этом вопросе послужили толчком для развития тензометрического метода измерения давления в орудиях.

В 1924 г. профессор М.Е. Серебряков вводит в практику измерений давлений изобретенный им конический крешер, который в отличие от цилиндрического крешера позволял записывать полную кривую давления пороховых газов в манометрической бомбе. На основе манометрических опытов с использованием конического

крешера проф. Серебряков в 1924–1937 гг. разработал новый метод баллистического анализа порохов.

Приведенный неполный перечень работ показывает, насколько разносторонней была деятельность КОСАРТОП. Эта комиссия сыграла большую роль в создании советской школы баллистики, а ее работы во многом способствовали техническому совершенствованию советской артиллерии. Деятельность КОСАРТОП прекратилась в 1926 г.

К этому времени наша страна вступила на путь социалистических преобразований в экономике. В результате дальнейшего успешного осуществления индустриализации советское государство получило возможность оснастить свои вооруженные силы, в том числе и артиллерию, новейшей боевой техникой.

Во внешней баллистике большое внимание уделяется исследованию вопросов связанных с движением в воздухе снарядов, мин и пуль различных типов и форм, разработке теории вращательного движения снарядов, совершенствованию старых и созданию новых методов расчета траекторий. Во внутренней баллистике разрабатываются новые методы решения основной задачи для комбинированных зарядов, для минометов и для различных видов орудий специальных схем устройства. Получает завершение разработка физического закона горения пороха и практическое применение его для решения задач внутренней баллистики. Широко внедряются в практику способы решения задач внутренней и внешней баллистики методами численного интегрирования и при помощи специальных таблиц. Создаются основы новых теорий баллистического проектирования орудий, снарядов и зарядов.

Как и в прошлом, баллистика в этот период развития стояла на высоком теоретическом уровне. Этот успех явился результатом упорной и плодотворной работы большого коллектива ученых и инженеров.

Ведущую роль в этом коллективе занимают, крупные ученые-баллистики нашей страны Н.Ф.Дроздов, И.П.Граве, М.Е.Серебряков и другие советские ученые.

Научные достижения и большой практический опыт советских ученых нашли отражение в обширной научной и учебной литературе по баллистике. Фундаментальным трудом является курс внутренней баллистики, написанный И.П. Граве в 1932–1937 гг. По разнообразию освещаемых вопросов, по научной глубине и полноте

этот курс не знает себе равных; его по праву называют энциклопедией внутренней баллистики.

В этот же период Артиллерийской академией был издан курс экспериментальной баллистики, в котором наиболее полно были описаны приборы и методы измерения скоростей снарядов.

Большую известность в нашей стране получают капитальные труды: курс внешней баллистики Д.А. Вентцеля и Я.М. Шапино и курс внутренней баллистики М.Е. Серебрякова, К.К. Гретен, Г.В. Оппокова. Эти курсы являлись основными при подготовке инженеров-артиллеристов и инженеров военной промышленности.

Великая Отечественная война, имевшая выраженный характер «машинной войны», поставила перед артиллерией ряд новых важных проблем. Из них особое значение приобрела проблема всемерного повышения мощности артиллерийских орудий, что необходимо для успешной борьбы с возрастающими по мощности инженерно-полевыми укреплениями, танками и авиацией.

Приведенные краткие сведения из истории развития баллистики свидетельствуют о большой роли экспериментальных исследований в решении задач как внутренней баллистики, так и внешней.

Особенно богат экспериментальными исследованиями советский период развития баллистики. За этот период создан ряд лабораторий, занимающихся опытным изучением явления выстрела. Старейшей из них является баллистическая лаборатория Артиллерийской академии, созданная в 1926 г. по инициативе И.П. Граве. Эта лаборатория является одной из крупнейших в нашей стране и имеет большое значение в научной и учебной работе.

В области экспериментальных исследований находят широкое применение разнообразные баллистические приборы: хронографы для измерения скорости снарядов, индикаторы для измерения давления пороховых газов, манометрические бомбы для изучения горения пороха, баллистические стволы для изучения явления выстрела и многие другие измерительные устройства.

Советские ученые и инженеры создали ряд новейших приборов и установок для опытного изучения сложных вопросов баллистики. К числу их относятся пьезоэлектрические и тензометрические индикаторы давлений, электронные хронографы, установки для мгновенного и скоростного фотографирования, а также рентгенографирования отдельных процессов явления выстрела. Созданы специальные аэродинамические установки для определения сил,

действующих на снаряд, методом продувки. Разработаны различные виды приборов для записи элементов движения ствола при откате.

Разнообразие приборов, применяемых в баллистике, объясняется разнохарактерностью процессов выстрела, различием задач экспериментальных исследований, большим разнообразием условий опытов и различием требований, предъявляемых к окончательным результатам измерений. Очевидно, систематическое изучение приборов и методов экспериментальной баллистики и творческое использование накопленного опыта являются необходимым условием успешного решения задач, стоящих перед баллистикой в настоящее время.

Одной из важнейших задач экспериментальной баллистики является разработка на уровне современной техники еще более совершенной баллистической аппаратуры и широкое внедрение ее в практику баллистических исследований.

ГЛАВА I

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ПОРОХОВЫХ ГАЗОВ

1.1 Общие сведения

1.1.1 Значение измерения давления в баллистике

Давление, температура и удельный объем являются основными параметрами, определяющими состояние и внутреннюю энергию пороховых газов при выстреле и характеризующими работу порохового заряда в орудии.

Параметры состояния пороховых газов служат также характеристиками многих процессов явления выстрела. Поэтому измерение этих величин представляет большой интерес для изучения процессов, происходящих в канале ствола орудия при выстреле.

Опыт показывает, что из трех параметров состояния пороховых газов сравнительно легко можно измерить лишь давление. Остальные параметры состояния пороховых газов, а также ряд параметров большинства процессов выстрела, не поддающихся непосредственному измерению, приходится определять косвенным путем, в первую очередь по результатам измерения давления пороховых газов. Для этого обычно используют различные установленные на основании теоретического и экспериментального исследования законы и соотношения, связывающие искомые величины с давлением пороховых газов.

Одним из таких законов является, например, уравнение движения снаряда; оно позволяет по измеренным величинам давления в канале ствола и известной массе снаряда определить ускорения, а также скорости и пути снаряда в различные моменты движения снаряда в канале ствола. Равным образом измерение давления воздуха на снаряд при продувках его в аэродинамических трубах дает возможность судить о силе сопротивления воздуха движению снаряда и об изменении элементов движения снаряда в различных условиях стрельбы.

Измерение давления пороховых газов и определение характера его изменения во времени имеет большое значение для изучения горения пороха. По опытным кривым давления производится бал-

листический анализ порохов, т. е. определяются баллистические характеристики каждого пороха: сила пороха, коволюм, полный импульс давления пороховых газов и коэффициент скорости горения пороха. На основании кривых давления в функции времени устанавливается закон горения пороха, выявляется влияние различных факторов на горение пороха и дается качественная и количественная оценка влияния этих факторов при выстреле.

Результаты измерения давления в орудиях позволяют определять влияние отдельных условий заряжания орудия на характер действия пороховых газов в канале ствола, в дульных тормозах и в газоотводных устройствах. Эти же результаты дают возможность установить степень приближения ряда теоретических решений баллистики к действительным данным, получаемым на опыте.

Большое практическое значение имеет измерение величины наибольшего давления пороховых газов в канале ствола.

По результатам измерений наибольшего давления судят о прочности стволов, лафетов, о правильности действия механизмов орудия и взрывателей. При полигонных исследованиях величины наибольшего давления служат основанием для правильного подбора и устройства зарядов к орудиям. Наконец, наибольшее давление пороховых газов является одним из основных критериев при оценке баллистических свойств артиллерийских систем, пороховых зарядов и снарядов при контрольных и приемных испытаниях их на полигонах и заводах.

Все это указывает на большое научное и практическое значение измерений давления в баллистических исследованиях. Поэтому измерение давления является одним из основных видов измерений, применяемых в экспериментальной баллистике.

1.1.2. Основные методы измерения давления

Давление есть сила, отнесенная к единице площади поверхности, на которую действуют пороховые газы. Поэтому измерение давления основывается на тех же принципах, что и измерение сил.

Согласно представлениям механики одна и та же сила может проявить себя двояко: *статически*, когда она действует на неподвижное тело и вызывает со стороны этого тела равную себе силу противодействия, и *динамически*, когда она выводит тело из состояния покоя или изменяет его движение. В обоих этих случаях результаты действия силы характеризуют величину силы и изменение ее во времени.

Мерой силы в статическом проявлении являются *деформации*, возникающие в теле и обуславливающие появление со стороны тела силы противодействия. Величина действующей на тело силы определяется с помощью известных зависимостей, связывающих деформацию с силой противодействия, т. е. с силой сопротивления тела деформированию. Кроме величин деформации, мерами силы могут служить также величины изменения характеристик оптических, электрических и других физических свойств деформируемого тела, связанные с деформациями определенными зависимостями.

Мерой силы в динамическом проявлении являются *ускорения*, сообщаемые телу этой силой. Согласно основному закону динамики сила, действующая на тело, определяется как произведение известной массы тела на ускорение. Для оценки силы могут быть также использованы опытные кривые пути и скорости тела в функции времени. В этом случае ускорение, определяющее величину силы, действующей на тело, находится двукратным дифференцированием по времени зависимости для пути или однократным дифференцированием зависимости для скорости.

В соответствии с двумя принципами измерения сил все известные методы измерения давления можно разделить на две группы: *статические* и *динамические* методы.

Статические методы измерения давления основываются на принципе преобразования величин давления в величины деформации или другие связанные с ней физические величины.

Динамические методы измерения давления основываются на принципе преобразования величин давления в кинематические элементы движения: ускорение, скорость или путь в функции времени.

Статические и динамические методы измерения давления разделяются на *механические* и *электрические*. В механических методах мерами давления являются *механические величины*: деформации, путь скорость и ускорение, непосредственно измеренные или записанные в процессе действия давления. В электрических методах механические величины, представляющие измеряемые давления, подвергаются дальнейшему преобразованию в *электрические величины*, по которым затем определяется давление.

Статические методы составляют наиболее развитую и многочисленную группу методов измерения давления. Но в экспериментальной баллистике получили широкое распространение лишь немногие из них. Этими методами являются: *метод пластических деформаций*, *метод упругих деформаций*, *пьезоэлектрический*, *тензометри-*

ческий и некоторые другие. Первые два метода относятся к механическим, а остальные – к электрическим методам.

Метод пластических деформаций основан на использовании в качестве меры давления деформаций, возникающих в пластических телах под действием давления.

Метод упругих деформаций заключается в определении давления по величине деформаций, вызываемых давлением в упругих телах.

Пьезоэлектрический метод основывается на использовании в качестве меры давления электрических зарядов, возникающих на поверхности некоторых кристаллических веществ, поляризующихся при деформировании в определенном направлении.

Тензометрический метод основан на свойстве проводников изменять свое омическое сопротивление электрическому току при упругом растяжении или сжатии. Величина давления определяется по показателям изменения режима электрической цепи, в которой находится проводник.

Индуктивный метод основан на изменении сопротивления магнитной цепи с воздушным промежутком.

Магнитострикционный метод основан на изменении магнитной проницаемости тел при их деформации.

Емкостный метод основан на изменении емкости конденсатора при изменении расстояния между пластинами под действием давления.

Первые два из всех перечисленных методов будут механическими, а все остальные электрическими.

Следует отметить, что электрические методы по существу являются разновидностями метода упругих деформаций, так как в основе их также лежат упругие деформации, которые для удобства измерения преобразовываются в этих методах в электрические величины.

Метод пластических деформаций отличается от остальных тем, что деформации, на которых он основывается, являются необратимыми, т. е. не исчезают после удаления сил, под действием которых они возникли. Вследствие этого при помощи метода пластических деформаций можно регистрировать только возрастающие давления, в то время как метод упругих деформаций и его разновидности позволяют записывать возрастающие и убывающие давления.

Кроме того, между методом пластических деформаций и методом упругих деформаций существует принципиальное отличие, причина которого – в различной физической сущности пластических и упругих деформаций. Упругие деформации пропорциональны силам,

которыми они вызываются, и практически не зависят от характера изменения этих сил. Пластические деформации не обладают таким свойством; они зависят не только от величины, но и от быстроты изменения сил, в результате действия которых возникают эти деформации. Зависимость пластических деформаций от быстроты изменения сил известна недостаточно точно. Поэтому методу измерения давления, основанному на использовании пластических деформаций, свойственны большие ошибки. Величины этих ошибок зависят от условий измерений и не могут быть учтены, если заранее неизвестен характер изменения измеряемых сил или давлений.

Динамические методы измерения давления в зависимости от рода измеряемой характеристики движения разделяются на три вида: *одометрические, велосимметрические и акселерометрические.*

В первой группе методов регистрируется кривая пути в функции времени, во второй – кривая скорости и в третьей – кривая ускорения тела, движущегося под действием силы давления пороховых газов. По каждой из этих опытных кривых могут быть найдены величины ускорения и, следовательно, определены давления в различные моменты движения снаряда или ствола.

Динамические методы менее точны, более громоздки в конструктивном отношении и не так обстоятельно разработаны, как статические. Поэтому они сравнительно редко применяются в баллистических исследованиях для измерения давления. Относительно большее применение динамические методы находили в XIX веке, когда статические методы были еще недостаточно разработаны. В настоящее время динамические методы применяются главным образом при изучении отката ствола и действия автоматики оружия при выстреле. В этой области экспериментальных исследований явления выстрела все названные виды динамических методов, несмотря на различие между ними, часто не совсем верно называют велосимметрическими методами.

1.1.3 Элементы приборов для измерения давления

Технически статические методы измерения давления осуществляются при помощи ряда приспособлений и устройств, которые в совокупности образуют тот или иной тип прибора для измерения давления. Приборы для измерения давления общепринято называть индикаторами давления.

При экспериментальных исследованиях баллистических явлений обычно приходится не только измерять величины давления, но и

устанавливать характер изменения давления во времени. Поэтому индикаторы давления, применяемые в баллистике, как правило, являются приборами, автоматически записывающими изменение давления в виде кривых, ординаты которых изображают величины давления, а абсциссы – время изменения давления.

Важнейшим органом индикаторов давления является чувствительный элемент. Под этим названием понимают различные тела, изменение физических свойств которых под действием давления используется для определения величины и характера изменения давления. В механических методах измерения давления чувствительный элемент часто называют измерителем или приемником давления.

В электрических методах чувствительный элемент упрощенно называется датчиком давления или другой физической величины, например, ускорения, скорости или перемещения.

В основе схем устройства различных типов индикаторов давления лежат следующие три элемента: манометр, передаточная система и регистрирующее устройство. Эти элементы определяют тип каждого индикатора, его технические возможности и точность.

Основные элементы индикаторов давления разных типов различаются между собой принципом действия, устройством и конструктивным оформлением. Эти стороны элементов индикатора будут освещены несколько позже. Здесь же рассмотрим в общих чертах те функции, которые выполняет каждый элемент индикатора в процессе регистрации давления.

Манометр – воспринимает и преобразовывает величины давления в другие, механические или электрические величины, позволяющие тем или иным способом оценить давление и установить характер его изменения. Основной частью манометра является измеритель, который собственно и осуществляет преобразование давления в другие величины. Манометр непосредственно устанавливается на объекте, в котором измеряется давление

Передаточная система – производит дальнейшее преобразование показаний манометра в величины, удобные для регистрации и оценки давления, действующего на манометр. В качестве передаточных систем применяются разнообразные устройства, например, рычажные механизмы, оптические приспособления, электронные усилители и др. Передаточные системы представляют показания манометра в увеличенном виде и тем самым повышают чувствительность индикатора, т. е. его способность показывать значения малых изменений давления. Второе назначение передаточных систем состоит в

создании условий, обеспечивающих запись увеличенных показаний манометра.

Регистрирующее устройство – осуществляет запись изменения во времени величин, получаемых в результате преобразований, производимых передаточной системой. В зависимости от вида передаточной системы запись может производиться механическим или фотографическим способом. В случае регистрирующих устройств в виде электронно-лучевых осциллографов с электрической разверткой во времени фотографическая запись производится на неподвижной пленке.

В совокупности рассмотренные элементы индикатора воспроизводят измеряемое давление в виде кривой, изображающей в некотором масштабе изменение давления в функции времени. Такие кривые называют диаграммами или осциллограммами давления.

При создании индикаторов давления основные его элементы рассчитывают так, чтобы обеспечивалась линейная зависимость между величинами давления, действующего на манометр, и ординатами кривой, записанной регистрирующим устройством. При этом добиваются получения прямой пропорциональности между абсциссами кривой и временем. Выполнение этих условий значительно упрощает определение значений давления и установления характера его изменения по измеренным координатам осциллограммы давления.

Кроме основных элементов, в состав индикаторов входит ряд устройств, обеспечивающих процесс записи давления и определение величин давления. Такими устройствами являются источники энергии, питающие элементы индикатора, синхронизирующие приспособления, согласовывающие во времени действие индикатора с регистрируемым процессом изменения давления, и таражные устройства – для периодической градуировки индикаторов.

Таким образом, в общем виде структурная схема индикаторов давления может быть представлена так, как показано на фиг 1.

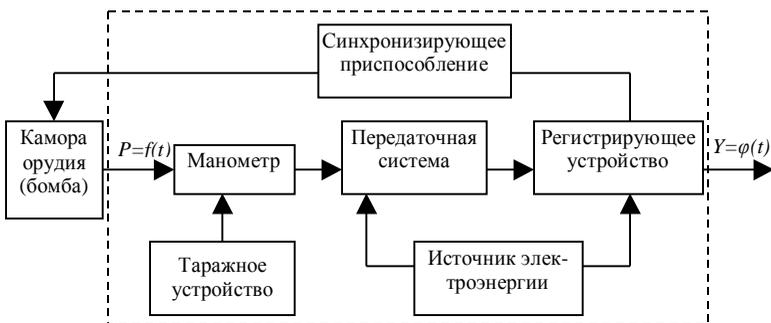
Этой схемой охватываются лишь основные функции, выполняемые в процессе измерения. В действительности схема индикаторов гораздо сложнее. Она может содержать различные вспомогательные приспособления и устройства, функции которых определяются поставленной задачей при измерении.

Например, при измерении давления пороховых газов в канале ствола может быть поставлено требование произвести на кривой давления отметки, отвечающие моменту полного врезания пояска

снаряда в нарезы, моменту открытия газоотводных устройств, моменту вылета снаряда из канала ствола и др.

В индикаторах могут быть элементы, производящие электрическое дифференцирование и интегрирование кривой давления. Иногда в структурную схему вводятся дополнительные приспособления, дающие возможность использовать индикаторы для измерения сил, ускорений, деформации, вибраций и других механических процессов, возникающих в различных звеньях оружия при выстреле.

Подобные индикаторы являются универсальными установками, причем главным образом лабораторного типа. При помощи таких индикаторов можно производить комплексные измерения, что особенно важно при научно-исследовательских работах, связанных с обширными экспериментальными исследованиями.



Фиг.1.

В исследованиях контрольно-испытательного характера употребляются более простые индикаторы, не требующие специальных условий для их работы.

1.1.4. Понятие о тарировании индикаторов

Выше отмечалось, что в каждом индикаторе величина давления, действующего на манометр, преобразовывается в другую величину, удобную для регистрации и измерения.

Преобразование заключается в последовательном переходе через ряд промежуточных величин, связывающих давление с конечной величиной преобразования. Процесс преобразования не является строго однообразным. Причиной этого является зависимость действия индикатора от многих внешних и внутренних факторов,

например, от изменений температуры, влажности воздуха, от изменения параметров и режима работы элементов индикатора со временем и др.

Поэтому индикаторам давления свойственно некоторое непостоянство показаний при измерении одинаковых величин давления. Это непостоянство тем больше, чем длиннее цепь преобразований, производимых с величиной давления.

Непостоянство показаний в меньшей мере проявляется у механических индикаторов, т. е. у которых не содержатся электрические преобразовательные элементы. Большим непостоянством показаний обладают электрические индикаторы, так как на их работу оказывают существенное влияние различные внешние помехи электрического и магнитного характера, а также нестабильность источников энергии, изменение параметров электрических цепей и др. Вследствие этого индикаторы давления, как правило, не имеют постоянных шкал, выраженных в единицах давления. Для индикаторов обычно строятся временные градуировочные кривые, называемые часто *таражными* кривыми.

Таражные кривые выражают зависимость между показаниями индикатора и величинами давления. Эта зависимость устанавливается при помощи таражных устройств, которые могут воспроизводить силы и давления с достаточно высокой степенью точности. Операция, при помощи которой показаниям индикатора придаются значения, выраженные в единицах давления, называется *тарированием*.

Тарирование индикаторов может производиться статическими, медленно изменяющимися силами или динамическими, быстро изменяющимися силами, близкими по характеру изменения к измеряемому давлению. *Статическое тарирование* имеет преимущественное применение, так как в этом случае силы, при помощи которых производится тарирование, могут относительно легко задаваться с большой степенью точности. Для этой цели обычно применяют в качестве таражных устройств различные прессы и динамометры.

Динамическое тарирование можно производить падающим грузом, силой быстро разжимающейся пружины или силой быстро изменяющейся упругости газа. Этот способ тарирования не обеспечивает достаточной точности задания тарировочных сил и потому применяется сравнительно редко.

Таражные кривые дают количественную характеристику показаний индикатора только на ограниченный период времени. Поэтому индикаторы в процессе эксплуатации часто подвергаются тарирова-

нию. При этом периодически проверяются сами таражные устройства специальными контрольными приборами. Этой операцией устанавливается правильность показаний и точность таражных устройств.

От точности таражных устройств и точности проведения тарирования в значительной степени зависит точность результатов измерения. Ошибки, допущенные при тарировании, полностью переносятся на результаты измерений. Поэтому вопросу тарирования индикаторов в процессе их эксплуатации уделяется большое внимание.

1.2. Метод пластических деформаций

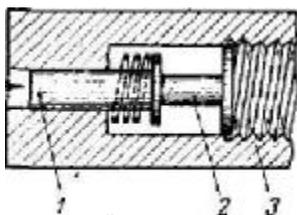
1.2.1. Сущность метода

Метод остаточных или пластических деформаций основан на использовании остаточной деформации какого-либо тела в качестве меры величины давления пороховых газов.

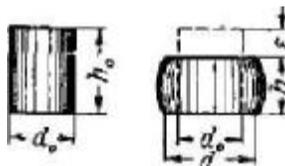
В настоящее время в качестве такого метода в артиллерийской практике имеет широкое распространение крешерный метод.

Крешерный метод основан на определении величины давления по величине остаточной деформации медного цилиндрического или цилиндро-конического столбика – крешера, которую он получает под воздействием измеряемого давления.

Для передачи давления пороховых газов на крешер последний помещают в крешерный прибор, принципиальная схема которого приведена на фиг. 2.



Фиг.2.



Фиг.3.

Давление p пороховых газов через поршень 1 передается на крешер 2, зажатый между головкой поршня и неподвижной упорной пробкой 3. Под действием силы sp (s – площадь поперечного сечения поршня) крешер деформируется в осевом и поперечном направлениях, как это показано на фиг. 3.

О величине действовавшего на крешер давления судят по величине осевой остаточной деформации $e = h_0 - h$, а деформацию крешера в поперечном направлении непосредственно не учитывают. Для перехода от деформации к давлению обычно пользуются так называемой таражной таблицей, которая представляет собой выраженную в числах зависимость между величинами деформации крешера и нагрузками или давлениями, получаемую, как правило, путем статического тарирования крешеров. Таражная таблица или кривая является в сущности характеристикой сопротивления деформации крешерного столбика.

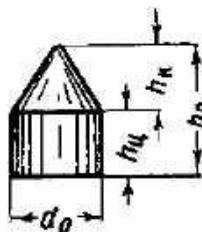
1.2.2. Крешеры и крешерные приборы

Для измерения максимальных давлений пороховых газов в пределах 50–400 МПа применяются цилиндрические крешеры следующих размеров: 15x10; 13x8; 9,8x6; 8,1x5; 6,5x4; 4,9x3, где первое число означает высоту крешера в мм, а второе – диаметр крешера в мм.

Разнообразия в размерах крешеров объясняется тем, что каждый размер крешера дает наиболее надежные результаты в пределах среднего участка своей таражной характеристики, близкого к прямой линии. Поэтому в зависимости от величины измеряемого давления и сечения и веса поршня крешерного прибора необходимо применять крешерные столбики соответствующих размеров.

Для измерения максимальных давлений пороховых газов при выстреле в пределах 50–150 МПа (например, в минометах), а также при баллистическом анализе порохов при помощи опытов в манометрической бомбе, когда необходимо получить полную запись кривой нарастания давления, применяются конические крешеры.

Конический крешер (фиг. 4) был разработан и введен в практику в 1923–24 гг. проф. М.Е. Серебряковым. Имея малое сопротивление при малых давлениях, конический крешер начинает деформироваться с усилия в 5–7 кг; по мере увеличения сжатия сопротивление его возрастает, приближаясь к сопротивлению цилиндрического крешера. Конические крешеры изготавливаются с размерами 13x8; 9,8x6 и 8,1x5 путем обточки на конус цилиндрических крешеров соответствующих размеров.



Фиг. 4.

Одно из основных требований к крешерам заключается в однородности механических свойств всех крешеров данной партии. Поэтому крешеры изготавливаются из химически чистой электролитической меди. Медь вытягивается в проволоку определенного диаметра, которая затем режется на прутки, являющиеся заготовками при изготовлении крешеров. Разброс в размерах крешеров при изготовлении допускается по высоте не более $\pm 0,01$ мм и по диаметру не более $\pm 0,02$ мм. Изготовленные крешерные столбики подвергаются отжигу по утвержденному технологическому процессу.

После изготовления каждая партия крешеров согласно техническим условиям подвергается ряду испытаний.

Основные из этих испытаний сводятся к проверке однородности, жесткости и поверхностной прочности крешерных столбиков при обжатии их на прессе. Однородность партии крешерных столбиков проверяется обжатием некоторого числа крешеров на прессе определенными для каждого размера крешеров нагрузками, причем при каждой нагрузке обжимается 10 крешеров. При этом наибольшее отклонение высот отдельных крешерных столбиков от средней высоты для 10 крешеров, обжатых одной и той же нагрузкой, не должно превышать определенного для каждого размера крешеров предела (от $\pm 0,3$ до $\pm 0,7$ мм).

Жесткость крешерных столбиков определяется при помощи обжатия 10 столбиков на прессе установленными для каждого размера крешеров нагрузками. При этом средняя высота обжатых крешерных столбиков не должна выходить из пределов, указанных в технических условиях.

Поверхностная прочность крешерных столбиков при обжатии характеризуется внешним видом 10 столбиков, обжатых на прессе предусмотренным ТУ для каждого размера крешера грузом (от 560 кг для крешеров 4,9x3 до 4000 кг для крешеров 15x10). На боковой поверхности обжатых крешерных столбиков не должно быть трещин, наплывов, сборок и прочих дефектов.

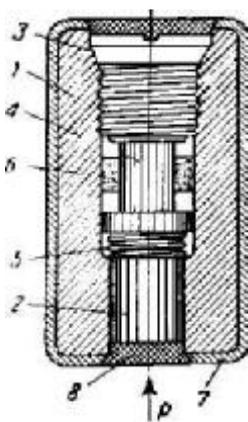
Для принятой партии крешеров составляется таражная таблица, и крешеры, упакованные в специальную тару, рассылаются потребителям.

Применяемые в артиллерийской практике крешерные приборы разделяются на вкладные и винтные.

Вкладные крешерные приборы применяются для измерения наибольшего давления в орудиях и минометах различных калибров, имеющих достаточно большой объем камеры по сравнению с объемом крешерного прибора.

Существующие вкладные крешерные приборы по схеме устройства одинаковы и различаются лишь внешним объемом и размерами поршней (табл.1).

Вкладной крешерный прибор (фиг. 5) состоит из цилиндрического стального корпуса 1 имеющего канал для поршня 2, гнездо с винтовой нарезкой для крышки 3 и полость для помещения крешера 4, зажимаемого между головкой поршня и крышкой прибора. На поршень надета спиральная пружина 5, которая поджимает поршень к крешеру. На крешер надевается резиновое центрирующее кольцо 6.



Фиг. 5.

Для предохранения нарезов канала ствола от повреждений при возможном движении крешерного прибора по каналу во время выстрела на корпус крешерных приборов объемом 16 и 35 см³ надевается рубашка 7 из красной меди. Для устранения возможности прорыва пороховых газов внутрь крешерного прибора поршень делается несколько короче канала, и свободная часть канала заполняется мастикой 8 из смеси пушечного сала и воска. С этой же целью крышка крешерного прибора при сборке утапливается ниже уровня корпуса, и наружная площадка крышки по круговой линии соприкосновения ее с корпусом также обмазывается мастикой.

Винтовые крешерные приборы применяются для определения давления пороховых газов в стрелковом оружии, в орудиях малого калибра (обычно меньше 37 мм калибра), в минометах до 120 мм калибра включительно и в специальных орудиях, предназначенных для исследовательских целей. Принцип устройства и действия винтовых крешерных приборов ничем не отличается от принципа устройства и действия вкладных крешерных приборов. Однако в зависимости от назначения винтовые крешерные приборы отлича-

Таблица 1

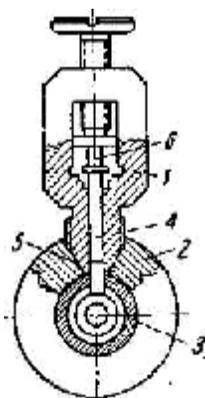
Объем крешерного прибора в см ³	Площадь сечения поршня в см ²	Диаметр поршня в мм
35	1	11,28
16	0,5	7,98
4	0,2	5,046

ются по конструктивному оформлению как от вкладных крешерных приборов, так и между собой.

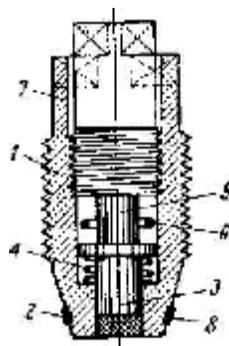
Для определения наибольшего давления пороховых газов в винтовке и других образцах стрелкового оружия применяется так называемый ружейный крешерный прибор (фиг. 6).

Винтовой крешерный прибор для винтовки состоит из корпуса 1 с навинтованным отростком, который ввинчивается в хомутик 2, надетый на ствол 5 винтовки. В канале корпуса, просверленном по оси симметрии в навинтованном отростке, находится поршень 4. Продолжением канала корпуса прибора является сквозное отверстие в стволе винтовки. Для предохранения от прорыва пороховых газов по резьбе навинтованный отросток корпуса прибора заканчивается шлифованным конусом 3, который плотно входит в коническую часть канала хомутика.

Для предохранения от прорыва пороховых газов по поршню свободное пространство поршневого канала заполняется мастикой.



Фиг. 6



Фиг. 7

Крешер 6 зажимается между головкой поршня и опорного винта.

Таким образом, для измерения давления пороховых газов в стрелковом оружии приходится применять специально приспособленные образцы, которые в результате рассверливания ствола переходят из разряда боевого оружия в разряд баллистического оружия.

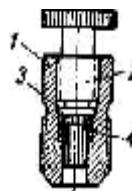
Для определения давления пороховых газов в винтовке в зависимости от пути пули по каналу ствола в различных сечениях канала ствола могут быть установлены несколько крешерных приборов.

Для измерения максимального давления в орудиях малого калибра или давления пороховых газов в различных сечениях оружейного ствола применяются так называемые боковые крешерные приборы, представляющие собой разновидность винтных крешерных приборов.

Боковой крешерный прибор приведен на фиг. 7. Все части прибора смонтированы в корпусе 1, который ввинчивается в гнездо в стенке ствола настолько, чтобы имеющееся на его конце медное обтюрирующее кольцо 2 плотно прилегало к поверхности конусной части гнезда. В нижний канал корпуса вставлен поршень 3 с пружиной 4. На поршень ставится крешер 5 с центрирующим резиновым кольцом 6. После этого в корпус ввинчивается винт 7 до упора и крешерный столбик. Свободное пространство 8 поршневого канала заполняется мастикой.

Для определения давления пороховых газов при стрельбе из минометов обычно употребляются винтные крешерные приборы, устанавливаемые в приспособленных для этой цели казенниках. Устройство этих приборов аналогично устройству описанных выше боковых крешерных приборов.

Схема винтного крешерного прибора для минометов и схема расположения его в казеннике миномета показаны на фиг.8 и 9. Винтный крешерный прибор для минометов (фиг.8) состоит из корпуса 1, упорной пробки 2, поршня 3 и пружины 4. Крешерный прибор ввертывается в казенник миномета так, как показано на фиг. 9, где 1—казенник, 2—переходная втулка, 3—упорная пробка, 4—обтюрирующее кольцо.



Фиг.8.

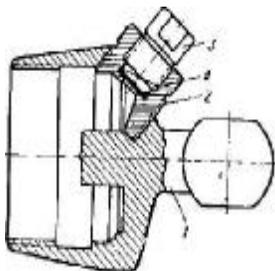
Иногда в орудиях с картузным заряданием, а также с исследовательскими целями в других орудиях применяются винтные затворные крешерные приборы.

Затворный крешерный прибор, с помощью которого можно определить давление пороховых газов на дно камеры, изображен на фиг. 10.

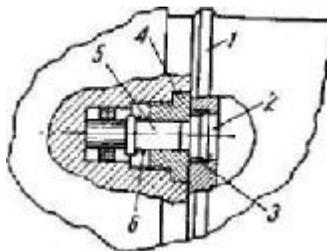
Для прохода пороховых газов к поршню прибора в дне гильзы 1 сделан канал 2.

Чтобы не было прорыва газов наружу, в особом гнезде канала 2 расположено медное обтюрирующее кольцо 3. Крешерный прибор сделан в гнезде поршня (клина) затвора и в это гнездо ввинчивается втулка 4. Во втулку вставлен поршень 5 с головкой, под ко-

торой имеется спиральная пружина б, подающая поршень внутрь гнезда. Крешер с центрирующим резиновым кольцом помещается между дном гнезда и головкой поршня. Выходное отверстие втулки 4 замазывается мастикой.



Фиг.9.



Фиг.10.

Обычно в переднем срезе поршня или клина затвора помещаются, два крешерных прибора, расположенных на одном горизонтальном диаметре. В случае стрельбы без определения давления в гнезда для крешерных приборов ввинчиваются стальные пробки.

1.2.3. Понятие о теории действия крешерного прибора

При измерении давления пороховых газов при помощи крешеров для перехода от величин сжатия крешера к давлениям используется статическая таражная таблица. В то же время известно, что нагрузка на крешер в орудии или манометрической бомбе имеет динамический характер. Необходимо поэтому выяснить, при каких условиях можно применять статическую таражную таблицу при измерении давления пороховых газов в орудии.

Для ответа на поставленные вопросы рассмотрим основные положения элементарной теории действия крешерного прибора

Уравнение движения поршня крешерного прибора можно написать в следующем виде

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = sp - R, \quad (1)$$

где m – масса поршня;
 e – деформация крешера;

$\frac{d^2 e}{dt^2}$ – ускорение поршня;

p – давление пороховых газов;

s – площадь поперечного сечения поршня;

R – сопротивление крешера.

Учитывая, что рабочий участок характеристики сопротивления цилиндрического крешера имеет практически линейный характер, в целях упрощения дальнейшего математического анализа рассматривают сопротивление крешера как линейную функцию одного только сжатия:

$$R = k_0 + ke , \quad (2)$$

где k_0 и k – константы, характеризующие чувствительность и жесткость крешера.

Тогда уравнение движения перепишется так:

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = sp - k_0 - ke .$$

Общего решения этого уравнения не существует, и при анализе условий работы крешерного прибора задачу упрощают, рассматривая только два предельных случая:

1. Сила sp прилагается настолько медленно, что ускорение можно принять равным нулю – статическое приложение силы.

2. Сила sp прилагается мгновенно, без начальной скорости – динамическое приложение силы.

В первом случае уравнение движения обращается в

$$0 = sp - k_0 - ke ,$$

или

$$sp_{cm} = k_0 - ke ,$$

откуда

$$p_{cm} = \frac{k_0 + ke}{s} = \frac{R}{s} . \quad (3)$$

Таким образом, при статическом приложении действующей силы величина ее равна сопротивлению крешера R и может быть найдена по статической таражной таблице (при $s = 1$) по величине того обжатия, которое это сила произвела.

Во втором случае уравнение движения поршня примет вид

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = sp_{dun} - k_0 - ke ,$$

или

$$\frac{m}{k} \frac{d^2 e}{dt^2} + e = \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k}.$$

Если обозначить $\frac{k}{m} = a^2$, то интеграл этого дифференциального уравнения представляется в виде суммы постоянной величины и периодической функции времени t :

$$e = \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k} + A \cos at + B \sin at. \quad (4)$$

Для определения постоянных A и B продифференцируем выражение (4) по времени t и воспользуемся начальными условиями

$$e'_t = -Aa \sin at + Ba \cos at.$$

При $t = 0$, $e = 0$ скорость поршня $\frac{de}{dt} = 0$, $\sin at = 0$, $\cos at = 1$.

Следовательно, $B = 0$; $A = -\frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k}$.

Подставив полученные значения A и B в уравнение (4), получим

$$e = \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k} - \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k} \cos at = \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k} (1 - \cos at). \quad (5)$$

Полное обжатие получится, когда правая часть этого выражения будет иметь наибольшую величину, т. е. при $\cos(at_0) = -1$ или $at_0 = p$, где t_0 – полное время обжатия крешера при динамическом приложении силы. Подставляя вместо величины a ее значение, получаем

$$t_0 = p \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (6)$$

т е полное время обжатия при динамическом действии силы зависит от массы поршня крешерного прибора и от жесткости крешера и для данного крешерного прибора и крешера является постоянным.

В этом случае

$$e = \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k} [1 - (-1)] = 2 \frac{sp_{\text{дин}} - k_0}{k},$$

откуда

$$sp_{дин} = k_0 + k \frac{e}{2} \text{ и } p_{дин} = \frac{k_0 + k \frac{e}{2}}{e} \quad (7)$$

Таким образом, если сила прикладывается динамически, то ее величина может быть найдена по статической таражной таблице по величине половинного обжатия $\frac{e}{2}$, произведенного этой силой.

В действительности при измерении давления пороховых газов в бомбе или в орудии нагрузка на крешер нарастает хотя и быстро, но не мгновенно. Действительный процесс находится где-то между двумя рассмотренными крайними случаями. Многочисленными изысканиями ряда ученых и, в частности, работами русского баллистика А.Ф. Бринка и академика А.Н. Крылова установлен признак, позволяющий отнести данный процесс к тому или иному случаю приложения нагрузки.

Полное время обжатия при динамическом действии силы выражается зависимостью (6), а при опыте обозначим через τ .

Тогда значение $\frac{\tau}{t_0} > 3$ соответствует случаю статического приложения силы, и в этом случае можно обычным порядком пользоваться статической таражной таблицей;

значение $\frac{\tau}{t_0} < 1,3$ соответствует случаю динамического приложения силы; в этом случае, пользуясь той же статической таблицей, нужно брать давление, отвечающее половинному сжатию.

Если $3 > \frac{\tau}{t_0} > 1,3$ то надо изменить массу поршня или взять другой размер крешера с другим коэффициентом жесткости чтобы отношение $\frac{\tau}{t_0}$ подошло под тот или другой случай.

Как показывает практика, при существующих у нас крешерных приборах и крешерах в подавляющем числе всевозможных опытов величина отношения времени действительного обжатия ко времени динамического обжатия будет $\frac{\tau}{t_0} > 3$. Это условие может не выпол-

няться лишь при испытаниях зарядов из очень тонких нитроглицериновых порохов и пористых порохов.

В этих случаях может понадобиться изменение веса поршня крешерного прибора или изменение жесткости крешера.

Для конического крешера полученные зависимости будут выглядеть несколько иначе.

По исследованиям проф. М.Е. Серебрякова кривая сопротивления конического крешера довольно близко выражается формулой

$$R = k_1 e^2. \quad (8)$$

Если подставить эту зависимость в уравнение движения поршня

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = sp - R$$

и разобрать случаи статического и динамического приложения нагрузки, то аналогично двум случаям для цилиндрических крешеров будем иметь:

а) для статического приложения нагрузки

$$sp_{cm} = k_1 e^2;$$

б) для динамического приложения нагрузки

$$sp_{dyn} = k_1 \left(\frac{e}{\sqrt{3}} \right)^2 = k_1 \frac{e^2}{3}. \quad (9)$$

Таким образом, в случае динамического характера приложения силы можно пользоваться статической таражной таблицей, входя в нее по величине $\frac{\varepsilon}{\sqrt{3}}$.

Время полного обжатия конического крешера для случая динамического приложения силы определяется уравнением

$$t'_0 = 1,854 \sqrt{\frac{m}{k_1} \cdot \frac{3}{e}}. \quad (10)$$

Отсюда по аналогии с цилиндрическими крешерами, если $t' < 1,3 t'_0$, то опытную величину обжатия нужно делить на $\sqrt{3}$ и пользоваться статической таражной таблицей.

Рассмотренная теория является неполной, а следовательно, и неточной. В настоящее время остается актуальной работа в направлении применения современных достижений общей теории пластической деформации к решению задачи о деформации крешера под дей-

ствием давления пороховых газов в целях построения более обоснованной и практически приемлемой теории крешерного прибора.

1.2.4. Тарирование крешеров

При использовании крешеров для измерения давления пороховых газов непосредственно из опыта определяется величина пластической деформации крешера по высоте как результат воздействия измеряемого давления, передаваемого на крешер через поршень крешерного прибора. Для того чтобы по величине обжатия крешера определить величину давления, необходимо установить для каждой партии крешеров таражную характеристику, т. е. зависимость между деформациями и вызывающими их усилиями.

Однако сопротивление крешера, а следовательно, и его деформация зависит не только от величины действующего на него усилия, но и от ряда других факторов.

Основными из таких факторов следует считать:

1. Закон изменения по времени действующего на крешер усилия (характер приложения нагрузки).
2. Время выдержки крешера под максимальной нагрузкой.
3. Инерция поршня крешерного прибора.
4. Температура крешера.

В настоящее время у нас статическая таражная таблица применяется при всех официальных баллистических исследованиях на полигонах, заводах и в научных учреждениях.

При статическом тарировании крешеров таражная таблица может быть составлена двумя способами:

- 1) способом параллельного обжатия крешеров;
- 2) способом последовательного обжатия крешеров.

Общим для этих способов является то, что крешеры обжимаются на прессе рядом нагрузок, возрастающих по величине через устанавливаемые интервалы. Разница состоит в том, что при методе параллельного обжатия для каждой нагрузки берется отдельная группа новых крешеров, а при методе последовательного обжатия одни и те же крешеры обжимаются последовательно всеми нагрузками. Способ последовательного обжатия применяется, как правило, только при тарировании конических крешеров, так как они изготавливаются значительно меньшими партиями, чем цилиндрические.

Величины нагрузок при тарировании крешеров различных размеров, а также интервалы их изменения устанавливаются на основе

практики применения крешеров и оговариваются техническими условиями.

Пересчет нагрузок Q кг в давления p МПа (учитывая площадь поперечного сечения поршня крешерного прибора, в котором тарированные крешеры будут применяться) производится по формуле

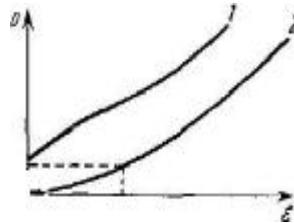
$$p = \frac{Q}{s} \text{ МПа,}$$

где s – площадь поперечного сечения поршня в см^2 .

По полученным средним значениям величин обжатия и соответствующих им давлений строится в большом масштабе таражный график или таражная кривая.

Вид таражных кривых для цилиндрических (1) и для конических (2) крешеров показан на фиг.11.

Для практического использования таражный график неудобен и поэтому его разворачивают в таражную таблицу. Для этого с таражной кривой считывают давления, отвечающие различным высотам крешера h (или различным обжатиям e), отличающимся на 0,1 мм, и записывают в специальном бланке.



Фиг.11.

Так как таражная кривая по различным причинам может быть проведена не совсем плавно, то снятые с таражного графика давления выравнивают по первым, а если нужно то по вторым разностям. После выравнивания находят давления, соответствующие изменениям высот на 0,01 мм, путем интерполяции между каждыми двумя значениями давлений, соответствующими двум высотам, отличающимся на 0,1 мм

Совокупность полученных значений p МПа заносят в таблицу, где входным числом является высота крешера h или обжатие его e .

Практическое пользование такой таражной таблицей весьма просто и удобно. Обмерив высоту крешера после опыта с точностью до сотых долей миллиметра, входят по ней в таблицу и выписывают соответствующее ей давление.

Так как величина деформации крешера зависит не только от величины нагрузки, но и от характера ее приложения, а нарастание давления в орудии носит динамический характер, пользуясь статической таражной таблицей получаем давление меньше абсолютного или истинного давления. Для практики эта относительность изме-

ренного при помощи крешера давления часто не имеет особого значения, так как во многих случаях преследуют цель только сравнения хотя и различных, но однородных величин.

Если при составлении таражной таблицы обжимать крешеры падающим грузом при помощи вертикального или маятникового копра, то обработкой полученных опытных данных можно составить «ударную» таражную таблицу. Методика составления таражной таблицы при помощи копра кратко состоит в следующем. При обжатии крешера падающим грузом непосредственно определяется работа A деформации крешера. Поэтому для нахождения сил строят кривую зависимости работы A от деформации крешера. При этом принимается, что величина обжатия крешера зависит только от величины работы сжатия и не зависит от веса груза и высоты его падения в отдельности.

Так как $dA = Rde$, где R – сопротивление крешера, то

$$R = \frac{dA}{de} \approx \frac{\Delta A}{\Delta e}.$$

Для каждого e численным дифференцированием кривой A, e можно найти соответствующую силу R и давление $p = \frac{R}{s}$,

где s – площадь поперечного сечения поршня крешерного прибора.

Имея эти данные, нетрудно составить таражную таблицу. Если сопоставить ударную и статическую таражные таблицы, то оказывается, что давление, отвечающее одному и тому же сжатию, по ударной таблице всегда больше, чем по статической и выше истинного. При этом величина расхождения колеблется в пределах 20–25% и даже больше.

Статический и динамический случаи приложения нагрузки при тарировании устанавливают границы, между которыми находится действительный закон приложения нагрузки на крешер при выстреле. Все другие попытки экспериментально определить величину расхождения данных статической таражной таблицы с абсолютными значениями измеряемых давлений не увенчались успехом.

Ряд попыток ввести поправочный коэффициент в статическую таражную таблицу путем сравнения показаний крешеров с показаниями пьезоиндикатора к каким-либо определенным результатам пока не привели, ввиду того что в зависимости от условий измерений эта поправка получалась различной по опытам отдельных исследователей.

1.2.5. Прессы для тарирования крешеров

Принципиально для тарирования крешеров пригоден пресс любой конструкции, на котором может быть установлен груз с определенной точностью и в определенных пределах. Однако для получения сравнимых результатов крешеры повсеместно должны тарироваться на прессе определенной конструкции.

Таким штатным прессом является рычажный пресс Барановского (он же пресс Испытательной комиссии Охтенского порохового завода). Этот же пресс применяется для предварительного поджатия крешеров перед опытом.

Схема устройства прессы приведена на фиг.12.

Рычаг 1 имеет на левом конце неподвижную точку опоры *A*. В точке *B* он подпирается снизу пружиной и в ненагруженном состоянии уравнивается ею.

К правому концу рычага в точке *C* подвешивается груз *q* кг, действующий в направлении, указанном стрелкой. Крешер *K* помещается на подвижную площадку, которая посредством ходового винта может перемещаться в вертикальном направлении. При перемещении площадки вверх крешер сжимается до тех пор, пока развившаяся в нем сила сопротивления *R* на плече *AB* не уравнивает груз на плече *AC*.

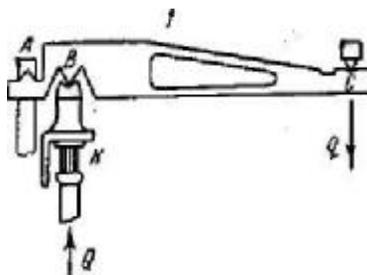
Усилие, сообщаемое крешеру *K* и приложенное в точке *B* рычага при горизонтальном его положении (положение равновесия), будет

равно $Q = \frac{AC}{AB} q$ кг. Последнее вытекает из равенства моментов сил *Q* и *q* относительно точки *A* в положении равновесия рычага.

Соотношение плеч рычага $\frac{AC}{AB}$ в описываемом прессе равно 10.

Общий вес гирь 400 кг.

Так как соотношение плеч рычага равно 10, то при полной нагрузке стержня к крешеру может быть приложена нагрузка в 4000 кг.



Фиг.12.

1.2.6. Методика применения крешеров для измерения давления

Переход от деформации крешера к давлению может быть осуществлен тремя различными способами:

- 1) непосредственно по таражной таблице;
- 2) по таражной таблице с одним предварительным обжатием крешера;
- 3) по двум предварительным обжатиям крешера.

При определении давления непосредственно по таражной таблице берут крешер определенного размера в зависимости от величины наибольшего давления и сечения поршня крешерного прибора и измеряют его начальную высоту h_0 . Крешер помещают в крешерный прибор, который в окончательно снаряженном виде вкладывают (ввинчивают) в место измерения давления, и производят выстрел.

После выстрела крешер извлекают из прибора, измеряют его оставшуюся высоту h и находят величину обжатия крешера как разность между начальной и оставшейся высотами:

$$\varepsilon = h_0 - h.$$

По величине обжатия крешера входят в таражную таблицу для данной партии крешеров и находят давление p МПа.

Отличие способа одного предварительного поджатия крешера, предложенного в 1869г. известным русским артиллеристом А.В. Гадолиным, от предыдущего способа состоит в том, что для определения давления берутся крешеры, предварительно обжатые на прессе известным грузом. Предварительное обжатие крешеров производится для того, чтобы уменьшить ошибки при измерении давления, при помощи учета механических качеств отдельных крешеров одной и той же партии и уменьшения влияния разницы в условиях приложения нагрузки при тарировании и при выстреле. Величина нагрузки для предварительного обжатия выбирается с таким расчетом, чтобы соответствующее ей давление было на 10–20 МПа менее ожидаемого при опыте для давлений менее 100 МПа и на 20–40 МПа менее ожидаемого при измерении давлений свыше 100 МПа.

Исходя из ожидаемого давления, и сечения поршня крешерного прибора выбирают размер крешера. Далее, руководствуясь указанными выше рекомендациями, назначают величину давления предварительного обжатия p_1 МПа. Учитывая площадь поршня крешерного прибора, обжимают крешеры на прессе нагрузкой $Q = sp_1$, соответствующей давлению предварительного обжатия p_1 . После обжатия на прессе измеряют высоту h_1 каждого крешера (высота

предварительного обжатия) и, войдя по ней (или по $\varepsilon_1 = h_0 - h_1$) в таражную таблицу для данной партии крешеров, находят соответствующие табличные величины давлений p_T . Эти значения давлений p_T отдельных крешеров могут совпасть с давлением предварительного обжатия p_1 но, как правило, они будут отличаться от последних, вследствие индивидуальных механических свойств каждого крешера. Разность $\Delta p = p_1 - p_T$ является поправкой, характеризующей степень отличия механических свойств данного крешера от средних свойств партии, выражаемых таражной таблицей. Предварительно обжатый крешер вставляют в крешерный прибор, последний вкладывают (или ввинчивают) в оружие и производят выстрел. После выстрела извлекают крешер, обмеряют его высоту h и по этой высоте по той же таражной таблице определяют давление p_2 . К этому давлению прибавляют поправку Δp МПа с ее знаком.

Следовательно, окончательно измеренное давление будет равно

$$p = p_2 + \Delta p \text{ МПа.}$$

Практикой установлено, что предварительно обжатые крешеры дают на 5–6% большее давление, чем необжатые.

Способ двух предварительных поджатий крешеров дает возможность при измерении давления обойтись без таражной таблицы. Существо его заключается в том, что крешер перед опытом обжимают на прессе двумя последовательными нагрузками, соответствующими двум давлениям p_1 и p_2 , отличающимся друг от друга на 10–20 МПа. При этом большее давление предварительного поджатия должно быть меньше ожидаемого при стрельбе на 10–20 МПа при измерении давления менее 100 МПа и на 20–40 МПа для давления более 100 МПа.

Каждому давлению предварительного обжатия будут соответствовать определенные высоты крешера h_1 и h_2 . Считая, что крешер работает в пределах линейного участка характеристики сопротивления, т. е. что величина обжатия крешера прямо пропорциональна нагрузке, можно написать

$$\frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2} = \frac{p - p_2}{h_2 - h},$$

где p - измеряемое давление;

h - соответствующая ему высота крешера.

$$\text{Тогда } p = p_2 + (h_2 - h) \frac{p_2 - p_1}{h_1 - h_2} = p_2 + k(h_2 - h),$$

где $k = \frac{P_2 - P_1}{h_1 - h_2}$ характеризует приращение давления, приходящееся

на 0,01 мм сжатия крешера.

Описанный метод по сравнению с предыдущим имеет то преимущество, что для определения давления этим методом не требуется таражной таблицы. В отношении точности он почти не отличается от способа таражной таблицы с одним предварительным обжатием.

Однако этот способ менее надежен, так как при помощи его правильные результаты могут быть получены лишь при условии, если сопротивление крешера является линейной функцией сжатия не только в границах давления предварительного поджатия, но и до величины измеряемого давления.

1.3. Метод упругих деформаций

1.3.1. Сущность метода

Метод упругих деформаций основывается на использовании в качестве меры давления упругих деформаций, возникающих в телах под действием приложенных к ним сил.

Принцип измерения давления методом упругих деформаций заключается в следующем. Давление, развивающееся в манометрической бомбе или орудии, действует непосредственно или через поршень на измеритель и вызывает в нем упругие деформации. Эти деформации очень малы и не могут быть с достаточной точностью измерены непосредственно.

Измерение сил и давлений при помощи упругих деформаций является наиболее распространенным методом в технике измерений. Впервые он появился в прошлом веке и применялся главным образом для измерения веса тел, давления жидкости, газа и пара. Первоначально измеритель изготовлялся в форме спиральной пружины или мембраны малой жесткости. Подобные измерители давали достаточно высокую точность при измерении статических сил и давлений. Однако при измерении быстро изменяющихся сил и давлений такие измерители вследствие возникающих больших по амплитуде собственных вибраций сильно искажали результаты измерений. По-

этому долгое время упруго-индикаторный метод не находил широкого применения при динамических измерениях.

Существенный перелом в применении метода упругих деформаций был произведен работами русского инженера А. Гагарина, который в 1904 г. изобрел упругий динамометр большой жесткости и применил для изучения прочности материалов при динамических нагрузках. Измерителем в этом динамометре была стальная трубка, деформируемая в направлении оси. Вначале запись деформаций производилась механическим путем: стальное перо, соединенное с трубкой, записывало деформации на движущейся закопченной пластинке. Позже механическая запись была заменена более совершенной – оптической. Этот вид трубчатого динамометра послужил основой для разработки многих конструкций упругих манометров для измерения давления пороховых газов.

Упругие манометры с оптической регистрацией позволяют получать полную кривую давления за время действия его на измеритель. Однако на практике часто необходимо знать лишь наибольшую величину действующего давления. Это привело к мысли создать такие упругие манометры, которые в процессе деформации автоматически фиксировали бы наибольшую деформацию, соответствующую наибольшему давлению, подобно тому как в крешерном методе это достигается при помощи остаточных деформаций медных столбиков. Оригинальное решение этой задачи впервые было предложено в 1929–30 гг. советским ученым проф. Н.Н. Давиденковым.

В разработанном проф. Давиденковым динамометре измеритель состоял из двух стальных полусфер малой кривизны, прижимавшихся друг к другу измеряемой силой. Одна из поверхностей покрывалась тонким слоем копоти. При сжатии такого измерителя изменялся диаметр круга соприкосновения двух сферических поверхностей, и вследствие этого поверхность соприкосновения освобождалась от копоти. Таким образом, на закопченной поверхности одной из сфер создавался отпечаток в виде круга, по диаметру которого определялась наибольшая величина измеряемой силы. При этом использовалась опытная таражная зависимость между диаметром отпечатка и величиной деформирующей силы.

Указанный тип упругого динамометра с авторегистрацией наибольшей величины деформации явился основой для разработки упругих динамометров для измерения максимальных давлений в орудиях.

1.3.2. Понятие о теории метода

Определение давлений по величине вызванных ими упругих деформаций измерителя имеет в своей основе достаточно точный для практических целей закон Гука, по которому деформация упругого тела пропорциональна действующей на него силе. Согласно этому закону величина деформации измерителя зависит также от формы и размеров измерителя, от способа его закрепления и от физических свойств, выражаемых модулем упругости материала измерителя.

Имеющиеся в литературе указания свидетельствуют, что модуль упругости таких материалов, как, например, сталь, очень мало изменяется с изменением характера и продолжительности действия силы. Испытаниями стальных образцов установлено, что при переходе от медленно изменяющихся статических нагрузок к быстро нарастающим динамическим нагрузкам вплоть до внезапно прикладываемых нагрузок модуль упругости стали увеличивается не более чем на 0,35%.

Таким образом, можно с большой точностью допустить, что между деформациями измерителя и силами, их вызывающими, существует однозначная связь, не зависящая от быстроты нарастания и продолжительности действия давления на измеритель.

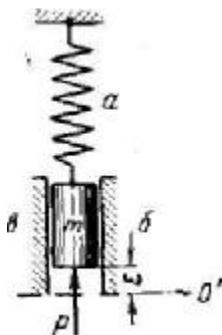
Отсюда следует, что для метода упругих деформаций применение статического тарирования при измерении давлений динамического характера вполне обоснованно.

В этом состоит принципиальное отличие и достоинство метода упругих деформаций от крешерного метода измерения давлений, в котором деформации определяются не только величиной действующей силы, но и характером ее изменения.

Второе достоинство метода упругих деформаций состоит в том, что в отличие от крешерного метода при непосредственном измерении давления и при тарировании используются одни и те же измерители (манометры), тогда как в крешерном методе измерение и тарирование производится при помощи различных измерителей (крешеров). В связи с этим упруго-индикаторный метод является более точным, чем крешерный.

Однако положительные качества метода упругих деформаций в значительной степени зависят от влияния инерции и собственных колебаний измерителя и непосредственно связанных с ним вспомогательных деталей. Поэтому для правильного воспроизведения измеряемого давления методом упругих деформаций необходимо учитывать эти факторы как при конструировании манометров, так и при применении их на практике.

Исследование этих факторов и выяснение условий рационального конструирования и применения упругих манометров наиболее полно произведено в теории упругих манометров, разработанной академиком А.Н. Крыловым в 1909–1910 гг. Приведем здесь только некоторые элементарные представления об этой теории и о вытекающих из нее практических выводах, относящихся главным образом к манометрам, у которых измерители выполнены в виде спиральной пружины большой жесткости, круглого стержня и трубки, деформируемых в направлении их продольной оси.



Фиг. 13.

Механизм большинства конструкций упругих манометров схематически можно представить в виде пружины *a* (фиг.13), выполняющей роль измерителя, и подвешенной на ней массы *m*, представляющей собой поршень манометра, находящийся в направляющих. Поршень и пружина образуют упругую систему манометра.

При работе манометра на его упругую систему действуют следующие силы:

1. *Возмущающая сила*—сила давления пороховых газов $sp=f(t)$; она вызывает отклонение поршня от начального положения равновесия и, следовательно, сжатие пружины на величину ϵ , которая служит мерой давления газов, действующего в каждый момент времени на поршень. В практике баллистических измерений сила давления является непериодической функцией времени. Эта сила действует в течение коротких промежутков времени. В орудии она сперва быстро возрастает от нуля до некоторой наибольшей величины, затем несколько медленнее убывает снова до нуля.

В манометрической бомбе сила давления после быстрого достижения максимума очень медленно убывает вследствие охлаждения пороховых газов.

2. *Восстанавливающая сила* – сила упругости пружины, которая стремится вернуть поршень в положение равновесия. Эта сила пропорциональна жесткости пружины *K* и величине её деформации ϵ , представляющей смещение поршня от начального положения равновесия.

3. *Сила сопротивления* – сила трения между поршнем и его направляющими; она направлена против движения поршня и, следовательно, тормозит это движение. Нормально сила трения в упругом

манометре является постоянной и очень малой величиной. Поэтому его часто пренебрегают.

При движении поршня под действием названных сил отдельные частицы пружины будут двигаться с различными скоростями. Частицы пружины, расположенные у поршня, будут обладать скоростью поршня, а частицы, находящиеся у опорной стенки манометра, будут неподвижны. Промежуточные частицы пружины, перемещаясь в направлении движения поршня, будут вместе с этим совершать продольные колебания, возникающие вследствие действия упругих сил в пружине. Колебания пружины передаются поршню, и вследствие этого его поступательное движение также будет сопровождаться колебаниями. Эти совместные колебания пружины и поршня являются собственными колебаниями упругой системы манометра; они зависят от устройства упругой системы и обуславливаются только упругой силой измерителя манометра.

В зависимости от частоты собственных колебаний манометра действительное движение поршня под действием измеряемого давления будет в той или иной мере искажено и, следовательно, не будет точно отражать характер изменения давления на поршень. Погрешности, возникающие в результате инерции упругой системы манометра и наложения ее собственных колебаний на поступательное движение поршня, называют инерционными погрешностями манометра.

Аналитическое выражение для инерционных погрешностей можно найти из общего решения дифференциального уравнения движения упругой системы манометра под влиянием действующих на нее сил. Однако составление такого уравнения и решение его отличаются большой сложностью вследствие колебаний не только упругой системы в целом, но и колебаний большого количества частиц массы пружины.

В технических приложениях определение инерционной погрешности часто производится приближенно при допущении, что масса пружины очень мала по сравнению с массой поршня. При таком допущении вместо движения упругой системы можно рассматривать движение одного лишь поршня манометра под действием тех же сил. Как увидим ниже, окончательный результат приближенного решения существенно не отличается от точного, учитывающего массу колеблющихся частиц пружины.

Таким образом, при условии, что масса пружины мала сравнительно с массой поршня, уравнение движения поршня под действием возмущающей и восстанавливающей сил будет

$$m \frac{d^2 e}{dt^2} = -ke + f(t). \quad (11)$$

Разделив это уравнение на m и обозначив

$$a^2 = \frac{k}{m},$$

приведем уравнение движения поршня к виду

$$\frac{d^2 e}{dt^2} + a^2 e = \frac{a^2}{k} f(t).$$

Общим интегралом этого линейного дифференциального уравнения второго порядка с постоянными коэффициентами является выражение

$$e = C_1 \cos at + C_2 \sin at + \frac{a}{k} \int_0^t f(x) \sin a(t-x) dx \quad (12)$$

где e – отклонение поршня от положения устойчивого равновесия;

t – время движения поршня в положение e .

X – переменная, изменяющаяся в пределах $0 \leq x \leq t$;

C_1 и C_2 – постоянные интегрирования.

Обычно давление начинает действовать на упругую систему манометра, находящуюся в состоянии равновесия и покоя, которое характеризуется начальными условиями:

$$t = 0; e = 0; \frac{de}{dt} = 0.$$

При $t = 0$ интеграл выражения (12) $\int_0^t f(t) \sin a(t-x) dx$

обращается в нуль, так же как и его производная, равная

$$\frac{d}{dt} \int_0^t f(x) \sin a(t-x) dx = a \int_0^t f(x) \cos a(t-x) dx .$$

Поэтому произвольные постоянные C_1 и C_2 , определяемые по начальным условиям, будут равны нулю, и тогда искомое решение уравнения (11) будет

$$e = \frac{a}{k} \int_0^t f(x) \sin a(t-x) dx .$$

Интегрируя по частям, найдем

$$e = \frac{1}{k} f(x) \cos a(t-x) \Big|_{x=0}^{x=t} - \frac{1}{k} \int_0^t f'(x) \cos a(t-x) dx ,$$

и принимая во внимание, что при $x = 0$ $f(0) = 0$, получим

$$e = \frac{1}{k} f(t) - \frac{1}{k} \int_0^t f'(x) \cos a(t-x) dx , \quad (13)$$

где $f'(x)$ – быстрота изменения давления на поршень.

Первое слагаемое этого выражения представляет собой отклонение которое получил бы поршень манометра от положения начального равновесия, если бы измеряемое давление действовало весьма медленно, статически. Это слагаемое непосредственно получается из уравнения движения поршня (11), если отбросить в нем

член, содержащий $\frac{d^2 e}{dt^2}$, т. е. если пренебречь динамическим харак-

тером действия давления. Это же слагаемое можно получить из выражения (13), если иметь в виду, что быстрота изменения статического давления равна нулю: $f'(x) = 0$.

Таким образом,

$$e_{ст} = \frac{f(t)}{k} \quad (14)$$

является статическим отклонением поршня от положения устойчивого равновесия, производимым силой $f(t) = sp$.

$$\text{Второе слагаемое } \Delta e = -\frac{1}{k} \int_0^t f'(x) \cos a(t-x) dx \quad (15)$$

выражает поправку, которую нужно прибавить к статическому отклонению, чтобы получить отклонение, соответствующее динамическому характеру действия измеряемого давления.

Как уже указывалось, в упруго-индикаторном методе окончательные результаты измерения оцениваются по данным статического тарирования упругого манометра. Следовательно, указанная поправка Δe представляет абсолютную инерционную погрешность упругого манометра.

Предельная величина этой погрешности, как показывают довольно сложные математические выводы, имеет значение

$$\Delta e_{пр} < \frac{1}{2k} t_0 f'(t_i), \quad (16)$$

где $f'(t_i)$ – наибольшее значение производной от функции $f(t)$;

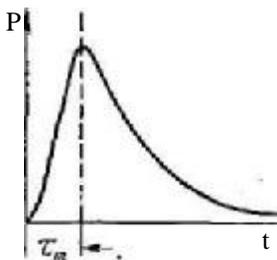
оно имеет различные знак и величину для нарастающей и для спадающей ветвей кривой давления;

t_0 – период собственных колебаний манометра.

Приведенное выражение для инерционной погрешности манометра получается в результате решения приближенного уравнения движения поршня, т. е. без учета массы пружины. Если произвести точное решение, не пренебрегая массой пружины, то выражение для инерционной погрешности будет иметь вид

$$\Delta e_{\text{пр}} < \frac{1}{k} \frac{\sqrt{2}}{p} t_0 f'(t_i) = \frac{1}{2k} \sqrt{\frac{8}{p^2}} t_0 f'(t_i). \quad (17)$$

Из сравнения этого выражения с (16) легко видеть, что они различаются между собой лишь коэффициентом $\sqrt{\frac{8}{p^2}} \approx 0.9$, что дает



Фиг.14.

расхождение в величинах предельной погрешности на 10%. Так как обычно инерционная погрешность упругих манометров не превышает 3–5% наибольшей величины измеряемого давления, то рассмотренное выше приближенное решение вполне оправдывается на практике.

В инженерных расчетах формула для определения инерционных погрешностей получает дальнейшее упрощение. Для этого заменяют наибольшее значение производной $f'(t_i)$ средним значением ее для наиболее характерного периода действия давления, а именно – для периода нарастания давления, так как этот период обычно характеризуется большими значениями производной $f'(t)$, чем период спадания (фиг.14).

Таким образом, для периода нарастания можем написать

$$f'(t_i) = \frac{f(t_m)}{t_m},$$

где t_m – время нарастания давления $p = f(t)$ до наибольшей величины

Тогда абсолютная величина инерционной погрешности будет

$$\Delta e_{\text{пр}} < \frac{1}{2k} \frac{t_0}{t_m} f(t_m).$$

Разделив это неравенство на величину статического отклонения поршня в момент максимума давления

$$(e_{ст})_m = \frac{f(t_m)}{k},$$

получим выражение для предельной относительной погрешности манометра в виде

$$d < \frac{1}{2} \frac{t_0}{t_m}. \quad (18)$$

Отсюда следует, что для получения правильных показаний упругого манометра необходимо, чтобы период собственных колебаний упругого манометра был весьма мал по сравнению с продолжительностью нарастания измеряемого давления.

При этом условии можно с большой точностью определить измеряемое давление по величине отклонения поршня манометра, т. е. по величине деформации измерителя. Инерционная погрешность в этом случае не будет превышать величину, определяемую из неравенства (18). При этом результаты измерений для периода нарастания будут давать значения давлений выше действительных.

Опыт показывает, что при условии

$$\frac{t_0}{t_m} \leq \frac{1}{5}$$

для определения предельной величины относительной погрешности манометра с точностью до 10% можно пользоваться вместо неравенства (18) приближенной формулой

$$d = (0,25 \div 0,30) \frac{t_0}{t_m}. \quad (19)$$

Так как $\frac{1}{t_0} = f_0$ – частота собственных колебаний упругого манометра, то формулу (19) можно представить так:

$$d = \frac{0,30}{f_0 t_m}. \quad (20)$$

Из этого выражения следует, что для уменьшения инерционной погрешности манометра необходимо увеличивать частоту его собственных колебаний.

Формула (20) позволяет оценить различные виды упругих манометров в отношении точности их показаний. С другой стороны, она дает возможность установить, какой должна быть собственная частота манометра, чтобы с заранее заданной точностью измерить

наибольшее давление известной продолжительности нарастания до максимума.

Например, пусть по условиям экспериментальных исследований требуется измерить наибольшее давление с продолжительностью нарастания $t_m = 0,005$ с. так, чтобы погрешность измерения не превышала 2%.

Для этого согласно формуле (20) частота собственных колебаний манометра должна быть не ниже

$$f_0 = \frac{0,30}{dt_m} = \frac{0,30}{0,02 \cdot 0,005} = 3000 \text{ Гц}.$$

Если манометром с такой частотой собственных колебаний измерять давление с продолжительностью нарастания $t_m = 0,001$ с, то наибольшая ошибка измерений будет порядка $d = 10\%$. Этот пример показывает, что частоту собственных колебаний манометра нужно выбирать, соотносясь с продолжительностью нарастания давления.

Следует считать за правило, что при измерении быстро меняющихся давлений надо применять упругие манометры с частотой собственных колебаний, обеспечивающей заданную точность измерения давления с наименьшей продолжительностью нарастания, которая только встретится в условиях данных опытов.

Частоту собственных колебаний упругого манометра можно определить теоретически по его конструктивным данным. Нужная для этого формула получается из уравнения (11), если в нем положить возмущающую силу равной нулю:

$$\frac{d^2 e}{dt^2} + a^2 e = 0.$$

Это уравнение характеризует собственные колебания упругой системы манометра, выведенной первоначально из положения равновесия, а затем предоставленной самой себе.

Опуская решение этого уравнения, дадим вытекающую из него формулу для определения периода собственных колебаний манометра

$$t_0 = 2p \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (21)$$

где m – масса поршня манометра;
 k – жесткость измерителя.

Из формулы (21) следует, что для получения большой частоты надо употреблять упругую систему с возможно большей жестко-

стью измерителя, а массу поршня делать возможно меньшей. При этом должно быть обеспечено достаточно прочное сочленение измерителя с поршнем, чтобы упругая система представляла собой жесткую конструкцию. Наличие зазоров между элементами упругой системы и опорной стенкой манометра ведет к уменьшению ее частоты и к появлению дополнительных колебаний произвольной частоты, возникающих вследствие ударного действия частей манометра друг на друга.

Формулой (21) можно пользоваться в тех случаях, когда вес измерителя мал по сравнению с весом поршня манометра. Так как в упругом манометре масса пружины обычно имеет величину, составляющую значительную часть величины массы поршня, а иногда даже превышающую ее в несколько раз, то пользование этой формулой может привести к значительным ошибкам.

В этом случае необходимо пользоваться более точной формулой, учитывающей влияние относительного веса пружины на частоту собственных колебаний упругого манометра:

$$t_0 = \frac{2pl}{b} \sqrt{\frac{r}{E}}, \quad (22)$$

или

$$f_0 = \frac{b}{2pl} \sqrt{\frac{E}{r}}, \quad (23)$$

где l – длина пружины в положение равновесия;
 r – массовая плотность материала пружины;
 E – модуль упругости материала пружины;
 b – коэффициент, зависящий от отношения массы пружины m к массе поршня m и определяемый из табл. 2.

Таблица 2

$\frac{m}{m}$	0,3	0,5	0,7	0,9	1,0	1,5	2	3	4	5
β	0,52	0,65	0,75	0,82	0,86	0,98	1,08	1,20	1,27	1,32

Частоту собственных колебаний манометра можно с большой точностью получить опытным путем. Для этого следует внезапным приложением короткого импульса внешней силы к поршню вызвать собственные колебания упругой системы манометра и записать их. Подсчитывая колебания, совершенные системой за некоторый

промежуток времени, легко установить период и частоту собственных колебаний манометра. В качестве внешнего импульса можно использовать удар о поршень стального шарика, бросаемого с некоторой высоты.

Применение этого метода особенно оправдывается в тех случаях, когда измеритель имеет сложную форму, для которой вывод зависимостей, определяющих частоту измерителя, часто представляет большие трудности.

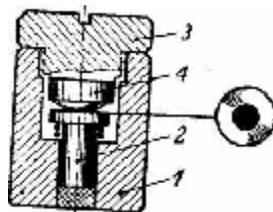
Рассмотренные выше выводы из теории упругих манометров свидетельствуют, что частота собственных колебаний манометра является важнейшей характеристикой его инерционных погрешностей. Чтобы кривая, записываемая при помощи упругого манометра, возможно точнее изображала измеряемое давление, необходимо, чтобы собственные колебания упругой системы манометра имели как можно меньший период сравнительно с продолжительностью нарастания давления. Вместе с тем манометры должны обладать высокой стабильностью собственных колебаний и упругих свойств измерительной системы и их характеристики не должны изменяться вследствие влияния температуры и других причин.

Выводы и формулы, приведенные здесь для упругого манометра, полностью применимы к пьезоэлектрическим, тензометрическим и другим манометрам, основанным на использовании в качестве меры давления различных физических явлений, связанных с упругими деформациями.

1.3.3. Саморегистрирующий упругий манометр

В последнее десятилетие работы в области упругих манометров привели к возрождению идеи устройства саморегистрирующих упругих манометров. Как уже отмечалось, впервые идея создания такого манометра была высказана и осуществлена профессором Н.Н. Давиденковым в 1929–1930 гг.

Устройство саморегистрирующего упругого манометра показано в разрезе на фиг. 15. Он немного отличается от обычного крешерного прибора. В корпусе 1 собраны поршень 2 и винтовая головная часть 3, имеющая упор 4 с торцем в форме сферического сегмента малой кривизны. Поршень и упор изготовлены из одной и той же стали и закалены в



Фиг.15.

одинаковых условиях. Плоская поверхность головки поршня и сферическая поверхность упора отшлифованы и полированы. В собранном манометре поверхности находятся в соприкосновении, которое поддерживается силой пружины, помещенной между головкой поршня и корпусом. Перед употреблением манометра торцевую поверхность поршня покрывают тонким слоем копоти или специального лака.

Под действием давления сферическая поверхность упора деформируется и приходит в соприкосновение с поверхностью поршня по площади соответствующего круга. Вследствие этого на покрытой копотью поверхности поршня остается отпечаток в виде четко ограниченного круга, величина диаметра которого соответствует максимальной силе давления на поршень. Измеряя диаметр круглого отпечатка, можно определить силу давления вычислением по теоретической формуле

$$d = 2,223 \sqrt{\frac{R}{E} F}, \quad (24)$$

где d – диаметр отпечатка в см;

E – модуль упругости материала поршня и упора в кг/см²;

R – радиус кривизны сферической поверхности упора в см,

$F = sp$ – сила давления на поршень манометра в кг;

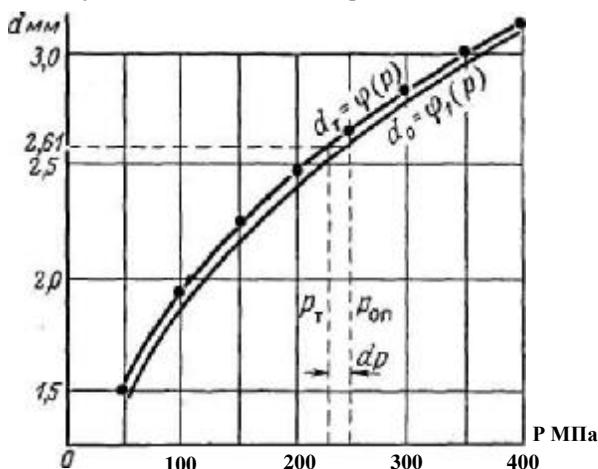
P – давление на поршень в МПа,

s – площадь сечения поршня в см².

Опытным путем было установлено, что это соотношение хорошо соблюдается не только для статических нагрузок, для которых оно было выведено Гертцем, но и для динамических, если продолжительность приложения нагрузки будет больше, чем время прохождения звука сквозь пластину, подвергающуюся деформации. Так как процессы развития давлений при выстреле протекают за время от 10^{-1} с до 10^{-3} с, а время, в течение которого звук проходит пластинку толщиной в несколько сантиметров, составляет около $5 \cdot 10^{-6}$ с, то для измерения давления при выстреле приведенный выше критерий соблюдается, т.е. можно считать, что при измерении давления величина d пропорциональна давлению P_{max} .

Более точно величину давления определяют по таражной зависимости между диаметром отпечатка и силой сжатия поверхностей поршня и упора головной части манометра. Саморегистрирующий упругий манометр можно протарировать на любом прессе, обеспечивающем точность порядка $0,3 \div 0,5$ %.

Исследования показывают, что расхождение результатов определения давления по теоретической и таражной зависимостям составляет примерно 1–3%. При этом кривая (Фиг.16), изображающая теоретическую зависимость диаметра отпечатка от давления

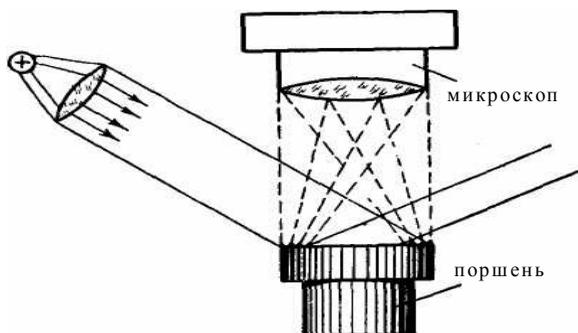


Фиг.16

$d_m = \varphi(p)$ располагается выше опытной функции $d_0 = \varphi_1(p)$. Что приводит к получению заниженного значения давления при определении его по теоретической зависимости (24) по полученной на опыте величине d диаметра отпечатка. Саморегистрирующий упругий манометр рассчитывают так, чтобы для наибольшего давления, которое может быть в условиях опытов, диаметр отпечатка был равен $3 \div 5$ мм. В соответствии с величиной диаметра по формуле (27) рассчитывают радиус кривизны сферической поверхности упора для выбранных значений наибольшего давления на поршень и площади его поперечного сечения. Сталь для поршня и упора выбирают такой, чтобы она в закаленном состоянии под действием нагрузки не получила остаточных деформаций в месте появления отпечатка. При указанных условиях можно получать большое однообразие деформации сферической поверхности упора и четко ограниченные отпечатки на торцевой плоскости поршня. Однако осуществление этих условий на практике встречает большие трудности технологического и конструктивного характера, которые еще не преодолены полностью.

Обмер диаметра отпечатка производится с точностью до 0,01 мм специальным компаратором. При обмере торцевая плоскость поршня

освещается косыми лучами (фиг.17) от источника света. Этим достигается усиление четкости контура отпечатка. Поверхность, покрытая копотью, дает в поле микроскопа рассеянный свет, а блестящая поверхность отпечатка дает зеркальное отражение света вне объектива микроскопа. Вследствие этого в микроскопе наблюдается темный круг отпечатка, контрастно выделяющийся на светлом фоне плоскости поршня. При вертикальном освещении отпечатка контрастность получается недостаточной для того, чтобы точно измерить диаметр отпечатка. Частота собственных колебаний упругой системы саморегистрирующего манометра очень высокая 50000–70000 Гц.



Фиг.17.

Период собственных колебаний упругой системы равен

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{D}}, \quad (25)$$

где M – масса поршня

D – сила упругости, действующая в месте соприкосновения сферы и плоскости.

Так как $D = \frac{dF}{da}$, где a – сближение сферы и плоскости, равное

$$a = 1,23 \sqrt{\frac{F^2}{E^2 R}}, \quad (26)$$

то, дифференцируя, найдем

$$D = \frac{dF}{da} = 1,223 \sqrt{FRE^2}. \quad (27)$$

При массе поршня $0,017 \text{ кг}$ $D = 3,32 \cdot 10^5 \text{ кг/см}$, а $T = 14,2 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ или $f_0 = 70 \text{ 000 Гц}$.

Поэтому манометр практически не обладает инерционными погрешностями при измерении самых разнообразных по продолжительности нарастания давлений, какие только могут быть в артиллерийских орудиях. Основная ошибка происходит от неточности обмера диаметра отпечатка.

По данным испытаний регистрирующего ряда образцов манометров; общая погрешность саморегистрирующего манометра колеблется около 2%. Принципиально саморегистрирующий упругий манометр допускает измерение абсолютных значений максимальных давлений. Поэтому при успешном разрешении конструктивных и технологических трудностей массового изготовления саморегистрирующих упругих манометров, однообразных по показаниям, следует ожидать широкого внедрения их в практику вместо крешерных приборов.

1.3.4. Результаты применения упругих манометров

Исследования, посвященные анализу метода упругих деформаций сравнительно с другими методами измерения давления, показывают, что метод измерения давлений при помощи упругих деформаций вполне пригоден для баллистического исследования порохов в лабораторных условиях. При наличии упругих манометров с частотой собственных колебаний в 12000–20000 Гц точность метода достаточна и отвечает современным требованиям баллистического анализа процесса горения пороха в манометрической бомбе с соплом и без сопла. По данным различных исследований точность метода упругих деформаций колеблется в пределах 1–3%.

По сравнению с крешерным методом метод упругих деформаций более сложен. Но это усложнение вполне оправдывается высокой точностью метода. В то же время для крешерного метода точность до настоящего времени еще не установлена ввиду неясности природы пластических деформаций крешеров при сжатии их быстро изменяющимися нагрузками.

Результаты одновременных измерений одних и тех же наибольших давлений, получаемых в манометрической бомбе при различных плотностях заряжания, наглядно характеризуются приводимыми ниже опытными данными.

В табл. 3 даны результаты измерения давлений при помощи цилиндрических крешеров и различных упругих манометров для порохов толщиной 1,2; 0,7 и 0,32 мм.

Таблица 3

Порох $p_{кр}$ МПа	Отклонение $d = \frac{P_y - P_{кр}}{P_{кр}}$		
	12/7	7/7	ВГ
150,5	17,2	17,8	19,2
240,0	18,5	19,2	20,3
284,0	19,3	19,6	20,6
291,0	19,2	19,8	21,0

В первой колонке даны давления $p_{кр}$, измеренные при помощи крешеров, в последующих колонках приведены отклонения показаний упругого манометра p_y , выраженные в процентах крешерных давлений. Из таблицы следует, что с переходом от толстого пороха 12/7 к более тонкому и при переходе к более высоким давлениям возрастает разница в показаниях крешерного и упругого манометров. При сопоставлении между собой результатов измерений конических крешерами и упругим манометром получают следующие данные (табл. 4),

Таблица 4

Порох $P_{кр}$ МПа	Отклонение $d = \frac{P_y - P_{кр}}{P_{кр}}$ %		
	12/7	7/7	ВГ
150,5	14,3	-	-
237,5	-	15,8	-
240,0	-	-	16,7

Из сопоставления данных табл. 3 и 4 следует, что отклонение показаний упругого манометра от показаний конических крешеров имеет меньшую величину сравнительно с отклонениями от показаний цилиндрических крешеров. Это объясняется тем, что конические крешеры, как показывают экспериментальные исследования проф. Серебрякова, дают давления, большие на 5–6%, чем цилиндрические.

Таким образом, в зависимости от типа крешеров, применяемых для измерения давлений, упругие манометры дают значения давлений больше на 14–21%, чем крешеры.

Другие опыты также показывают, что по отношению к крешерным манометрам саморегистрирующие упругие манометры дают давления выше на 12–20% в зависимости от типа пороха и от плотности заряжания.

Приведенные данные еще неполно характеризуют метод упругих деформаций. Однако прочные физические основы метода и достаточно хорошее совпадение его показаний с результатами измерений давления другими методами – пьезоэлектрическим и тензометрическим – позволяют заключить, что он дает показания давления, значительно более близкие к действительным значениям, чем крешерный метод.

1.4. Пьезоэлектрический метод

1.4.1. Физические основы метода

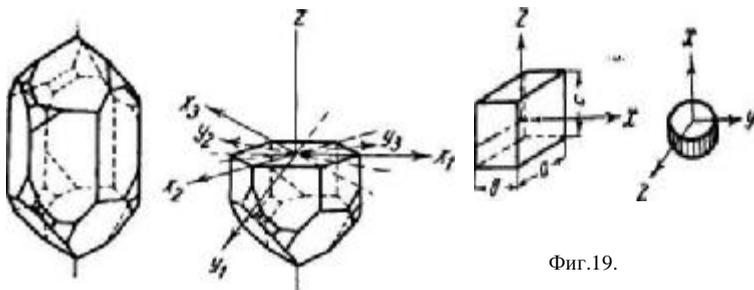
Пьезоэлектрический метод измерения давлений основывается на свойстве электрической поляризации некоторых кристаллов при их механической деформации.

Пьезоэлектрическими свойствами обладают кристаллы кварца, турмалина, сегнетовой соли и некоторых других веществ. Способность перечисленных кристаллов электризоваться при упругой деформации называется *прямым пьезоэлектрическим эффектом*. Названные кристаллы обладают также свойством изменять свои геометрические размеры при действии на них электрического поля. Это явление называется *обратным пьезоэлектрическим эффектом*. Оба эти свойства широко используются в различных областях техники: прямой пьезоэффект – для измерения сил и давлений, а обратный – для возбуждения механических колебаний и стабилизации электрических колебаний.

В технике измерения давлений наибольшее применение получил кварц благодаря своей широкой распространенности в природе и положительным качествам, прежде всего – высокой механической прочности и стабильности пьезоэлектрических свойств. Турмалин имеет почти такие же пьезоэлектрические и механические свойства, как и кварц, однако стоимость его значительно выше и он труднее поддается механической обработке. Сегнетовая соль обладает наи-

большим пьезоэффектом, примерно в 150 раз большим, чем у кварца. Но пьезоэлектрические свойства сегнетовой соли сильно зависят от температуры и влажности. Кроме того, кристаллы сегнетовой соли имеют весьма малую механическую прочность. По этим причинам турмалин и сегнетовая соль не применяются для измерения давлений в баллистических исследованиях.

Кварц представляет собой природное химическое соединение кремния и кислорода – SiO_2 . Естественные кристаллы кварца имеют форму шестигранной призмы, переходящей в основаниях в пирамиды (фиг.18). В кристаллах кварца различают следующие оси: электрические – x_1, x_2, x_3 , нейтральные – y_1, y_2, y_3 и оптическую ось z . В направлении этих осей кристалл кварца обладает различными физическими свойствами и неодинаковой способностью электризоваться при деформации. Электрические заряды возникают на поверхности кварцевого элемента только при его деформации в направлении электрической или нейтральной осей. Явление электризации кварца при деформации в направлении электрической оси называется продольным пьезоэффектом, а в направлении нейтральной оси – поперечным пьезоэффектом.



Фиг.18.

Фиг.19.

При использовании пьезоэлектрических свойств кварца для технических целей из его кристаллов вырезаются пластинки (фиг.19) в форме параллелепипеда с гранями, параллельными осям $x_{1,2,3}$, или в форме круглых пластинок с осью вращения, параллельной электрической оси кварца. Такие пластинки называются кварцевыми пьезоэлементами, а их грани, на которых выделяются электрические заряды, – активными гранями. Комплекс или набор пьезоэлементов, применяемых в манометрах для измерения сил и давлений, часто называют пьезодатчиками.

Пьезоэлектрические свойства кварцевых пьезоэлементов состоят в следующем.

1. При сжатии кварцевой пластинки в направлении электрической оси на гранях, перпендикулярных к этой оси, возбуждаются равные и противоположные по знаку электрические заряды. Количество электричества, q_x , выделяемое каждой активной гранью, прямо пропорционально сжимающей силе F_x и в рассматриваемом случае приложения нагрузки не зависит от размеров кварцевой пластинки:

$$q_x = KF_x. \quad (28)$$

2. При сжатии кварцевой пластинки в направлении нейтральной оси электрические заряды возникают также на гранях, перпендикулярных электрической оси. В этом случае количество электричества q_y , выделяемое на каждой активной грани, пропорционально действующей силе F_y и зависит от отношения размера пластинки в направлении нейтральной оси a к размеру в направлении электрической оси b :

$$q_y = KF_y \frac{a}{b}. \quad (29)$$

Из сопоставления формул (28) и (29) при одном и том же значении деформирующей силы $F = F_x = F_y$, получим

$$q_y = \frac{a}{b} q_x, \quad (30)$$

т. е. при использовании поперечного пьезоэффекта можно получить относительно большие электрические заряды, чем при продольном пьезоэффекте, вследствие соответствующего выбора размеров a и b пьезоэлемента.

3. При деформации кварцевой пластинки в направлении оптической оси, а также при всестороннем равномерном сжатии ее возбуждения электрических зарядов не происходит.

4. При перемене деформации сжатия на растяжение электрические заряды на активных гранях также меняют свои знаки.

В приведенных формулах коэффициент пропорциональности K имеет одинаковое значение и называется пьезоэлектрической постоянной кварца. Пьезоэлектрическая постоянная кварца выражает количество электричества, выделяемое каждой активной гранью кварцевой пластинки при сжатии или растяжении ее одиночной силой в направлении главной электрической оси. Если сила выражена в килограммах, то пьезоэлектрическая постоянная кварца имеет размер-

ность *кулон/кг* и среднее численное значение ее равно $K=2,1 \cdot 10^{-11}$ *кулон/кг*.

Пьезоэлектрическая постоянная очень мало зависит от температуры кварца. Специальными исследованиями установлено, что при отклонениях температуры на $\pm 25^\circ\text{C}$ от нормальной пьезоэлектрическая постоянная остается постоянной, а при изменении температуры кварца в более широких пределах – от -30 до 100°C – пьезоэлектрическая постоянная кварца уменьшается на $(0,5 \div 1)\%$. При дальнейшем увеличении температуры до 400°C пьезоэлектрическая постоянная уменьшается на 5%, а при значениях температуры выше 575°C кварц совершенно теряет свои пьезоэлектрические свойства.

Кварц обладает также рядом других ценных качеств, имеющих большое практическое значение при использовании пьезоэффекта для измерения давлений.

Модуль упругости кварца вдоль электрической и нейтральной осей имеет величину порядка $0,8 \cdot 10^5$ МПа, т. е. примерно в 2,5 раза меньше, чем для стали. Благодаря высокому модулю упругости кварц может выдерживать статические нагрузки до 600 МПа при условии очень точной подгонки поверхностей кварцевой пластинки и металлических опор, передающих на нее нагрузку. Кварц – хрупкое вещество и легко разрушается при ударах и нагрузках, неравномерно распределенных по его поверхности. Поэтому на практике по соображениям прочности динамические нагрузки на кварц ограничивают пределами порядка 50–100 МПа и в специальных случаях допускают до 150–200 МПа.

Кварцевый пьезоэлемент работает практически безинерционно, т. е. не имеет места отставание упругих деформаций от вызывающей их силы. Это значит, что электрические заряды при деформации кварцевой пластинки изменяются одновременно и с такой же скоростью, с какой изменяется нагрузка на кварц. Наряду с этим кварц не обладает гистерезисом, т. е. зависимость между величиной заряда и деформирующей силой остается одинаковой как при возрастании, так и при убывании нагрузки. Заряд возникает и исчезает одновременно с приложением и снятием нагрузки на пьезоэлемент.

Кварц является хорошим изолятором. Его удельное сопротивление вдоль электрической оси составляет около 10^{14} *ом·см²/см*. Вследствие высоких изоляционных качеств кварца разноименные электрические заряды, возникающие на активных гранях пьезоэлемента, не нейтрализуют друг друга тотчас же, а сохраняются долгое

время, если нет внешних причин – загрязнения, влажности воздуха, ухудшающих изоляцию кварца.

Рассмотренные выше свойства кварца: высокая механическая прочность, хорошие изоляционные качества и однообразие превращения нагрузок на кварц в электрические заряды, пропорциональные этим нагрузкам, позволяют свести измерение быстроизменяющихся сил, давлений и деформаций к измерению соответствующих им в каждый момент времени электрических зарядов.

Такой путь технического использования пьезоэлектрического эффекта впервые был предложен академиком Б.Б. Голицыным в 1915 г. и практически осуществлен в изобретенном им пьезокварцевом сейсмографе.

Пьезоэлектрический метод измерений благодаря трудам многих инженеров получил дальнейшее развитие и в настоящее время успешно используется в различных областях техники. Наиболее ценные результаты в этом направлении, достигнуты инж. К.В. Плехановым – одним из пионеров в области создания пьезоэлектрических приборов для измерения давлений. Эти приборы обычно называют пьезоиндикаторами давлений.

1.4.2. Принцип измерения давлений

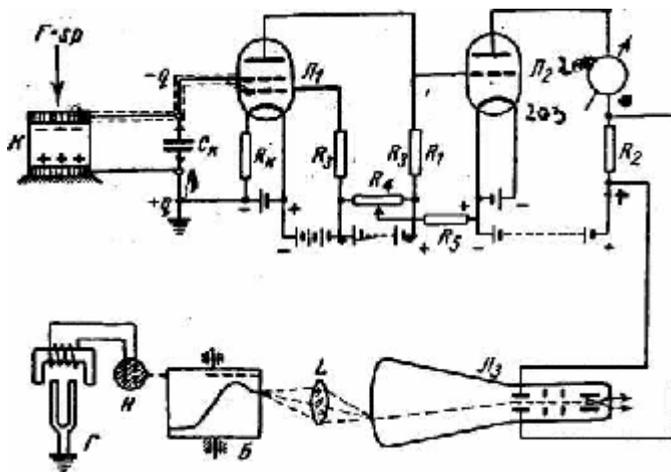
В пьезоэлектрическом методе измерение давлений сводится к измерению электрических зарядов. Пьезоэлектрические заряды очень малы по величине и способны утекать при недостаточной изоляции пьезоэлементов от окружающих проводников.

Поэтому при измерении пьезоэлектрических зарядов применяются специальные способы и приборы, обеспечивающие сохранение электрических зарядов в процессе измерений и высокую точность измерений. По этой же причине для изоляции пьезоэлемента и проводников, отводящих от него заряды, применяются изоляционные материалы с большим удельным сопротивлением и ничтожной гигроскопичностью; к ним относятся янтарь, полистирол, плавленный кварц и др.

В первых образцах пьезоиндикаторов, предназначенных для измерения давлений пороховых газов, электрические заряды измерялись непосредственно при помощи баллистического гальванометра, струнного электрометра или электронно-лучевой трубки. Однако эти способы не давали удовлетворительной точности вследствие значительных потерь электрических зарядов.

Успешное развитие пьезоэлектрического метода началось с применением для измерения электрических зарядов специальных элек-

тронетрических ламп. В России серия таких ламп разработана инженером В. М. Царевым. Основной особенностью этих ламп является исключительно высокая степень изоляции управляющей сетки по отношению к другим электродам лампы. Сопротивление изоляции сетки достигает 10^{14} – 10^{15} ом, т. е. имеет величину такого же порядка, как и сопротивление кварца. С помощью электротрических ламп практически удалось сделать очень малыми потери электрических зарядов при их измерении, а измерение электрических зарядов свести к измерению электрического напряжения или тока при помощи усилителя и осциллографа.



Фиг.20

Этот принцип измерения электрических зарядов в настоящее время составляет основу электрической схемы пьезоэлектрических приборов для измерения давлений пороховых газов.

В упрощенном виде электрическая схема пьезо-индикаторов изображена на фиг.20. Основными элементами этой схемы являются: пьезоманометр, электронный усилитель и регистрирующее устройство. Принцип действия этой схемы в общих чертах состоит в следующем.

Измеряемое давление p , действуя на поршень манометра, сжимает кварцевый пьезоэлемент K с силой F , равной произведению давления на площадь сечения поршня. Под действием силы давления на активных гранях пьезоэлемента возникают пропорциональ-

ные давлению электрические заряды противоположного знака. Электрические заряды сосредотачиваются на металлических обкладках, плотно прилегающих к активным граням пьезоэлемента.

Положительный заряд нейтрализуется заземлением соответствующей обкладки, а равный ему отрицательный заряд используется в качестве меры, определяющей величину измеряемого давления. С этой целью отрицательный заряд подается по хорошо изолированному и экранированному проводнику к электронному усилителю. Последний большей частью осуществляется в виде двухкаскадного усилителя постоянного тока с входной электрометрической лампой L_1 и второй – усилительной лампой L_2 .

Отрицательный заряд q от пьезоманометра заряжает входную емкость усилителя C и создает на управляющей сетке потенциал, равный $U = -\frac{q}{C}$ и изменяющийся пропорционально давлению на

поршень. Величина потенциала сетки электрометрической лампы может регулироваться путем изменения емкости конденсатора C_k , включаемого для этого параллельно пьезоэлементу. Вместе с емкостью остальных элементов входной цепи электрометрической лампы конденсатор C_k образует входную емкость пьезоиндикатора.

При помощи конденсатора C_k можно изменить чувствительность пьезоиндикатора и масштаб кривой давления, регистрируемого пьезоиндикатором. Поэтому конденсатор C_k часто называют масштабным. Отрицательный потенциал, создаваемый на сетке электрометрической лампы, управляет анодным током этой лампы. С увеличением давления отрицательный потенциал сетки увеличивается и соответственно этому уменьшается анодный ток в лампе L_1 . Под влиянием этого уменьшается падение напряжения на анодном сопротивлении R_1 , что в свою очередь уменьшает отрицательный потенциал управляющей сетки второй лампы усилителя.

Возрастание потенциала на сетке усилительной лампы приводит к увеличению тока в ее анодной цепи и, следовательно, к увеличению падения напряжения на выходном сопротивлении R_2 усилителя. В результате на выходе усилителя получается напряжение, необходимое для приведения в действие регистрирующего устройства пьезоиндикатора.

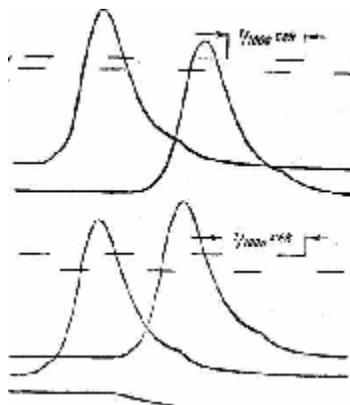
Рассмотренный процесс работы усилителя отвечает периоду нарастания давления. В периоде спадания давления отрицательный заряд на пьезоэлементе уменьшается и соответственно этому выходное напряжение усилителя уменьшается. При этом как в периоде

нарастания, так и в периоде убывания давления напряжение на выходе электронного усилителя получается во много раз больше разности потенциалов, создаваемой на его входе усилителя электрическим зарядом от пьезоэлемента.

Усилитель рассчитывается так, чтобы между напряжениями на его входе и выходе существовала линейная зависимость. Это достигается соответствующим выбором параметров схемы усилителя (сопротивления R_k, R_3, R_4, R_5) и режима работы ламп.

Изменение напряжения на выходе усилителя осциллографируется при помощи регистрирующего устройства в виде катодного или шлейфового осциллографа. Наиболее часто в пьезоиндикаторной аппаратуре в качестве регистрирующего устройства применяются катодный осциллограф с механической разверткой процесса во времени. В этом случае напряжение от усилителя непосредственно подается на отклоняющие пластинки электронно-лучевой трубки L_3 , записывающим элементом которой является электронный луч, возбуждающий на флуоресцирующем экране светящееся пятно.

При подведении напряжения от усилителя к отклоняющим пластинкам световое пятно на экране электронно-лучевой трубки будет перемещаться пропорционально давлению. В случае осциллографа с механической разверткой перемещение световой точки по экрану проектируется при помощи оптической системы L на фотографическую ленту. В результате сложения двух движений световая точка фиксирует на фотобумаге в прямоугольных координатах кривую (фиг.21), изображающую в некотором



Фиг.21

масштабе изменение во времени напряжения на выходе усилителя пьезоэлемента и, следовательно, изменение давления на пьезоэлемент. Изменяя емкость конденсатора C_k можно изменять масштаб ординат кривой давления в широких пределах.

Для перехода от кривой давления, зафиксированной пьезоиндикатором, к действительному закону изменения давления во времени служат масштабные характеристики для давления и для времени.

Масштаб давления устанавливается тарированием пьезоиндикатора при помощи пружинного динамометра или рычажного пресса.

Масштаб времени устанавливается по отметкам времени на осциллограмме. Эти отметки в виде штрихов или синусоид наносятся на фотоленту одновременно с регистрацией давления. Запись отметок времени производится, например, точечной неоновой лампой, которая через равные промежутки времени посылает на фотобумагу световые импульсы. Частота световых импульсов задается камертонным генератором эталонной частоты Г.

Наряду с основными элементами, показанными в принципиальной схеме, пьезоиндикатор обычно включает ряд вспомогательных приспособлений для получения на осциллограмме отметок моментов начала воспламенения пороха, начала движения снаряда в канале ствола, момента вылета снаряда из канала ствола и моментов прохождения снаряда через блокировочные устройства. Такие приспособления делают пьезоиндикатор универсальным прибором, позволяющим производить комплексные измерения при изучении процессов явления выстрела.

Техническое использование пьезоэлектрических свойств кварца для целей измерения давления пороховых газов связано с выполнением ряда требований, вытекающих из физики явления пьезоэффекта. Общие и вместе с тем главнейшие требования состоят в том, что схема и конструкция пьезоиндикатора должны:

- 1) обеспечивать правильную передачу давления на кварцевый пьезоэлемент;
- 2) точно воспроизводить процесс преобразования давления в электрические заряды;
- 3) предохранять последние от различных видов утечки;
- 4) не вносить искажений при преобразовании пьезозаряда в другие электрические величины и при последующем осциллографировании этих величин.

Этим требованиям подчинены все элементы пьезоиндикатора и прежде всего пьезоманометр и электронный усилитель.

1.4.3. Пьезоманометр

Основной частью пьезоманометра является кварцевый пьезоэлемент; он преобразует давление на поршень в эквивалентные электрические заряды. Пьезоэлементу и поршню придать такие размеры и форму, чтобы обеспечивалось получение возможно больших зарядов и удобная конструкция пьезоманометра.

Как указывалось выше [см. формулу (30)], при поперечном пьезоэффекте можно получить большие по величине заряды на пьезоэлементе. Поэтому на ранних стадиях развития пьезоэлектрического метода измерения давлений использовался поперечный пьезоэффект. Пьезоэлемент изготовлялся в виде параллелепипеда, удлиненного в направлении нейтральной оси, т. е. в направлении действия измеряемой силы. Такая форма пьезоэлемента была механически неустойчивой, особенно при больших давлениях, и приводила к громоздким и неудобным конструкциям пьезоманометров. Поэтому подобные пьезоэлементы применяются лишь при измерении малых давлений.

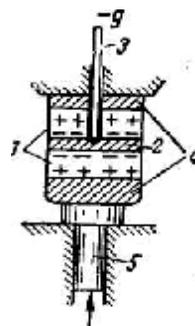
В баллистических измерениях используется главным образом продольный пьезоэффект. Пьезоэлемент в этом случае изготавливается в виде круглых пластинок с осью вращения, параллельной электрической оси кварца и совпадающей с направлением действия давления. Такая форма кварцевых пластинок позволяет обеспечить высокую устойчивость пьезоэлемента при больших нагрузках и упростить устройство пьезоманометра.

Наиболее часто пьезодатчик манометра изготавливается из двух круглых кварцевых пластинок 1 и стальной прокладки 2 между ними (фиг.22). Одна из пластинок имеет небольшое центральное отверстие, через которое выводится проводник 3, соединенный с прокладкой 2.

Кварцевые пластинки обращены к прокладке теми гранями, на которых образуются отрицательные заряды. Грани пластинок, на которых образуются положительные заряды, прилегают к стальным опорным обкладкам 4. Одна из них воспринимает давление от поршня 5, а другая упирается в корпус манометра.

При такой конструкции пьезодатчика между кварцевая прокладка получает двойной электрический заряд и хорошо изолируется самими же кварцевыми пластинками. Во время действия пьезоманометра отрицательные заряды отводятся от между кварцевой прокладки по проводнику 3, а положительные заряды нейтрализуются заземлением корпуса пьезоманометра.

В пьезоманометрах для измерения давлений пороховых газов применяются кварцевые пластинки диаметром 8 или 10 мм, реже диаметром в пределах 10–20 мм. Толщина пластинок выбирается



Фиг. 22.

такой, чтобы боковое поверхностное сопротивление пластинок между активными гранями было большим и не приводило к самопроизвольному стеканию отрицательных зарядов с междукварцевой прокладки. Обычно это достигается при толщине кварцевых пластин не менее 2–3 мм.

Большое значение для правильной работы пьезоэлементов имеет обеспечение полного контакта между активными гранями кварцевых пластинок и плоскостями опорных обкладок и междукварцевой прокладки. Это необходимо для получения равномерного распределения нагрузки по поверхности кварцевых пластинок, т. е. для исключения местных перенапряжений, ведущих к разрушению пьезоэлемента. Контактные плоскости должны быть строго параллельными и отшлифованными. В связи с этим кварцевые пластинки изготавливаются с отклонениями в толщине на различных участках не более 0,005 мм.

Полный контакт между кварцем и металлическими деталями необходим для надежного снятия электрических зарядов с активных граней. С этой целью активные грани пьезоэлемента обычно покрывают тонким слоем серебра.

Из сказанного следует, что при измерениях нагрузок, передаваемая на пьезоэлемент, не должна превышать допустимого ее значения, определяемого прочностью кварцевых пластин:

$$p_{\text{пр}} \leq \sigma_k s_k,$$

где σ_k – допустимая удельная нагрузка на пьезоэлемент;

s_k – площадь активной грани пьезоэлемента;

s – площадь сечения поршня;

$p_{\text{пр}}$ – предельно допустимое давление на поршень.

Последнее соотношение позволяет при заданных величинах площадей поршня и кварцевой пластинки определить величину предельного давления, которое можно измерить данным пьезоманометром без опасения разрушения кварцевого пьезоэлемента. Считая допустимую удельную нагрузку на пьезоэлемент в среднем равной $\sigma_{\text{пр}}=100$ МПа, получим формулу для определения $P_{\text{пр}}$

$$P_{\text{пр}}=100 \frac{s_k}{s}. \quad (31)$$

В таблице 5 приведены данные о некоторых пьезоманометрах. Первые два применяются для измерения давлений в артиллерийских орудиях, в стрелковом оружии и в манометрических бомбах. Третий пьезоманометр употребляется только при измерениях давлений в манометрических бомбах.

Таблица 5

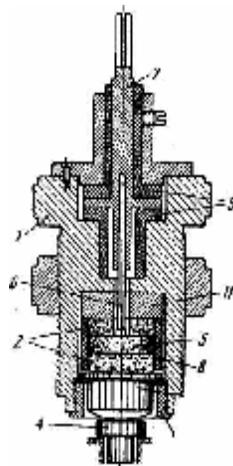
Размеры кварцевых пластин			Сечение поршня в см^2	Предельная нагрузка на кварцевую пластину в кг.	Предельно допустимое давление на поршень в МПа
d мм	s_k в см^2	h мм			
8	0,500	3	0,125÷0,150	500	400÷350
10	0,752	3	0,20÷0,25	750	350÷300
18	2,542	5	0,5÷1,0	2500	500÷250

Конструктивные формы, размеры и устройство пьезоманометров обычно устанавливаются в зависимости от измеряемых давлений и от особенностей объектов, в которых производится измерение давлений.

Одна из современных конструкций пьезоманометра для измерения давления пороховых газов показана на фиг.23. Пьезоманометр состоит из стального корпуса 1, в котором помещаются пьезоэлементы 2 и опорная плитка 3, передающая на пьезоэлементы измеряемое давление p , действующее на поршень 4.

Пьезодатчик состоит из двух кварцевых пластинок и стальной прокладки 5 между ними. На межкварцевой прокладке собираются отрицательные заряды пьезоэлементов, которые отводятся по игле 6 к штепсельному штырю 7. Последний служит для соединения пьезоманометра с экранированным кабелем, передающим отрицательный заряд от пьезоэлементов к усилителю.

Пьезоэлементы и штепсельный штырь изолируются от корпуса при помощи трубки 8 и втулок 9, сделанных из янтаря или полистирола. При сборке пьезоманометра пьезоэлементы слегка зажимаются кольцевой гайкой 10 между строго параллельными опорными плитками 3 и 11. Этим достигается плотное прилегание друг к



Фиг.23.

другу контактных поверхностей пьезоманометра и повышается жесткость пьезоэлемента.

Описанная конструкция пьезоманометра отличается компактностью, обеспечивает достаточно надежную герметизацию полости, содержащей кварцевые пьезоэлементы, и сохранение хорошей изоляции его от корпуса в течение длительного срока работы.

Другие известные конструкции пьезоманометров по схеме устройства принципиально не отличаются от приведенной выше. Так, например, в практике баллистических измерений часто применяются пьезоманометры, у которых пьезоэлементы собираются в отдельном стальном патроне. В таком виде пьезодатчик вставляется в корпус, где центрируется относительно направления действующей силы при помощи шаровой пяты. У некоторых конструкций пьезоманометров для равномерной передачи нагрузки на пьезоэлементы применяется центрирующий шарик, помещаемый между одной из опорных плит пьезо-элемента и поршнем или корпусом пьезоманометра.

Однако последний способ передачи нагрузки на пьезоэлементы нельзя считать целесообразным, так как шарик представляет собой пружину с нелинейно меняющимся сопротивлением и вследствие этого искажает линейную зависимость между давлением на поршень и электрическим зарядом, возникающим в пьезодатчике.

Основными характеристиками пьезоманометров являются чувствительность и частота собственных колебаний.

Чувствительность пьезоманометров характеризуется величиной электрического заряда, возникающего на пьезоэлементе при действии на поршень давления в 0,1МПа. В случае приложения нагрузки на кварцевую пластинку в направлении электрической оси кварца имеем

$$q = KF = Ksp, \quad (32)$$

где $K = 2,1 \cdot 10^{-11}$ кулон/кг - пьезоэлектрическая постоянная;

F - нагрузка на кварцевую пластинку в кг;

s - сечение поршня в см²;

p - давление на поршень в МПа.

Следовательно, чувствительность пьезоманометра, с одной кварцевой пластинкой, определяется выражением $q_l = Ks$. Она повышается с увеличением сечения поршня. При данном сечении поршня она не может быть повышена путем увеличения диаметра или толщины кварцевой пластинки. Увеличение сечения поршня приводит к возрастанию нагрузки и поэтому может применяться только в пределах прочности пьезоэлемента.

Другой способ увеличения чувствительности пьезоманометра заключается в применении пьезодатчика в виде столбика из нескольких кварцевых пьезоэлементов, соединенных попарно гранями одинаковой полярности. Металлические прокладки отрицательной полярности соединяются между собой и присоединяются к игле, отводящей заряд к штепсельному штырю; прокладки положительной полярности замыкаются на корпус манометра. В этом случае количество электричества, выделяемое пьезодатчиком, увеличивается пропорционально числу отдельных кварцевых пьезоэлементов $q = n \cdot \mathcal{K} \cdot sp$.

Соответственно возрастает и чувствительность пьезоманометра. Вместе с этим усложняется конструкция пьезоэлемента и значительно повышаются требования к точности изготовления кварцевых пластин и к обеспечению хорошего контакта между плоскостями кварцевых пластин, опор и междукварцевых прокладок. Ввиду этого на практике применяется пьезоманометр, состоящий из двух кварцевых пластин. Для большинства баллистических измерений чувствительность его вполне достаточна.

Второй важной характеристикой пьезоманометра является частота собственных колебаний упругой системы поршня и кварцевого пьезодатчика, включающего набор пьезоэлементов и прокладок. Собственные колебания упругой системы являются источником инерционных погрешностей пьезоманометра.

Несмотря на весьма малые смещения поршня при нагрузке его измеряемой силой, вся сборка кварцевых пьезоэлементов одновременно с относительным смещением их частиц в направлении действия силы совершает вместе с поршнем и прокладками колебательное движение под действием внутренних сил, возникающих в кристаллической решетке кварца при ее деформации. Частота этих колебаний зависит от конструкции пьезоманометра и от жесткости сборки в нем упругой системы.

Собственные колебания упругой системы накладываются на основные деформации пьезоэлементов, вызываемые измеряемым давлением, и искажают их. В связи с этим в соответствующие полупериоды колебаний упругой системы деформации пьезоэлементов увеличиваются или уменьшаются в зависимости от фазы колебаний по отношению перемещения поршня. Соответственно этим периодам деформации на активных гранях кварцевых пьезоэлементов происходит возрастание или убывание отрицательного заряда.

Таким образом, изменение электрического заряда пьезоэлементов будет сопровождаться колебаниями его величины около некото-

рого значения, отвечающего основной деформации пьезоэлементов. Вследствие этого кривая, изображающая закон пьезоэлектрической поляризации пьезоэлементов под действием давления, перестает быть тождественной кривой давления на поршень пьезоманометра. При этом чем меньше частота собственных колебаний пьезоманометра, тем больше расхождение между этими кривыми.

В механическом отношении колебательное движение упругой системы пьезоманометра аналогично колебательному движению подвижной системы упругого механического манометра. Поэтому согласно теории упругих манометров относительная инерционная погрешность пьезоманометра определяется приближенно по формуле (19) или (20):

$$d = 0,30 \frac{t_0}{t_m} = 0,30 \frac{1}{f_0 t_m},$$

где f_0 и t_0 – частота и период собственных колебаний упругой системы пьезоманометра;

t_m – продолжительность нарастания измеряемого давления до наибольшего значения.

Как видно из формулы, для точного измерения быстроизменяющихся давлений период собственных колебаний пьезоманометра должен быть весьма малым по сравнению с продолжительностью нарастания давления. Это требование в существующих конструкциях пьезоманометров выполняется достаточно хорошо.

Экспериментальные исследования показывают, что пьезоманометры для измерения давлений пороховых газов имеют частоту собственных колебаний порядка 25000–35000 Гц. При этих частотах инерционная погрешность пьезоманометров в случае применения их для измерения давлений с продолжительностью нарастания не менее 0,001 с. имеет величину порядка 1%. В баллистике, хотя и редко, встречаются процессы с продолжительностью нарастания давления в течение 0,0003–0,0005 с. В этом случае инерционные ошибки пьезоманометров могут достигать 3–5%. Этот пример указывает на то, что пьезоманометры не являются безинерционными приборами, как это иногда отмечается в литературе. Они обладают малыми погрешностями только в известных пределах, которые в значительной степени определяются характером изучаемых процессов.

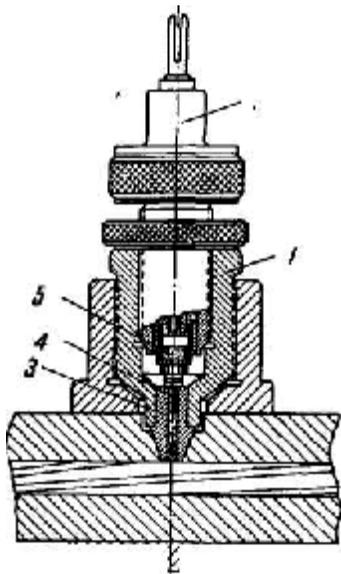
Частота собственных колебаний пьезоманометра, равно как и других манометров, в значительной мере зависит от тщательности сборки упругой системы, от плотности прилегания ее элементов друг к другу и от жесткости системы в целом. Для устранения зазоров между кварце-

выми пластинками и опорными плитками упругой системе пьезоманометра задается небольшое предварительное поджатие. Однообразное предварительное поджатие упругой системы повышает ее жесткость и делает практически стабильной частоту собственных колебаний пьезоманометра при повторных разборках и сборках. С другой стороны, предварительное поджатие исключает возможность разрушения кварцевых пластинок от ударов, которые всегда возникают в упругой системе, собранной даже с ничтожными зазорами.

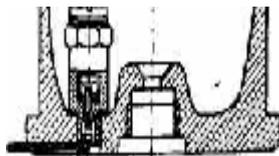
Для нормальной работы пьезоманометра важно также сохранение высокого сопротивления изоляции пьезоэлементов. Загрязнение, влажность и шероховатость поверхности изоляторов сильно снижают сопротивление изоляции, что увеличивает потери отрицательного заряда в процессе измерений. Эти недостатки изоляции устраняются достаточно простыми и надежными средствами: полированием поверхностей, тщательной промывкой кварцевых пластин и изоляторов в химически чистом спирте или в серном эфире и последующей сушкой их в термостате при температуре 60–80°C.

Пьезоанометры обычно крепятся снаружи или реже внутри объекта, в котором измеряется давление. Наружное крепление применяется главным образом при измерении давления в манометрических бомбах и артиллерийских системах, используемых для баллистических исследований.

В этом случае в теле бомбы или ствола делается сквозное отверстие с гнездом, в которое ввинчивается переходная втулка 1 для пьезоанометра 2 (фиг.24). Для достижения надежной obtюрации между переходной втулкой и телом ствола зажимается коническая втулка, заточенная под углом 30–45°. Ко-



Фиг.24.



Фиг.25

ническая втулка 3 имеет соосный сквозному отверстию в стволе цилиндрический канал, в котором помещается поршень 4. Последний воспринимает давление и передает его на пьезоэлемент 5. Свободная часть канала втулки заполняется мастикой, чтобы исключить возможность прорыва пороховых газов между стенками канала втулки и поршнем. Внутреннее крепление пьезоманометров применяется в артиллерийских системах среднего и крупного калибра. Пьезоманометры в этом случае ввинчиваются в дно гильзы (фиг.25) при патронном или раздельно-гильзовом зарядании или в затвор при картузном зарядании. Электрические заряды при таком креплении пьезоманометров отводятся от пьезоэлементов к экранированному кабелю по тонкому проводнику с очень большим сопротивлением изоляции. Проводник прокладывается в узком пазе, специально сделанном в затворе или на фланце гильзы. Преимущество внутреннего крепления электрических манометров заключается в том, что при этом исключается сверление стволов.

1.4.4. Электронный усилитель

В пьезоэлектрическом методе электронный усилитель служит для преобразования электрических зарядов, возникающих в пьезоманометре, в соответствующие им величины напряжения или тока, достаточные для приведения в действие регистрирующего устройства.

Для этой цели обычно применяют электронные усилители, собранные по схеме усилителя постоянного тока на сопротивлениях при использовании на входе электрометрической лампы. Принципиальная схема и действие такого усилителя были элементарно рассмотрены при описании электрической схемы пьезоиндикатора. Подробная теория и специфические особенности устройства усилителя постоянного тока составляют предмет специальной литературы. Поэтому рассмотрим лишь основные условия, обеспечивающие нормальную работу усилителя при использовании его для измерения электрических зарядов в пьезоэлектрическом методе измерения давлений.

Поскольку отрицательный электрический заряд является мерой давления, действующего в каждый момент времени на кварцевый пьезоэлемент, для точного измерения давления необходимо, чтобы электрический заряд был подведен к электронному усилителю с минимально допустимыми потерями. Потери заряда происходят вследствие утечки заряда через сопротивление изоляции пьезоэлементов, масштабного конденсатора и проводника, передающего заряд к электронному усилителю. Поэтому для уменьшения потерь

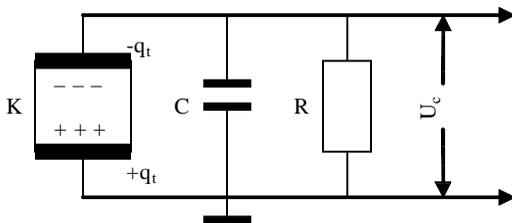
сопротивление изоляции всех элементов входной цепи усилителя делается весьма большим. С этой же целью в качестве входной лампы в усилителе применяется электрометрическая лампа с очень высоким сопротивлением изоляции управляющей сетки.

Электрометрическая лампа является наиболее ответственной частью усилителя. Ее назначение состоит в том, чтобы без искажений преобразовать изменение потенциала, создаваемого электрическим зарядом на управляющей сетке лампы, в изменение напряжения в ее анодной цепи и передать это напряжение на сетку последующей лампы для усиления. Электрометрическая лампа не корректирует искажения электрического заряда, происходящие во входной цепи вследствие несовершенства ее изоляции, а воспроизводит их в своей анодной цепи.

Поэтому сохранение высокого сопротивления изоляции входной цепи и ничтожно малый сеточный ток электрометрической лампы являются необходимым условием точного измерения электрического заряда, возникающего в пьезоманометре.

Однако и при наличии этих условий нельзя полностью избежать утечки электрического заряда во входной цепи и в электрометрической лампе. Потери заряда можно свести лишь к минимальным величинам, оправдываемым требуемой точностью измерений.

Для определения условий, при которых ошибки от утечки заряда можно считать допустимыми, рассмотрим эквивалентную схему входной цепи приведенной ранее упрощенной схемы усилителя (фиг.26).



Фиг. 26

Эквивалентная схема входной цепи состоит из кварцевого пьезоэлемента K , который является источником переменного электрического заряда q_b и параллельно подключенных к нему суммарной емкости всех элементов входной цепи C и сопротивления изоляции R .

В процессе действия давления на пьезоэлемент возникающий на нем отрицательный заряд распределяется в цепи следующим образом. Одна часть заряда q_R стекает через сопротивление R и уменьшает вели-

чину заряда q_t , который служит мерой давления. Другая часть заряда q_c , равная $q_t - q_R$, заряжает емкость C и создает на ней напряжение

$$U_C = \frac{q_c}{C} = 21 \frac{F}{C} = 21 \frac{ns}{C} p, \quad (33)$$

где n – число кварцевых пластин в пьезоманометре;
 $F=sp$ – нагрузка на пьезоэлемент в кг;
 C – емкость входной цепи;
 P – давление на поршень пьезоманометра в МПа;
 S – сечение поршня пьезоманометра в см²;
 21 – численное значение пьезоэлектрической постоянной кварца при указанных единицах измерения нагрузки и емкости.

Это напряжение измеряется усилителем и служит для оценки давления, действующего на пьезоэлемент. Очевидно, величина утечки заряда q_R будет характеризовать погрешность величины напряжения на входе усилителя.

Для определения этой погрешности возьмем выражение для заряда, сообщенного емкости C , и исключим из него величину q_R

$$q_c = q_t - q_R.$$

Согласно закону Ома сила тока i , текущего через сопротивление R в каждый момент времени, равна

$$i = \frac{U_C}{R} = \frac{q_c}{CR},$$

так как

$$U_C = \frac{q_c}{C}.$$

С другой стороны, сила тока равна изменению заряда q_R во времени

$$i = \frac{dq_R}{dt}.$$

Из этих двух выражений получим, что

$$q_R = \frac{1}{RC} \int_0^t q_c dt.$$

Тогда выражение для q_c примет вид

$$q_c = q_t - \frac{1}{RC} \int_0^t q_c dt.$$

Дифференцируя и преобразуя, получим уравнение

$$\frac{dq_c}{dt} + \frac{1}{RC} q_c - \frac{dq_t}{dt} = 0,$$

общим решением которого является выражение

$$q_c = e^{-\frac{1}{RC}t} \left[C_1 + \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} dq_t \right].$$

При начальных условиях, отвечающих моменту начала действия давления на пьезоэлемент $p = 0$; $q_t = 0$; $q_c = 0$, это выражение принимает вид

$$q_c = e^{-\frac{1}{RC}t} \int_0^t e^{\frac{t}{RC}} dq_c,$$

что после интегрирования по частям дает

$$q_c = q_t - \frac{1}{RC} e^{-\frac{1}{RC}t} \int_0^t q_t e^{\frac{t}{RC}} dt.$$

Второй член выражения представляет собой абсолютную величину потери электрического заряда Δq_t за время его измерения в процессе изменения давления. Очевидно, чем меньше этот член, тем точнее измеряемый заряд отражает величину и характер изменения заряда q_t , возникающего на пьезоэлементе.

Таким образом, величина

$$\Delta q_t = q_t - q_c = \frac{1}{RC} e^{-\frac{1}{RC}t} \int_0^t q_t e^{\frac{t}{RC}} dt$$

является мерой погрешности измерения заряда q_t , передаваемого пьезоманометром к электронному усилителю, а величина

$$d = \frac{\Delta q_t}{q_t} = \frac{1}{q_t} e^{-\frac{1}{RC}t} \int_0^t q_t de^{\frac{t}{RC}} \quad (34)$$

выражает относительную погрешность, происходящую вследствие утечки заряда в процессе измерения.

Величину этой погрешности можно определить точно, если известен закон изменения заряда на пьезоэлементе, или, что одно и то же, закон изменения давления в исследуемом объекте. Так как он заранее неизвестен, то погрешность от утечки заряда можно определить приближенно. Обычно допускают, что весь заряд от пьезоэлемента мгновенно сообщается емкости C , после чего происходит стекание заряда через сопротивление R за время, равное продолжительности действительного изменения заряда на пьезоэлементе. Другими словами, это допущение означает, что на пьезоэлемент внезапно приложено давление, равное наибольшему его значению, и что это давление оста-

ся постоянным в течение всего времени его действия t_p . При таком допущении относительную утечку заряда легко найти из выражения (34), которое при $q_i = q_m = const$ принимает вид

$$d = 1 - e^{-\frac{t_p}{RC}}. \quad (35)$$

Формула (35) дает несколько большее значение погрешности вследствие утечки по сравнению со случаем, когда погрешность определяется из условия переменности заряда.

Разлагая $e^{-\frac{t_p}{RC}}$ в ряд и удерживая первые два члена, получим приближенное выражение для определения относительной погрешности, допускаемой при измерении заряда q_i вследствие частичной его утечки через сопротивление изоляции R входной цепи электрометрической лампы:

$$d = \frac{t_p}{RC} = \frac{t_p}{t}. \quad (36)$$

В приведенной формуле произведение $RC = \tau$ называется постоянной времени, так как имеет размерность времени. Постоянная времени характеризует качество входной цепи усилителя пьезоиндикатора.

Очевидно, чем больше постоянная времени по сравнению с продолжительностью действия заряда во входной цепи, тем меньше относительная утечка заряда, тем точнее результаты измерения давлений пьезоиндикатором.

По этой причине постоянная времени входной цепи усилителя должна быть очень большой. Это достигается путем увеличения сопротивления изоляции и емкости входной цепи усилителя.

Пользуясь формулой (36), можно определить, какой должна быть постоянная времени, чтобы при измерении заряда известной продолжительности действия утечка заряда не превышала наперед заданной величины. Например, при измерении заряда, действующего в течение $t_p = 10$ с. с точностью $\delta = 1\%$, постоянная времени должна быть порядка

$$t = \frac{t_p}{d} = \frac{10}{0,01} = 1000 \text{ с}.$$

Выражение для постоянной времени дает возможность установить величины R или C при заданной одной из них, для того чтобы обеспечить требуемую точность измерения. Если в приведенном выше примере принять емкость C равной 100 пф, то сопротивление

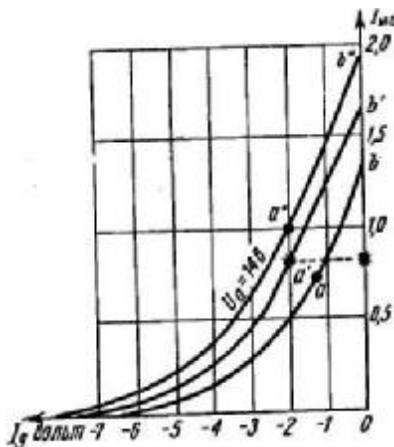
изоляции входной цепи электронного вольтметра должно быть не ниже

$$R = \frac{t}{C} = \frac{1000}{100 \cdot 10^{-12}} = 10^{13} \text{ ом}$$

Столь высокое сопротивление изоляции можно осуществить, применяя янтарь, полистирол и плавный кварц. Сопротивление этих изоляционных материалов лежит выше 10^{13} ом. При таком сопротивлении изоляции можно путем увеличения емкости входной цепи сделать постоянную времени весьма большой и тем самым свести утечки заряда к ничтожно малым величинам.

Но увеличение емкости входной цепи допустимо лишь в определенных пределах, которые зависят от величины измеряемого давления, чувствительности пьезоманометра и характеристик электрометрической лампы.

Как известно, характеристикой лампы называется зависимость анодного тока лампы от напряжения на управляющей сетке (фиг.27). Вообще характеристики ламп имеют криволинейную форму. Однако на кривой в зависимости от типа лампы всегда имеются отдельные участки ab , $a'b'$, $a''b''$, которые практически являются прямолинейными.



Фиг. 27.

На этих участках анодный ток лампы пропорционален напряжению на сетке.

В зависимости от типа электрометрической лампы напряжение на управляющей сетке при работе на прямолинейном участке характеристики может изменяться от 0 до 2-3 в.

Кварцевый пьезоэлемент при значительных давлениях на него может дать напряжение на входной емкости, во много раз превышающее

нормальное напряжение управляющей сетки электрометрической лампы. Например, при давлении $p=0,1$ МПа на поршень пьезоманометра с сечением $s=0,15$ см² и при входной емкости $C = 100$ пф напряжение на емкости будет

$$U_C = \frac{q_c}{C} = 21 \frac{ns}{C} = \frac{2 \cdot 0,15 \cdot 1}{100} = 0,06 \text{ в},$$

но при давлении $p_m=400$ МПа напряжение достигнет 250 в. Это напряжение далеко выходит за пределы нормального напряжения на управляющей сетке электрометрической лампы.

Если входную емкость увеличить до 10000 пф, то при изменении давления на пьезоэлемент от 0 до 400 МПа напряжение на емкость будет изменяться от 0 до 2,5 в.

В этом случае изменение напряжения будет соответствовать пределам прямолинейного участка характеристики лампы. При еще большем увеличении емкости C пределы изменения напряжения уменьшаются. При этом линейный участок характеристики не будет полностью использован, а чувствительность пьезоиндикатора упадет.

Таким образом, емкость входной цепи усилителя целесообразно увеличивать до тех пор, пока электрометрическая лампа работает на прямолинейном участке характеристики.

В пьезоиндикаторах давления пороховых газов в зависимости от требуемой чувствительности пьезоиндикатора входную емкость изменяют при помощи масштабных конденсаторов в пределах от 1000 до 10000 пф. При этих значениях емкости и при рабочем сопротивлении изоляции в 10^{12} ом постоянная времени входной цепи усилителя лежит в пределах $\tau = 1000-10000$ с. При таких значениях постоянной времени относительная утечка заряда за 10с. колеблется от 1 до 0,1%. С уменьшением времени действия заряда утечка заряда также уменьшается и становится ничтожно малой при очень кратковременных зарядах.

В баллистических измерениях наиболее продолжительными по времени являются заряды, возникающие на пьезоэлементе при тарировании пьезоиндикатора. Продолжительность действия нагрузки на пьезоэлемент во время тарирования может, хотя и редко, достигать до 5 с. В этом случае наибольшая относительная утечка заряда при тарировании не превышает 0,5%. Практически она получается намного меньшей, так как тарирование большей частью производится более кратковременными нагрузками.

Приведенные рассуждения являются справедливыми, если постоянная времени не менее чем в 1000 раз превышает продолжительность изменения заряда на пьезоэлементе.

Из величин, входящих в постоянную времени, наименее стабильным является сопротивление изоляции входной цепи. Сопротивление изоляции резко падает при запылении, загрязнении и

влажности окружающей среды. Такие изоляторы, как янтарь, полистирол и кварц, не являются гигроскопичными телами. Но влажность окружающей среды способствует конденсированию влаги на поверхности изоляторов, что уменьшает их сопротивление. Поэтому сохранение нормального сопротивления изоляции входной цепи усилителя является наиболее существенным условием правильного использования пьезозарядов при измерении давлений.

На практике состояние изоляции достаточно легко контролируется. С этой целью пьезоманометр при рабочем состоянии пьезоиндикатора подвергают действию нагрузки и оставляют ее неизменной в течение некоторого времени. При этом замечают показание пьезоиндикатора в момент приложения нагрузки и по истечении, например, 1 мин.

Состояние изоляции считается достаточно удовлетворительным для баллистических измерений, если в течение 1 мин начальное показание пьезоиндикатора уменьшится вследствие утечки заряда на 5–6%. Часто утечка заряда на такую величину происходит за время в несколько раз большее. Уменьшение утечки заряда достигается тщательной очисткой от загрязнений изоляторов и баллона электрометрической лампы при помощи спирта или серного эфира.

Увеличение емкости входной цепи дает возможность не только снизить утечку заряда, но и увеличить стабильность работы пьезоиндикатора. При малой емкости входная цепь становится весьма чувствительной к различным случайным изменениям емкости и к помехам, которые вызываются электрическими и электромагнитными полями внешних цепей, расположенных вблизи пьезоиндикатора.

Борьба с этими помехами обычно осуществляется повышением емкости входной цепи и экранированием всех ее элементов, включая вход электрометрической лампы и ее анодную цепь. Особенно тщательно экранируется проводник, соединяющий пьезоманометр с усилителем.

Обычно проводник заключают в гибкий металлический шланг и изолируют от него полистироловой пленкой и при помощи янтарных или полистироловых изоляторов в форме бус или чашечек, напаянных на проводник. Длина такого экранированного кабеля нормально колеблется в пределах 5–20 м и иногда достигает до нескольких сот метров.

В последнем случае экранированный кабель не обеспечивает достаточно хорошей защиты проводника от внешних помех, кроме того, при таких длинах трудно предохранить изоляцию соедине-

тельного проводника от влияния изменения влажности воздуха. Эти причины весьма затрудняют применение пьезоиндикатора в полигонных условиях, где в целях исключения влияния сотрясений от выстрела измерительную аппаратуру удаляют от огневых позиций на большие расстояния. В этих условиях пьезоиндикатор не дает достаточно однообразных и надежных результатов.

В целях устранения этого недостатка иногда разделяют усилитель на две части. Часть усилителя с электрометрической лампой; размещают в непосредственной близости с пьезоманометром, а другую часть – усилительную – оставляют при регистрирующем устройстве. При таком разделении усилителя проводники, соединяющие его две части, не требуют высокой изоляции и значительно меньше реагируют на внешние помехи.

В литературе имеются сведения, что в этом случае можно, снижая точности измерений, удалять пьезоманометр с электрометрической частью усилителя до 0,5км от регистрирующего устройства. Однако эти сведения еще не достаточно широко проверены на практике.

1.4.5. Тарирование

Для перехода от зарегистрированной пьезоиндикатором осциллограммы к действительному закону изменения давления во времени пьезоиндикатор подвергается тарированию. Тарирование заключается в установлении численной зависимости между известными давлениями на пьезоманометр и соответствующими им показаниями пьезоиндикатора.

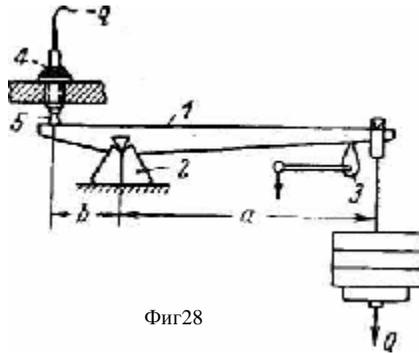
Тарирование пьезоиндикатора обычно производится при помощи рычажного пресса или пружинного динамометра.

Схематически тарирование при помощи пресса показано на фиг.28 В начальном положении рычаг пресса 1 опирается своей призмой на опору 2 и на кулачок 3. Длинное плечо рычага нагружается таражным грузом Q известной величины. Пьезоманометр 4 своим поршеньком вплотную без нажатия подведен к опорной пяте 5 закрепленной на коротком плече рычага.

В таком состоянии фиксируется начальное положение световой точки на неподвижной фотобумаге, повернутой на барабан регистрирующего устройства. При повороте рукоятки кулачка 3 длинное плечо рычага освобождается, а его короткое плечо передает на поршень манометра нагрузку, пропорциональную весу груза Q и отно-

шению плеч рычага $\frac{a}{b}$. Соответственно этой нагрузке световая точка осциллографа отклоняется в новое положение, которое также фиксируется на фотобумаге.

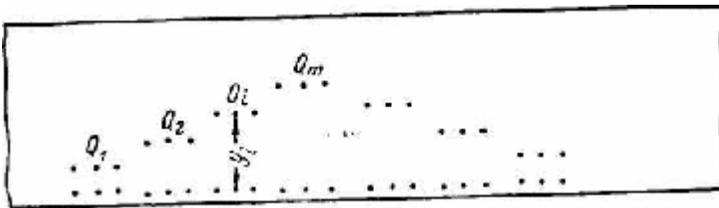
Затем поворотом рукоятки кулачка в первоначальное положение разгружают пьезоанометр, поворачивают барабан с фотобумагой на небольшой угол и фиксируют снова нулевое положение световой точки. После этого опять нагружают пьезоанометр той же нагрузкой и снова фиксируют отклонение световой точки от начального положения. Эту операцию для одной и той же нагрузки повторяют 3–5 раз, чтобы установить среднюю величину отклонений и степень их разброса.



Фиг.28

Так поступают при всех таражных нагрузках, начиная от наименьшей и кончая наибольшей. На практике часто после достижения наибольшей нагрузки тарирование продолжают в обратном порядке, т. е. от большей нагрузки к меньшей с теми же интервалами, что и при возрастании нагрузок. Этот прием увеличивает надежность тарирования.

В результате такого тарирования получают осциллограмму с зафиксированными на ней точками, с ординатами y , соответствующими таражным нагрузкам Q , (фиг.29).



Фиг.29

К такому же результату приходят и при тарировании пьезоиндикатора с помощью пружинного динамометра (фиг.30). Действие его состоит в следующем. При повороте рычага 1 кулачок 2 прижимает

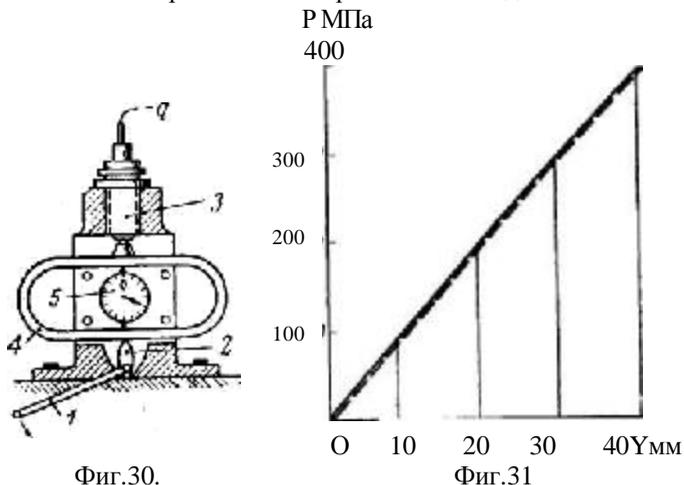
к поршеньку пьезоманометра 3 овальную пружину 4 и деформирует ее. Вследствие деформации в пружине возникает упругая сила, которая передается поршеньку пьезоманометра. Величина упругой силы определяется по показаниям стрелочного индикатора 5 и по градуировочной кривой пружины.

Результаты, получаемые при тарировании, служат для построения таражной кривой пьезоиндикатора, в которой по оси абсцисс откладываются величины отклонения световой точки от своего начального положения, а по оси ординат – давления на поршень пьезоманометра, вызывающие эти отклонения (фиг.31).

Давление на поршень определяется по величинам таражных нагрузок делением их на площадь сечения поршня:

$$p_i = \frac{Q_i}{s}$$

Обычно таражная кривая пьезоиндикатора на начальном участке имеет незначительную кривизну и дальше переходит в прямую линию. Изгиб в начале кривой может произойти от недостаточно плот-



Фиг.30.

Фиг.31

ной сборки пьезоэлементов и поршня в пьезоманометре, а также непрочного закрепления пьезоманометра в объекте исследования. Поэтому при приложении нагрузки происходит деформация элементов пьезоманометра, вследствие которой уменьшается нагрузка воспринимаемая кварцевыми пластинами. При малых нагрузках это вызывает искривление начального участка таражной кривой. Основной при-

чиной искривления таражной кривой является работа усилителя на нелинейном участке своей характеристики. Последнее наиболее часто имеет место в начале рабочего участка характеристики.

В общем случае, когда таражная кривая имеет кривизну, действительные величины давления по зарегистрированной пьезоиндикатором осциллограмме давления определяются путем отсчета значений ординат по таражной кривой. Надобность в составлении таражных таблиц отпадает по той причине, что таражная зависимость остается постоянной в течение сравнительно короткого времени работы пьезоиндикатора. Это объясняется тем, что приборы пьезоиндикатора с течением времени могут изменять свои параметры вследствие изменения изоляции входной цепи усилителя, изменения режима питания и температуры элементов пьезоиндикатора. По этой причине пьезоиндикатор тарируется каждый раз перед измерениями, а для большей точности измерений он тарируется перед началом опытов, в процессе опытов и по их окончании. Практика показывает, что при тщательном соблюдении нормального режима работы пьезоиндикатора таражная зависимость остается постоянной в течение одного-двух дней измерений.

В хороших конструкциях пьезоиндикатора таражная кривая представляет собой практически прямую линию, уравнение которой имеет вид

$$P = \beta y ,$$

где β – масштаб давлений.

Под масштабом давлений понимается величина таражной нагрузки Q , отнесенная к единице площади сечения поршня s манометра и к единице длины соответствующей этой нагрузке ординаты y_i таражной осциллограммы

$$b = \frac{Q_i}{sy_i} .$$

Постоянство масштаба давлений на всем диапазоне таражных нагрузок является критерием линейности таражной зависимости. При постоянном масштабе давлений упрощается обработка опытных кривых давлений. В этом случае значения давлений находят умножением ординат осциллограммы давления на масштабное число.

В окончательные результаты измерения давления автоматически полностью входят ошибки, допущенные при тарировании. Суммарная ошибка тарирования складывается из погрешности таражных устройств и погрешности, возникающей вследствие частичной утечки во время таража.

Точность, с которой задаются нагрузки на пьезоманометр, примерно одинакова как для рычажного прессы, так и для пружинного динамометра. Обычно она колеблется в пределах 0,25–0,5%. Пресс позволяет нагружать пьезоманометр в течение 0,1–0,25с. В пружинном динамометре продолжительность нарастания нагрузки доходит до 1с. Вообще при тарировании пьезоиндикатора на приложение нагрузки к пьезоманометру и на фотографирование отклонения световой точки регистрирующего устройства затрачивается от 2 до 5 с.

При такой продолжительности действия нагрузки электрический заряд пьезоманометра частично стекает через сопротивление изоляции. При наименьшей для пьезоиндикатора величине постоянной времени $t = 1000\text{с}$. утечка заряда при тарировании составляет 0,2–0,5%. Ошибка тарирования из-за утечки заряда уменьшает ординаты таражной осциллограммы. Вследствие этого величины давления, определяемые по осциллограмме с помощью таражной зависимости, получаются выше действительных на величину ошибки от утечки. С учетом погрешности тарировочных устройств, утечки заряда и обработки результатов тарирования общая погрешность, с которой устанавливается таражная зависимость для пьезоиндикатора, нормально не превышает 1%. Эта ошибка тарирования входит в качестве составляющей в суммарную ошибку измерения давления.

Обязательным условием правильного тарирования пьезоиндикатора является участие в тарировании всех элементов пьезоиндикатора в таком же сочетании, как и при измерении давлений. После тарирования недопустимы какие-либо замены, так как они нарушают результаты тарирования и приводят к серьезным ошибкам. Тарирование пьезоиндикатора при помощи механических таражных устройств – прессы и динамометра – отличается известной громоздкостью, требует затраты времени и снижает эффективность использования пьезоиндикатора.

Для устранения этих недостатков иногда прибегают к тарированию пьезоиндикатора электрическим путем.

Метод электрического тарирования заключается в следующем. Первоначально пьезоиндикатор тарируют с весьма большой точностью при помощи прессы или динамометра. Затем вместо пьезоманометра в цепь управляющей сетки электрометрической лампы усилителя включают через потенциометр источник постоянного напряжения. При помощи потенциометра подбирают такие напряжения на сетке электрометрической лампы, чтобы соответствующие им отклонения световой точки регистрирующего устройства точно

равнялись отклонениям, полученным при механическом тарировании пьезоиндикатора. При этом на потенциометре в точках, соответствующих подобранным напряжениям, делаются отводы, соединяемые с кнопками переключателя, ползунок которого может перемещаться под действием пружины.

Таким образом, при движении ползунка по кнопкам переключателя на сетку электрометрической лампы усилителя автоматически подаются напряжения, соответствующие напряжениям, получаемым при тарировании пьезоиндикатора механическими нагрузками.

Потенциометр к сетке электрометрической лампы присоединяется автоматически непосредственно перед измерением или тотчас же после него. Световое пятно на экране электронно-лучевой трубки регистрирующего устройства, следуя за изменениями напряжения на потенциометре, наносит на осциллограмму кривой давления ряд параллельных линий, которые затем используются для определения величин давления, соответствующих ординатам осциллограммы давления.

Таким образом, пьезоиндикатор можно тарировать в любое время измерений, не прибегая в дальнейшем к механическому тарированию.

По точности электрическое тарирование не может быть выше механического, так как напряжения на потенциометре устанавливаются с той же погрешностью, с какой прилагаются нагрузки на пьезоманометр при механическом тарировании.

При пользовании результатами электрического тарирования предполагается, что чувствительность пьезоманометра, а также емкость входной цепи остаются все время неизменными. В отношении пьезоманометра это предположение оправдывается данными опытов, из которых следует, что чувствительность пьезоманометра остается практически постоянной даже при повторных разборках и сборках. Этого нельзя сказать о емкости входной цепи, так как она может изменять свою величину, хотя и незначительно, в зависимости от длины экранированного кабеля, от расположения его относительно находящихся вблизи электрических цепей и от влажности воздуха. Изменение входной емкости неизбежно вызывает изменение напряжения на сетке электрометрической лампы, что вытекает из выражения

$$U'_c = \frac{q_c}{C} = \frac{q_c}{C \pm \Delta C} = \frac{q_c}{C} \left(1 \mp \frac{\Delta C}{C} \right) = U_c \left(1 \mp \frac{\Delta C}{C} \right)$$

где U_C – напряжение на сетке электрометрической лампы при постоянной емкости; U'_C – напряжение при измененной емкости входной цепи.

Поэтому электрическое тарирование применимо в тех случаях, когда обеспечено строгое постоянство электрических параметров входной цепи пьезоиндикатора. При несоблюдении этого условия электрическое тарирование становится лишь средством для контроля режима работы усилителя и регистрирующего устройства пьезоиндикатора и не может служить основанием для перехода от осциллографической кривой $y=\varphi(t)$ к кривой давления $p=f(t)$.

1.4.6. Заключение

Пьезоэлектрический метод измерения давлений основывается на явлении пьезоэлектрического эффекта, подчиняющемся вполне определенным и достаточно изученным законам. Принципиально законы пьезоэффекта позволяют получать в результате измерений истинные величины сил и давлений, действующих в каждый момент времени на кварцевый пьезоэлемент. Но вследствие недостаточного совершенства технических способов использования пьезоэлектрического эффекта и главным образом способов измерения малых по величине и кратковременных по характеру действия электрических зарядов пьезоэлектрическому методу свойственны погрешности. Величина этих погрешностей зависит от степени совершенства отдельных приборов, составляющих пьезоиндикатор. Она может быть с большой точностью определена по известным закономерностям, положенным в основу устройства и действия приборов пьезоиндикатора. Анализ их работы дает возможность выявить причины, которые вызывают появление погрешностей, и установить методы предупреждения увеличения их выше допустимых величин.

Экспериментально установлено, что современные конструкции пьезоиндикаторов при правильном их использовании и нормальном режиме работы обладают общей погрешностью в 1–1,5%. С учетом погрешностей, допускаемых при тарировании и при обработке осциллограмм, ошибка в определении давлений пьезоэлектрическим методом определяется в 2–2,5%.

Крупным недостатком пьезоэлектрического метода является большая чувствительность его цепи, несущей электростатический заряд, к изменениям метеорологических условий. Это не дает возможности применять пьезоиндикаторы в условиях полигона.

Однако до настоящего времени возможности пьезоэлектрического метода еще далеко не использованы. Это объясняется, с одной стороны, известной сложностью пьезоэлектрической аппаратуры, необходимостью тщательной работы с ней и, с другой стороны, установившейся уже давно приверженностью к крешерному методу измерения давления.

Крешерный метод, как указывалось раньше, несмотря на невыявленную до сих пор его точность, имеет широкое применение благодаря простоте использования его в самых разнообразных условиях. В этом состоит бесспорное достоинство крешерного метода. Но для серьезных научных баллистических исследований он мало пригоден, так как дает заниженные значения давления и искаженный характер его изменения. Это установлено многими опытами. В частности, это подтверждается и при сопоставлении пьезоэлектрического метода с крешерным. Оставляя в стороне данные, полученные до 1935 г., как наименее достоверные вследствие несовершенства пьезоиндикаторов того времени, сказанное выше можно иллюстрировать результатами измерения давления крешерным и пьезоэлектрическим методами, полученными при сжигании в манометрической бомбе порохов одной и той же природы, но различных по толщине (табл. 6).

Из таблицы следует, что с возрастанием наибольшего давления и уменьшением времени действия давления расхождение между показаниями крешерного и пьезоэлектрического методов возрастает.

Таблица 6

Толщина пороха в мм	Δ	t_k с.	$P_{кр}$ МПа	$P_{пьезо}$ МПа	$P_{пьезо} - P_{кр}$
					$P_{кр}$
0,5	0,10	0,0103	96,6	99,5	2,9 %
0,5	0,18	0,0062	172,3	193,0	12,0 %
0,35	0,10	0,0042	113,3	118,0	3,2 %
0,35	0,15	0,0025	162,1	179,5	9,8 %
0,14	0,10	0,0058	115,0	124,0	7,8 %
0,14	0,15	0,0013	165,3	189,0	14, %2

Аналогичный характер расхождения показаний получается при измерении давления в артиллерийских орудиях, причем величина расхождения показаний достигает 17–20%.

На основании многочисленных опытов, проведенных в последнее десятилетие, установлено, что пьезоэлектрический метод измерения дает значение давлений на 12–20% выше показаний крешерного метода. Такие же результаты получаются при сопоставлении показаний крешерного метода с показаниями других методов измерения, также основанных на использовании в том или ином виде изменения физических свойств тел при их упругой деформации.

1.4.7. Электрическое дифференцирование и интегрирование опытной кривой давления

При использовании кривых давления в баллистических исследованиях часто эти кривые подвергаются всесторонней математической обработке и, в частности, графическому или численному дифференцированию и интегрированию.

Например, при определении опытным путем полного импульса пороха приходится находить интеграл от давления

$$J_k = \int_0^{t_p} p dt ,$$

а при анализе закона горения пороха – определять производную от давления, характеризующую быстроту газообразования:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\left(1 - \frac{1}{\Delta}\right) f \Delta}{\left[1 - \frac{\Delta}{d} - \left(a - \frac{1}{d}\right) \Delta y\right]^2} \frac{dy}{dt} .$$

В других случаях возникает необходимость находить интеграл или производную от давления, развивающегося в канале ствола орудия, в газоотводных каналах, в дульных тормозах и т. д.

Как известно, такая обработка кривых давления известными математическими способами требует много времени и не отличается высокой точностью. Так, например, при дифференцировании опытных кривых в лучшем случае удастся получить результаты с точностью порядка 5–8%, а при интегрировании – около 5%.

Это привело к использованию свойств некоторых электрических контуров, обладающих способностью автоматически производить

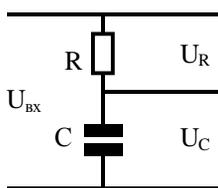
дифференцирование или интегрирование переменных величин непосредственно в процессе измерения этих величин.

Первые попытки применить электрические методы дифференцирования и интегрирования для решения некоторых практических задач баллистики были произведены за несколько лет до Второй мировой войны.

Некоторые образцы пьезоиндикаторов этого времени имели дифференцирующие устройства, позволявшие регистрировать во времени величины первых или вторых производных от измеряемого давления.

В настоящее время электрические схемы, производящие дифференцирование и интегрирование, получили большое распространение в самых разнообразных исследованиях. Общая теория этих схем наиболее подробно исследована советским ученым Г. Л. Шнирманом в 1930–1935 гг.; некоторые сведения из этой теории приводятся ниже для пояснения устройства и принципа действия дифференцирующих и интегрирующих схем, применяемых в пьезоиндикаторах.

Дифференцирующими и интегрирующими свойствами обладает ряд электрических контуров. Из них наиболее часто применяется контур, составленный из последовательно соединенных сопротивления R и конденсатора C (фиг.32).



Фиг.32

Основным достоинством контура R, C является простота его устройства при достаточной для многих случаев практики точности производимых им операций.

Этот контур присоединяется к устройствам, преобразующим измеряемую величину, например, силу или давление, в переменное электрическое напряжение, которое для данного контура является входным напряжением. При соблюдении определенных условий контур может производить дифференцирование или интегрирование подводимого к нему напряжения.

Для выяснения этих условий составим уравнения, описывающие процесс изменения напряжения U_R на сопротивлении R и напряжения U_C на конденсаторе C . При выводе уравнений предположим, что рассматриваемый контур не обладает самоиндукцией, а сопротивление, самоиндукция и емкость источника входного напряжения равны нулю.

Тогда согласно общим законам электротехники напряжение $U_{вх}$, действующее на входе контура, будет равно сумме напряжений U_R и U_C

$$U_{\text{вх}} = U_C + U_R, \quad (37)$$

а сила тока, протекающего через контур, будет равна скорости изменения заряда q на конденсаторе

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

С другой стороны, сила тока в контуре пропорциональна напряжению на сопротивлении

$$i = \frac{U_R}{R},$$

а заряд конденсатора пропорционален напряжению между его обкладками

$$q = CU_C.$$

Дифференцируя (37) и пользуясь приведенными соотношениями, исключив из него напряжение U_C , можно получить уравнение для мгновенных значений напряжения на сопротивлении контура

$$\frac{dU_R}{dt} + \frac{1}{RC}U_C - \frac{1}{RC}U_{\text{вх}} = 0. \quad (38)$$

Исключив из (37) напряжение U_R , получим уравнение для мгновенных значений напряжения на конденсаторе контура

$$\frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{RC}U_C - \frac{1}{RC}U_{\text{вх}} = 0. \quad (39)$$

Среди большого количества возможных соотношений между тремя членами, входящими в каждое из уравнений (38) и (39), практический интерес имеют два предельных случая.

Первый случай, – когда величины R и C выбраны так, что их произведение настолько мало (в пределе нуль), что первые члены уравнений становятся такими малыми по сравнению с другими членами уравнений, что ими можно пренебречь.

Тогда из уравнения (38) следует

$$U_R = RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt}, \quad (40)$$

т. е. напряжение на сопротивлении контура пропорционально производной от входного напряжения.

Уравнение (39) дает

$$U_C \approx U_{\text{вх}},$$

т. е. напряжение на конденсаторе равно напряжению на входе контура.

Второй случай, – когда величины R и C выбраны так, что их произведение настолько велико (в пределе бесконечность), что

вторые члены уравнений становятся такими малыми в сравнении с остальными членами уравнений, что ими можно пренебречь.

Поэтому из уравнения (38) получим

$$U_R \approx U_{ex},$$

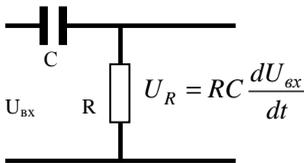
т. е. напряжение на сопротивлении равно входному напряжению контура.

Из уравнения (39) следует

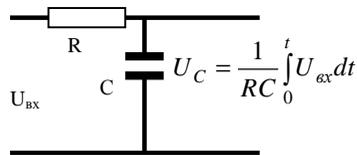
$$U_C \approx \frac{1}{RC} \int_0^t U_{ex} dt, \quad (41)$$

т. е. напряжение на конденсаторе пропорционально интегралу от входного напряжения контура.

Таким образом, из цепи, состоящей из R и C, соединенных последовательно, в зависимости от величины произведения RC может быть образовано два контура. Один из них с возможно меньшим значением величины RC будет обладать дифференцирующими свойствами (фиг.33), а другой – с возможно большим значением RC - будет обладать интегрирующими свойствами (фиг.34).



Фиг.33



Фиг.34

Как известно, произведение $RC = \tau$ является постоянной времени контура. Исследования показывают, что для повышения точности дифференцирования постоянная времени должна быть как можно меньше времени T, в течение которого действует на входе контура напряжение $U_{вх}$;

$$\tau = RC \ll T. \quad (42)$$

При интегрировании, наоборот, постоянная времени должна быть как можно больше, чем время T;

$$T = RC \gg T. \quad (43)$$

Точность, с которой указанные контуры могут производить дифференцирование и интегрирование, зависит от величины RC, постоянной времени контура и от вида функции $U_{вх}$.

Приближенно эту точность можно определить для дифференцирующего контура по формуле

$$d_R = \frac{RC}{T_m}, \quad (44)$$

и для интегрирующего контура из соотношения

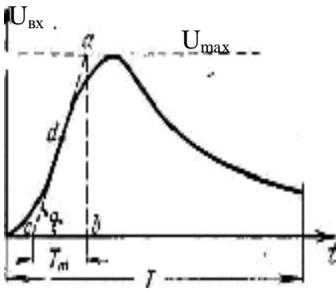
$$d_C = \frac{T}{RC}, \quad (45)$$

где T – время, в течение которого напряжение $U_{вх}$ действует на входе контура;

T_m – время, в течение которого напряжение $U_{вх}$ выросло бы до своего максимума при постоянном значении первой

производной, равной $\left(\frac{dU_{вх}}{dt}\right)_{\max}$.

Время T_m определяется из графика $U_{вх}=f(t)$ указанным на фиг.35.



Фиг.35

Проводится пунктир $U_{вх}=U_{вхmax}$ и ищется на кривой точка d с наибольшим значением производной, т.е. тангенса угла наклона касательной ac , к кривой. Из точки a , в которой касательная к кривой $U_{вх}$, t в точке d пересекается с пунктирной линией $U_{вх}=U_{вхmax}$, опускается перпендикуляр на ось t . Расстояние между точками b и c есть искомое время T_m , т. е.

$$T_m = \frac{U_{вхmax}}{tg a} = \frac{U_{вхmax}}{\left(\frac{dU_{вх}}{dt}\right)_{\max}} \quad (46)$$

Формулы (44) и (45) позволят также определить постоянную времени RC , которую должен иметь контур, чтобы с заданной степенью точности S произвести дифференцирование или интегрирование функции $U_{вх}$ известного вида.

Ограничиваясь приведенными краткими сведениями из теории емкостно-омического контура, следует отметить существенную трудность при практическом использовании RC -контура.

Из формул (44) и (45), а также из основных уравнений (38) и (39) видно, что при уменьшении величины RC в дифференцирующем контуре и соответственно при увеличении величины RC в интегрирующем контуре уменьшаются искажения, вносимые контурами в результаты измерений, но при этом так же резко уменьшаются напряжения U_R и U_C на выходе контуров. Это ведет к уменьшению

коэффициента использования входного напряжения, под которым понимается отношение выходного напряжения контура к входному.

Поэтому в каждом случае использования контуров допускают компромиссное решение, при котором величины произведения RC в контурах выбираются такими, чтобы, с одной стороны, погрешности дифференцирования и интегрирования не выходили за пределы необходимой точности и, с другой стороны, чтобы коэффициент использования входного напряжения не оказался чрезмерно малым.

В электрических индикаторах для измерения давления пороховых газов часто принимают коэффициент использования входного напряжения равным

а) для дифференцирующего контура

$$\frac{U_R}{U_{вх}} = 0,03 - 0,05; \quad (47)$$

б) для интегрирующего контура

$$\frac{U_C}{U_{вх}} = 0,05 - 0,10. \quad (48)$$

При таких значениях коэффициента использования можно электрическими методами получить производную и интеграл от измеряемого переменного давления с точностью порядка 3%. Эта точность выше той, которая получается при нахождении производной и интеграла путем математической обработки кривых давления.

Приведенные значения коэффициента использования входного напряжения показывают, что на выходе дифференцирующего и интегрирующего контуров получаются очень малые напряжения. Поэтому на выходе контуров применяются усилители для повышения выходных напряжений до уровня, достаточного для приведения в действие регистрирующих устройств.

Вследствие этого общая схема электрического интегро-дифференциатора становится более сложной. Последнее не является препятствием для распространения подобной аппаратуры в баллистической практике. Сочетание обычных электрических индикаторов давления с интегро-дифференцирующими устройствами значительно расширяет функции, которые может выполнять электрический индикатор при баллистических исследованиях. Поэтому разработанные в последнее время образцы электрических индикаторов давления, как правило, предусматривают возможность электрического дифференцирования и интегрирования кривой давления.

1.5. Тензометрический метод

1.5.1. Сущность метода

Тензометрический метод измерения давления основывается на свойстве некоторых проводников и полупроводников изменять при деформации свое омическое сопротивление электрическому току.

Схематически метод измерений состоит в следующем. Проводник или полупроводник, используемый для измерения давления и называемый омическим датчиком, включается в специальную электрическую цепь, в которой устанавливается вполне определенный режим, отвечающий начальному сопротивлению датчика. При действии давления датчик получает деформации, вследствие которых происходит изменение его сопротивления, и соответственно этому происходит изменение параметров электрической цепи: напряжения и силы тока. Изменение одной из этих величин регистрируется при помощи шлейфового или катодного осциллографа. В результате получается кривая, изображающая в некотором масштабе давление, действующее на омический датчик, в функции времени. С помощью таражной зависимости, представляющей собой связь между показаниями измерительной схемы и известными нагрузками на датчик, полученная кривая преобразуется в кривую действительных значений переменного давления в исследуемом объекте.

Начало применения омических датчиков для измерения быстроизменяющихся давлений пороховых газов в канале артиллерийского оружия было положено лишь в 1920–1923 гг. членами КОСАРТОП (Комиссия особых артиллерийских опытов) проф. П.Я. Сольдау и В.В. Базилевичем.

В результате исследований они обосновали возможность измерения динамических давлений по величине изменения электрического сопротивления проводников и полупроводников и дали принципиальную схему измерений давления пороховых газов при помощи омических датчиков. Эта схема измерений составляет существо современного тензометрического метода измерения давления в орудиях.

Долгое время указанная схема не могла быть полностью технически реализована ввиду отсутствия надежных способов регистрации малых и быстропротекающих изменений сопротивления омических датчиков. С развитием электро-радио-техники тензометрический метод вновь возродился и благодаря работам советских ученых и инженеров прочно вошел в практику измерений в различных областях техники.

1.5.2. Типы омических датчиков

Омические датчики в зависимости от материала, из которого они изготовлены, разделяются на проводниковые и полупроводниковые.

Проводниковыми называются датчики, изготовленные из металлической проволоки с относительно высоким удельным сопротивлением. В качестве материала для проволоки употребляются преимущественно сплавы: константан, манганин, элинвар, нихром и др.

Датчик представляет собой отрезок проволоки, наклеенной на полосу тонкой бумаги толщиной 10–25 мк в виде нескольких частей плоских петель длиной от 5 до 25 мм. Длина петли называется базой датчика. Диаметр проволоки в зависимости от назначения датчика выбирается от 20 до 50 мк. Длина проволоки устанавливается из расчета, чтобы начальное сопротивление датчика составляло 100–250 Ом при работе со шлейфовым осциллографом и 500–1000 Ом – катодным осциллографом. Для удобства присоединения к измерительным приборам к концам проволоки датчика привариваются более толстые выводные проводники.

Проволочный датчик прочно приклеивается бумажной стороной к исследуемой детали так, чтобы направление проволочных петель датчика совпадало с направлением измеряемой деформации детали. Проволочные датчики приклеиваются к исследуемой детали при помощи бакелитового и карбинольного клея или при помощи специальных цементирующих составов. При деформации детали проволока датчика получает продольные деформации, и вследствие этого происходит изменение сопротивления датчика. По изменению сопротивления датчика судят о деформации детали и о величине силы, вызывающей эту деформацию.

Для измерения деформаций при повышенных температурах (до 180°C) применяют тензометры, изготовленные на бакелитовом лаке или пленке клея БФ-2. В последнее время стали применять тензометры, изготовленные из тонкой фольги, на которой часть металла удалена травлением так, что оставшаяся его часть образует решетку с выводами. Перед травлением на фольгу наносят светочувствительную эмульсию, затем на ней контактным способом с негатива делают отпечаток решетки, проявляют, окрашивают и дубят (делают стойким к травильной кислоте). Затем на обратную сторону фольги наносят слой лака и полимеризуют его. После этого фольгу травят, получая таким образом решетку из фольги, прикрепленную к пленке из фольги и лака. Особенно удобны утолщенные выводы таких тензометров для приваривания (припаивания) выводов.

При измерении гидростатических давлений часто применяется проволочный датчик в виде многослойного спирального кольца диаметром 5–10 мм и толщиной 2–3 мм, намотанного из манганиновой проволоки диаметром 0,03–0,05 мм и длиной 1–3 м при общем электрическом сопротивлении порядка 500–1000 Ом. Проволока имеет эмалевое покрытие и двойную или одинарную шелковую обмотку, навитую поверх эмали. Намотка делается бифилярной, чтобы устранить влияние самоиндукции проволочной спирали. Кольцо обматывается тонкой шелковой нитью для упрочнения его и для уничтожения перемещения витков относительно друг друга. Готовое кольцо подвергается термическому старению при температуре 100–125 °С для частичного снятия внутренних напряжений, возникающих в проволоке при ее намотке в спираль.

При гидростатическом сжатии кольцевого датчика его сопротивление меняется соответственно давлению среды. Это изменение сопротивления служит мерой измеряемого давления.

Полупроводниковыми называются омические датчики, изготовленные из твердых полупроводников – веществ, оказывающих значительно большее сопротивление электрическому току, чем металлы или их сплавы. Ранее твердые полупроводниковые датчики изготавливались из мелкотертого угольного или графитового порошка и цементирующего вещества (гипса или каолина), смесь которых прессуется под большим давлением и затем прокаливается. Такие датчики в отличие от проволочных называют угольными.

В полупроводниках тензорезистивный эффект необычно велик. Оптимальный тензорезистивный эффект зависит от физического состояния в области температур, близких к комнатной, т.е. от типа материала, его удельного сопротивления или степени легирования, кристаллографической ориентации.

Для применения в тензодатчиках наиболее удобны тонкие нити из кремния р–типа с удельным сопротивлением 0,1 Ом·см., а также п– и р– германий.

Полупроводниковые преобразователи могут быть применены взамен обычных проволочных тензодатчиков в тех случаях, когда очевидным преимуществом является их более высокая чувствительность, а также для измерения деформации, когда проволочные тензодатчики неприменимы.

Теория твердых полупроводниковых тензометров имеется в специальной литературе.

1.5.3. Физические свойства омических датчиков

Проводниковые и полупроводниковые датчики различаются между собой физической природой явления изменения их сопротивления при деформации. Изменение сопротивления проводников при деформации происходит от изменения их геометрических размеров и от удельного сопротивления вследствие структурных преобразований, происходящих в материале проводника при его деформации. При растяжении проводника его поперечное сечение уменьшается, а удельное сопротивление увеличивается, что вызывает увеличение общего сопротивления проводника.

Природа изменения сопротивления полупроводников при их деформации достаточно сложна. Считают, что изменение сопротивления угольных полупроводников происходит от изменения внутреннего сопротивления материала проводника и особенно от изменения контактного сопротивления наружной его поверхности и внутренней поверхности соприкосновения между собой мелких частиц угля или графита, скрепленных цементирующим веществом. При сжатии угольного полупроводника число контактирующихся частиц увеличивается и сопротивление полупроводника уменьшается.

В 1881г. русский физик О.Д. Хвольсон впервые показал, что при деформации проволоки изменяются не только размеры, но и ее удельное сопротивление ρ . Действительно, если бы ρ не зависело от деформации проволоки, то мы имели бы

$$R = \frac{r \cdot l}{S}; \quad \frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S},$$

где l – длина проволоки,
 S – сечение проволоки,
или

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + 2\nu) \frac{\Delta l}{l},$$

где ν – коэффициент Пуассона, равный для металлов от 0,24 до 0,40. Относительная чувствительность проводника к деформации равна

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} = 1 + 2\nu.$$

Значения K не выходили бы за пределы 1,48–1,80. Однако экспериментальные значения $K=2\div 3$, следовательно, при деформации изменя-

ется еще и удельное сопротивление проволоки ρ . В этом случае для K получим выражение

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta r}{r},$$

или

$$K = 1 + 2n + \frac{r}{\frac{\Delta l}{l}}. \quad (49)$$

В основе измерения давления *проволочными* датчиками лежит установленное опытом соотношение

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta l}{l}, \quad (50)$$

выражающее собой линейную зависимость между относительным изменением начального сопротивления датчика R и относительным изменением длины его проволоки l при растяжении ее в пределах упругости.

В этом соотношении коэффициент пропорциональности K , связывающий омическое сопротивление проводника с его деформацией, называется чувствительностью сопротивления проводника или просто чувствительностью проводника к деформации. Обычно он определяется опытным путем из отношения

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta l}{l}} \quad (51)$$

по измеренным величинам относительного изменения сопротивления и относительного удлинения проводника, вызывающего это изменение сопротивления.

Опыты показывают, что для подавляющего большинства материалов, применяемых для изготовления проволочных датчиков, чувствительность их к линейной деформации является величиной постоянной как при нагрузке проволоки возрастающей растягивающей силой, так и при постепенной разгрузке ее от этой силы. Это указывает на отсутствие явления гистерезиса, т. е. искажения в соотношении между сопротивлением и деформацией проволоки при нарастании нагрузки на датчик и убывании ее. Последнее позволяет избежать ошибок, происходящих от гистерезиса, при измерении возрастающих и затем спадающих давлений.

Из многих исследований различных материалов для проволочных датчиков следует, что чувствительность их сопротивления к деформации колеблется в относительно узких пределах. Для наиболее употребительных сплавов чувствительность проволочных датчиков лежит в пределах от 1,5 до 2,5 и для некоторых специальных сплавов доходит до 3,6.

Чувствительность проводника к деформации является основной характеристикой свойств материала проволочных датчиков. Очевидно, чем больше чувствительность материала, тем выше качество проволочного датчика. Однако для одного и того же материала чувствительность датчика несколько зависит от величины диаметра проволоки, от длины базы датчика.

В табл. 7 приведены ориентировочные данные о некоторых материалах, употребляемых при изготовлении проволочных датчиков.

Таблица 7

Материал проволоки	Примерный состав в %	Удельное сопротивление ρ ом мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления $\alpha \cdot 10^6$	К	$E \cdot 10^{-6}$ МПа
Манганин	84Cu; 12Mn 4Ni	0,42–0,46	± 3	0,47–0,5	0,122–0,13
Константан	60Cu; 40Ni	0,45–0,51	± 2	1,8–2,2	0,125–0,15
Эдвас	55Cu; 45Ni	0,48–0,5	4–8	1,9–2,1	0,15–0,175
Никелин	55Cu; 21Zn 24Ni	0,40–0,45	200–300	1,9–2,0	0,133–0,14
Нихром	80Ni 20Cr	0,75–1,0	100–200	2,1–2,3	–

Выбор того или иного материала для проволочного датчика определяется чувствительностью проволоки к деформациям, конструкцией датчика и температурными условиями работы датчика. Последний фактор оказывает большое влияние на свойства проволочных датчиков.

Известно, что электрическое сопротивление металлического проводника зависит от его температуры. В условиях тензометрических измерений изменение температуры проволоочного датчика может произойти по двум причинам: от изменения температуры детали, к которой прикреплен датчик, и от нагревания электрическим током, проходящим через проволоку датчика. Обе эти причины приводят к изменению омического сопротивления датчика, которое может сильно исказить результаты измерений. Поэтому для уменьшения влияния температуры проводника на его электрическое сопротивление стремятся для тензодатчиков применять сплавы с очень малым температурным коэффициентом сопротивления. В этом отношении из приведенных выше материалов лучшие результаты дают константановые, эдвасовые и манганиновые датчики, так как для них температурные коэффициенты много меньше, чем для никелина и нихрома.

Сопротивление проволоочного датчика может также изменяться вследствие различия в изменениях размеров датчика и детали при изменении их температуры. Для устранения этого берут проволоку для датчика с таким же температурным коэффициентом линейного расширения, как и у детали, к которой он приклеивается. Для измерения деформаций стальных деталей наиболее пригоден сплав эдвас, который имеет температурный коэффициент расширения, близкий к коэффициенту расширения стали. При невозможности выбрать проволоку с необходимыми температурными коэффициентами сопротивления и расширения прибегают к специальным приемам компенсации влияния температуры на работу датчика.

Приведенное выше основное тензометрическое соотношение (50); при практическом его использовании часто связывают с напряжением, возникающим в поперечном сечении проводника при его деформации. Согласно закону Гука нормальное напряжение при растяжении или сжатии в пределах упругости пропорционально относительному удлинению или укорачиванию проводника

$$s = E \frac{\Delta l}{l} \quad (52)$$

где E – модуль упругости материала проводника в МПа
 σ – напряжение, нормальное к сечению проводника, в МПа.

Подставляя в формулу (50) вместо величины $\frac{\Delta l}{l}$ – её значение из закона Гука, получим иное выражение для тензометрического соотношения

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{S}{E} S_l. \quad (53)$$

Таким образом, в пределах упругих деформаций относительное изменение сопротивления проволочного датчика является линейной функцией напряжения, возникающего в поперечном сечении проводника при его продольной деформации. Это соотношение и используется для измерения напряжений, развивающихся в различных инженерных сооружениях, и для определения сил и давления.

Опытами установлено, что пропорциональность между сопротивлением проводника и нормальным напряжением хорошо сохраняется при нагрузке и разгрузке проволочных датчиков, если относительная деформация проволок не превышает 0,5%. Это соответствует наибольшему изменению сопротивления датчика на 0,5–1% в зависимости от величины его чувствительности. При большей деформации проволока может получить остаточные деформации, и сопротивление датчика после разгрузки не возвратится к начальному. Соотношение (49) характеризует тензометрические свойства проволочных датчиков при их линейной деформации: растяжении или сжатии. Однако опытами выявлено, что изменение сопротивления имеет место и при всестороннем давлении на них. В частности, установлено, что относительное изменение сопротивления проводника из манганина практически прямо пропорционально давлению среды, в которую он введен:

$$\frac{\Delta R}{R} = Kp, \quad (54)$$

причем это изменение сопротивления, так же как и при линейных деформациях, в пределах упругости весьма точно и безинерционно следует за изменением давления, действующего на проводник.

В приведенной зависимости коэффициент пропорциональности K называется чувствительностью датчика к давлению; он характеризует свойства материала проводника. Чувствительность датчика к давлению определяется опытным путем. Для манганиновой проволоки, наиболее часто употребляемой для измерения гидростатического давления, чувствительность к давлению колеблется от $0,2 \cdot 10^{-6}$ до $0,26 \cdot 10^{-6}$ на 1 МПа.

Изменение сопротивления манганиновой проволоки при всестороннем сжатии ее в настоящее время используют при измерении очень больших давлений. Манганиновые датчики обладают линей-

ной зависимостью между сопротивлением и гидростатическим давлением при величинах давлений, достигающих до 1300 МПа. При этом точность и стабильность показаний манганиновых датчиков настолько велики, что эти датчики могут быть использованы как эталоны для оценки проволочных датчиков из других сплавов.

Следует отметить, что проволочные датчики обладают большим постоянством тензометрических свойств и высокими эксплуатационными качествами: малыми габаритами, ничтожным весом; их можно присоединять к деталям без нарушения работы последних. Проволочные омические датчики в настоящее время являются наиболее распространенными в технике измерения деформаций, вибраций, перемещений и сил, их вызывающих.

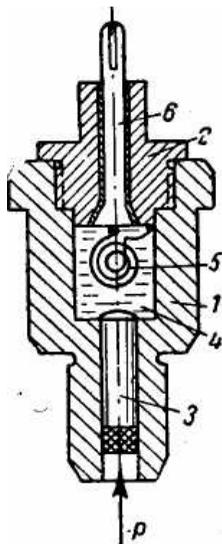
Проволочные датчики являются практически безинерционными устройствами, позволяющими измерять быстро изменяющиеся процессы продолжительностью в 0,0001 с. с точностью до 1% (если это позволяют регистрирующие устройства и другие элементы измерительной установки).

1.5.4. Конструкции тензоманометров

В зависимости от условий измерения, от порядка величин и характера изменения давления конструкции тензоманометров могут быть самые разнообразные. Однако в практике баллистических измерений давления пороховых газов в артиллерийском оружии и в манометрической бомбах находят применение лишь несколько конструкций, проверенных на опыте и зарекомендовавших себя в работе.

С целью ознакомления с особенностями этих тензоманометров рассмотрим наиболее типичные их конструкции.

На фиг. 36 изображен проволочный манганиновый тензоманометр для давлений до 500 МПа. Манометр имеет стальной полый корпус 1, ввинчиваемый в ствол или манометрическую бомбу. Сверху корпус наглухо завинчен крышкой 2, а снизу закрыт стальным поршнем 3 или столбиком из мастики или тавота. Образующаяся внутри манометра полость 4 заполнена маслом, в котором

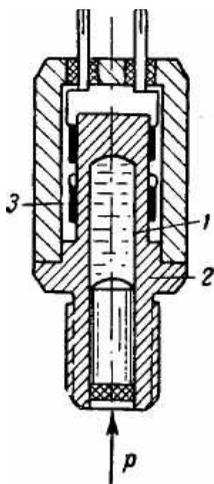


Фиг.36.

находится проводниковый датчик 5 в форме кольца из манганиновой проволоки.

Один конец проволоки датчика соединен с крышкой манометра, другой со штифтом 6, изолированным от тела крышки и служащим для подключения к измерительной аппаратуре.

В этом манометре давление пороховых газов p передается через поршень или мастику на масло, а последнее производит всестороннее сжатие манганиновой проволоки датчика.



Фиг.37.

Второй тип тензоманометра с гидравлической передачей давления представлен на фиг. 37. Эта конструкция отличается от предыдущей тем, что давление здесь действует не непосредственно на проволоочный датчик, а передается через масло на упругую трубку 1 корпуса манометра 2, на которую наклеен петлевой проволоочный датчик 3. На сплошной недеформируемой части трубки укреплен второй, подобный первому, петлевой датчик. Он служит для компенсации влияния температуры на первый, основной датчик и устанавливается так, что не подвергается деформации.

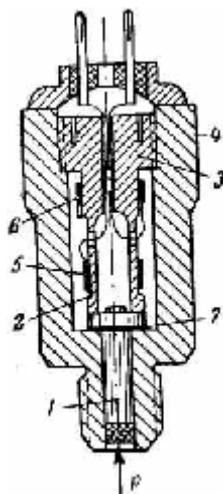
При действии давления на поршень масло, заполняющее упругую трубку манометра, деформирует трубку в радиальном направлении, что приводит к продольному растяжению петлевого датчика. В результате его сопротивление изменяется соответственно давлению на поршень.

Конструкция второго типа тензоманометра с гидравлической передачей давления более удобна в эксплуатационном отношении, поскольку проволоочные датчики вынесены из полости с маслом и работают на линейную деформацию.

В качестве жидкости для заполнения полости как в первом типе тензоманометра, так и во втором, применяются различные масла, мало изменяющие свою вязкость под давлением и обладающие незначительной сжимаемостью. Этим требованиям в большей мере удовлетворяют глицерин, касторовое масло, льняное масло и различные сорта веретенного и трансформаторного масел.

Тензоманометры, подобные описанным выше конструкциям, требуют тщательного изготовления и особенно обеспечения высо-

кой герметизации полости, заполняемой маслом, исключаящей утечку последнего при больших давлениях. Кроме того, при заполнении полости маслом из нее должен быть полностью удален воздух. Само масло также должно быть в высокой степени чистым и свободным от микроскопических твердых частиц и пузырьков газа. Невыполнение этих условий приводит к затрате энергии на выдавливание масла из полости и сильное сжатие воздуха и газа в масле. В результате этого может возникнуть запаздывание в передаче давления на проволочный датчик, искажение величин передаваемого давления и другие трудно учитываемые ошибки. Существенным недостатком манометров с гидравлической передачей давления является трудность обеспечения высокой частоты собственных колебаний упругой системы манометра. Вследствие некоторой сжимаемости масла, изменения его вязкости под давлением, а также вследствие монтирования упругой системы: поршень–масло датчик без предварительного поджатая, собственная частота колебаний упругой системы манометра относительно невелика и, как показывают исследования, в лучших конструкциях манометров подобного типа имеет величину порядка 5000–7000 *гц*.



Фиг.38

Манометры с такой частотой собственных колебаний позволяют измерять давления пороховых газов с точностью до 2% при продолжительности нарастания давления не менее 0,005с. Такие манометры вполне оправдывают себя при измерении давлений в артиллерийских орудиях крупных и средних калибров, а также в минометах. Но при измерении давления в малокалиберных орудиях и в стрелковом оружии, где нарастание давления может происходить в течение 0,0005–0,001с., тензоманометры с гидравлической передачей давления могут привести к значительным ошибкам. Для этих видов оружия необходимо применять манометры с большой частотой собственных колебаний.

Одна из современных конструкций высокочастотных тензоманометров приведена на фиг. 38. В этом манометре поршень 1 передает давление на тонкостенную стальную трубку 2, выточенную заодно с пробкой 3, ввинчиваемой в корпус манометра 4. На средней

части трубки прочно приклеен измерительный проволочный датчик 5, а на утолщенном основании трубки – компенсационный датчик 6.

Основные детали манометра изготавливаются из одной и той же стали, имеющей малый температурный коэффициент расширения. При сборке манометра его упругой системе (поршень–трубка) задается некоторое начальное поджатие для жесткого сочленения между элементами манометра. Между головкой поршня и корпусом манометра помещается кольцо из мягкой меди 7 для предохранения стальной трубки от чрезмерных напряжений при сборке манометра. При действии давления через поршень стальная трубка укорачивается и вследствие этого получает в средней части поперечные деформации в радиальном направлении. Вместе с трубкой деформируется датчик, который при этом изменяет свое сопротивление.

Приведенная конструкция тензоманометров в части устройства упругой системы представляет собой разновидность упругого манометра. Поэтому тензоманометр с упругой системой в виде поршня и стальной трубки имеет те же частотные характеристики, что и упругий манометр. Опыт показывает, что в зависимости от веса и размера стальной трубки и поршня частота собственных колебаний упругой системы может изменяться в довольно широком диапазоне, имея верхний предел в 10000–15000 *Гц*, уже достигнутый на практике. Тензоманометры с такой частотной характеристикой позволяют измерять давления с продолжительностью нарастания в 0,0005с. с точностью около 3–5%. С возрастанием продолжительности нарастания давления точность измерения повышается и составляет 1–2% для давлений, нарастающих до своего максимума в течение 0,005–0,001с.

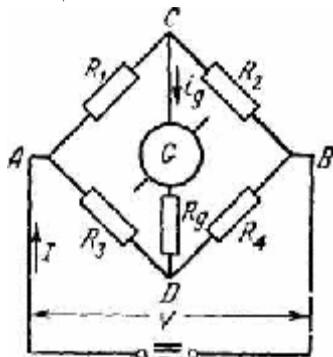
1.5.5. Электрическая схема тензоиндикатора

При измерении давлений тензометрическим методом наибольшее изменение сопротивления омических датчиков нормально не превышает 1% для проволочных и 5% для угольных датчиков. Измерение столь малых и быстрых изменений сопротивления омического датчика требует измерительных схем высокой чувствительности и иногда достаточно сложных по структуре.

Обычно это измерение производится при помощи мостовых схем в соединении со шлейфовым или катодным осциллографом и вспомогательных приборов, обеспечивающих регистрацию измеряемого давления с требуемой точностью. В совокупности все элементы, участвующие в измерении давления, образуют общую электрическую схему тензоиндикатора.

Входным элементом электрической схемы тензоиндикатора обычно является мостовая схема, показанная на фиг. 39.

Сопротивления R_1 , R_2 , R_3 и R_4 называются плечами моста. В точках А и В мост подключается к источнику постоянного или переменного тока. Цепь, питающая мост током, называется диагональю источника тока моста. Между точками С и D моста включается измерительное устройство G, имеющее входное сопротивление R_g . Эта цепь схемы называется измерительной диагональю моста.



Фиг.39.

Мостовая схема в зависимости от соотношения сопротивлений плеч может находиться в двух состояниях: в равновесном и неравновесном. Равновесным называется такое состояние моста, при котором ток в измерительной цепи равен нулю. При наличии тока в измерительной диагонали состояние моста называется неравновесным.

В мостовых схемах, работающих на постоянном токе, равновесное состояние, как показывает теория мостовых схем, достигается при выполнении

следующего соотношения между сопротивлениями плеч моста:

$$R_1 R_2 - R_3 R_4 = 0 \quad (55)$$

При нарушении этого условия, например, путем изменения сопротивления одного из плеч схемы, мост становится неравновесным и в его измерительной диагонали появляется ток, сила которого выражается уравнением

$$i_g = I \frac{R_1 R_2 - R_3 R_4}{R_g (R_1 + R_2 + R_3 + R_4) + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}, \quad (56)$$

где I – сила тока в диагонали источника тока моста;

R_g – входное сопротивление измерительного устройства.

Приведенная зависимость позволяет производить определение малых изменений сопротивления омических датчиков по величине силы тока в измерительной диагонали моста постоянного тока. Для этого омический датчик включается в одно из плеч моста, а сопротивления остальных плеч делаются строго постоянными и в большинстве случаев выбираются такими, чтобы в начале измерений мост был в состоянии равновесия, т. е. чтобы выполнилось условие

$$R_0 R_2 - R_3 R_4 = 0,$$

где R_0 - сопротивление омического датчика в ненагруженном состоянии.

При действии давления на датчик его сопротивление изменяется на величину ΔR и становится равным $R_1=R_0+\Delta R$. Вследствие этого нарушается равновесие моста, и в измерительной его диагонали появляется ток i_g , по величине которого судят о величине изменения сопротивления датчика и, следовательно, о величине давления, действующего на датчик.

Для установления зависимости между силой тока i_g и изменением сопротивления датчика ΔR рассмотрим мост, наиболее распространенный в практике тензометрических измерений, у которого сопротивления плеч равны начальному сопротивлению датчика: $R_2=R_3=R_4=R_0$. Такой равноплечий мост обладает хотя и не наибольшей, но очень близкой к ней чувствительностью к малым изменениям сопротивления в одном из его плеч.

Подставляя величины $R_1 = R_0 + \Delta R$ и $R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ в основное уравнение неравновесного моста (56), получим

$$i_g = I \frac{1}{4 \left(1 + \frac{R_g}{R_0} \right) + \frac{\Delta R}{R_0} \left(2 + \frac{R_g}{R_0} \right)} \frac{\Delta R}{R_0}.$$

Это уравнение показывает, что сила тока в измерительной диагонали вообще является нелинейной функцией относительного изменения сопротивления омического датчика. Однако при очень малых величинах изменения сопротивления, какие обычно получает датчик под действием давления, влияние переменного члена знаменателя незначительно и им можно пренебречь.

Поэтому при условии, что $\Delta R \ll R_0$, ток в измерительной диагонали можно считать с большой точностью пропорциональным относительному изменению сопротивления датчика

$$i_g = \frac{1}{4} \cdot \frac{I}{1 + \frac{R_g}{R_0}} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (57)$$

Полученная формула характеризует ток в измерительной диагонали моста, одним из плеч которого является омический датчик. Аналогичными рассуждениями можно вывести формулу для случая включения в два смежных плеча моста дифференциального датчика.

Как уже отмечалось, в таком датчике общее его сопротивление разделено на две равные половины, которые под действием давления получают равные по величине, но противоположные по знаку изменения сопротивления. Вследствие этого ток в измерительной диагонали моста, с дифференциальным датчиком будет вдвое больше, чем у моста с одним датчиком:

$$i_g = \frac{1}{2} \cdot \frac{I}{1 + \frac{R_g}{R_0}} \cdot \frac{\Delta R}{R_0} . \quad (58)$$

Если изменения сопротивления двух датчиков, помещенных в двух смежных плечах, равны между собой и имеют одинаковые знаки, то мост на эти изменения сопротивления датчиков не будет реагировать. На использовании этого свойства моста основывается компенсация влияния на балансировку моста температурного изменения сопротивления датчика при измерениях. Для этого в плечо моста, смежное с плечом, в котором находится измерительный датчик, включается точно такой же компенсационный датчик. Оба эти датчика наклеиваются на упругий элемент тензоманометра так, чтобы они в одинаковой степени воспринимали изменение температуры тензоманометра, но вместе с тем, чтобы компенсационный датчик не подвергался влиянию деформации упругого элемента тензоманометра. В этом случае при нагревании тензоманометра сопротивление датчиков изменяется в одинаковой степени, и поэтому эффект изменения температуры датчиков не вызывает искажения силы тока в измерительной диагонали моста, вызванной деформацией измерительного датчика под действием давления. Такой метод компенсации получил наиболее широкое распространение в практике благодаря простоте, удобству и точности регулирования схемы.

Имея в виду, что наибольшее изменение сопротивления для омического датчика не превышает 5%, из формул (57) и (58) получим максимальные значения силы тока в измерительной диагонали моста:

для омического датчика в одном плече моста

$$i_{gmax} = (0,010 - 0,015)I ; \quad (59)$$

и для дифференциального датчика

$$i_{gmax} = (0,02 - 0,03)I . \quad (60)$$

При работе с угольными датчиками сила тока в диагонали источника питания редко превышает 0,5а. Поэтому в цепи шлейфа, непосредственно включенного в измерительную диагональ моста, можно получить наибольшую силу тока порядка 10–15 ма. Такая

сила тока дает возможность применять на выходе моста шлейф с частотой собственных колебаний не более 4000 *гц*. Для шлейфов с большей частотой необходим ток до 100 *ма*. Такие шлейфы включаются в мостовую схему через усилитель постоянного тока, имеющий очень большое входное сопротивление R_g .

Умножая силу тока i_g на сопротивление R_g и пользуясь (57), найдем напряжение на входе усилителя, включенного в мост,

$$U_g = i_g R_g = \frac{1}{4} \cdot \frac{I}{\frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_g}} \cdot \frac{\Delta R}{R_0}. \quad (61)$$

Так как входное сопротивление усилителя R_g является весьма большим по сравнению с сопротивлением датчика R_0 , то, пренебрегая членом $\frac{1}{R_g}$ для напряжения на входе усилителя, вместо формулы (61) получим выражение

$$U_g = \frac{1}{4} U \frac{\Delta R}{R_0}, \quad (62)$$

где U – напряжение на входе моста (на диагонали источника тока), так как для равноплечего моста напряжение на его входе равно $U = I \cdot R_0$.

Формула (62) используется главным образом при расчете моста постоянного тока для работы с проволочными датчиками. При наибольшем относительном изменении сопротивления, проволочного датчика, равном 1,0% наибольшее напряжение на входе усилителя будет иметь величину порядка

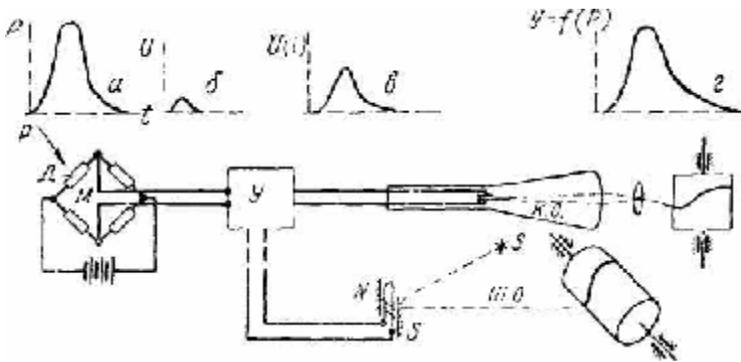
$$U_{gmax} \approx 0,0025U. \quad (63)$$

В зависимости от параметров проволочного датчика и от условий его применения на вход моста может подаваться напряжение до 10 *в*, нормально – $2 \div 3$ *в*. При этом значении напряжения на входе моста наибольшее напряжение на входе усилителя будет составлять 5–6 *мв*. Исходя из этой величины входного напряжения рассчитывают усилитель постоянного тока, чтобы на его выходе получать силу тока или напряжение, достаточное для приведения в действие шлейфового осциллографа (при высокочастотных шлейфах) или катодного осциллографа.

Кроме того, усилитель должен также обладать большой стабильностью работы и хорошими частотной, фазовой и амплитудной характеристиками, обеспечивающими правильное и точное воспроиз-

ведение измеряемой величины при передаче ее от моста к осциллографу. Очевидно, этому требованию должны удовлетворять все элементы электрической схемы тензоиндикатора. Это требование во многих отношениях определяет общую структуру схемы тензоиндикатора и ее конструктивное оформление.

Наиболее простой является схема тензоиндикатора с мостом, работающим на постоянном токе. Структура этой схемы приведена на фиг. 40. Действие ее состоит в следующем. Давление p , изменяющееся по некоторому закону (a), действует на омический датчик Д и вызывает изменение его сопротивления. Изменение сопротивления датчика преобразовывается мостовой схемой в малые по величине напряжения (b). Последние усиливаются усилителем постоянного тока У и в виде напряжения или тока (c) подаются к катодному (К.О) или шлейфовому (Шл.о) осциллографу, где и записываются в форме кривой (z), изображающей в некотором масштабе давление на датчик.



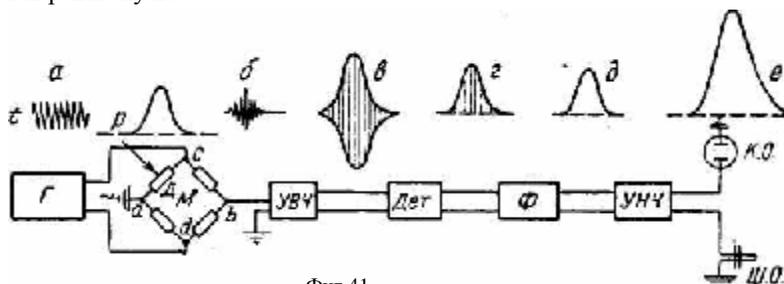
Фиг.40.

Приведенная схема с мостом, питаемым постоянным током, и с катодным осциллографом позволяет с достаточно высокой точностью регистрировать как медленно изменяющиеся нагрузки, например, при тарировании, так и очень кратковременные давления, возникающие в различных видах артиллерийского оружия. Эта схема вследствие недостаточной стабильности усилителей постоянного тока при их продолжительной работе требует обязательного тарирования непосредственно перед измерениями и в промежутках между ними, если эти измерения производятся несколько часов подряд. Отмеченный недостаток практически можно почти полностью устранить применением специальных схем для усилителя постоянного

тока с использованием электрометрических ламп на входе. Схема тензоиндикатора с мостом постоянного тока применяется главным образом в лабораторных исследованиях, где все условия работы тензоиндикатора могут строго контролироваться в процессе измерений.

В настоящее время при измерении давления пороховых газов тензометрическим методом предпочитают пользоваться измерительной схемой с мостом, работающим на переменном токе. Питание моста переменным током позволяет применять в схеме тензоиндикатора усилители переменного тока. Последние отличаются большей стабильностью в работе, чем усилители постоянного тока. Кроме того, усилители переменного тока в меньшей мере реагируют на различные внешние электромагнитные помехи. Все это повышает точность измерений и сокращает время их проведения.

Блок-схема тензоиндикатора с мостом на переменном токе показана на фиг.41. В этой схеме источником питания моста М, в одном из плеч которого находится проволочный датчик Д, является генератор Г переменного напряжения (a), постоянной амплитуды и высокой частоты, называемой несущей частотой моста. В начале измерений мост находится в уравновешенном состоянии, и поэтому в его измерительной диагонали между точками c и d разность потенциалов равна нулю.



Фиг. 41.

При действии давления на датчик Д равновесие моста нарушается, и между точками c и d возникает переменное напряжение ($б$) той же частоты, что и напряжение генератора несущей частоты, но измененное по амплитуде. Модуляция напряжения в измерительной диагонали моста, т. е. изменение амплитуды напряжения несущей частоты, происходит в результате изменения сопротивления проволочного датчика под действием на него давления. При этом величина амплитуды модулированного напряжения несущей частоты ($б$) на

выходе моста получается, пропорциональной изменению сопротивления датчика и, следовательно, величине давления, действующего на датчик.

Снимаемое с диагонали моста промодулированное напряжение (б) подается на усилитель высокой частоты (УВЧ). Усиленное напряжение (в) передается дальше на детектор (Дет.), где срезается нижняя часть модулированных колебаний, в результате чего напряжение принимает форму (г). Огибающая амплитуда этого напряжения выражает закон изменения давления, действующего на датчик. После детектирования напряжение поступает на фильтр (Ф), который отфильтровывает несущую частоту и пропускает только низкочастотное напряжение (д), имеющее форму огибающей колебаний несущей частоты. Это напряжение затем усиливается усилителем низкой частоты (УНЧ) и записывается катодным или шлейфовым осциллографом в форме кривой (е), изображающей в некотором масштабе закон изменения измеряемого давления. Вместе с записью кривой давления на осциллограмму наносятся при помощи различных устройств масштабные отметки времени и отметки, характеризующие отдельные моменты изменения давления.

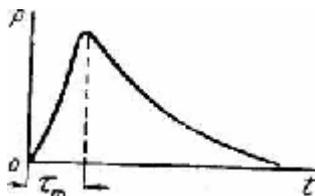
Рассмотренная схема тензоиндикатора, работающего по принципу амплитудной модуляции несущей частоты, позволяет измерять с точностью в 1–3% различные по характеру действия давления пороховых газов в артиллерийском оружии. Непременным условием точной регистрации измеряемых давлений по этой схеме является правильный выбор несущей частоты в зависимости от характера изменения давления во времени. Для того чтобы после детектора можно было выделить подаваемый датчиком сигнал, необходимо, чтобы его основная частота составляла 4–5% несущей, частоты. Опыт показывает, что при изменении быстро изменяющихся давлений пороховых газов достаточно, чтобы период колебаний несущей частоты был в 10–20 раз меньше возможной при измерениях наименьшей продолжительности нарастания давления до своего максимума, т. е. чтобы несущая частота была равна

$$f_{н.ч.} = \frac{10 \div 20}{t_m} \tau_{ц},$$

где τ_m – продолжительность нарастания давления до максимума (фиг. 42).

При измерении давлений с продолжительностью нарастания до максимума порядка 0,001–0,0005с. несущая частота должна лежать в пределах от 20000 до 40000гц, а в некоторых случаях и выше.

Осуществление тензоиндикатора с такой высокой несущей частотой связано с большими трудностями.



Фиг.42.

Трудности заключаются в том, что при практическом использовании тензоиндикатора обычно омический датчик находится вместе с оружием, в котором производится измерение давления, на некотором расстоянии от усилителя и регистрирующего устройства. Длина соединительного кабеля между датчиком и тензоиндикатором в

большинстве случаев измеряется несколькими десятками метров, а иногда и больше. Распределенная емкость длинного кабеля часто изменяет свою величину от сотрясений, от изменения расположения кабеля между окружающими предметами и от взаимодействия с различными близлежащими электрическими цепями. В конечном итоге все это влияет на работу тензоиндикатора, и всякое изменение емкости кабеля воспринимается им как изменение давления на датчик.

Для устранения этого недостатка необходима надежная компенсация влияния изменения емкости кабеля в процессе работы тензоиндикатора. При несущей частоте выше 10000гц емкостная балансировка тензоиндикатора становится затруднительной и приводит, помимо принятия специальных методов компенсации, к необходимости соблюдения однообразия расположения кабеля, исключения его вибрации, уменьшения внешних паразитных связей и других мер. Все это усложняет общую электрическую схему тензоиндикатора и работу с ним при измерениях, требуя более высокой квалификации обслуживающего персонала.

1.5.6. Тарирование тензоиндикатора

Тарирование тензоиндикатора производится так же, как и тарирование крешеров, упругого индикатора и пьезоиндикатора – статическими нагрузками. Тензоманометр нагружают рядом известных и последовательно возрастающих нагрузок и отмечают соответствующие им показания регистрирующего устройства тензоиндикатора. По полученным данным устанавливают численную или графическую зависимость между давлением на тензоманометр и показаниями тензоиндикатора. В большинстве случаев эта таражная зависимость является линейной, что достигается соответствующим подбором параметров схемы тензоиндикатора при его проектирова-

нии и изготовлении. Часто для повышения точности таражной зависимости тарирование производится постепенным нагружением тензодатчика и затем таким же разгрузением его. При этом показания, полученные при нагрузке, должны совпадать с показаниями при разгрузке. Несовпадение величин показаний свидетельствует о наличии гистерезиса в упругой системе тензодатчика или о возникновении остаточных деформаций проволоки датчика. Обе эти причины расхождения показаний тензоиндикатора должны быть устранены. В противном случае результаты измерений будут содержать значительные ошибки.

Установленная таким образом таражная зависимость служит для определения измеряемого давления по ординатам осциллограммы, получаемой в результате опыта.

Таражная зависимость может измениться в процессе длительной работы тензоиндикатора, поэтому тарирование рекомендуется производить до и после измерений, а иногда и в процессе измерений. Если при этом таражные кривые до и после опытов окажутся незначительно смещенными, то при обработке осциллограмм необходимо применять таражную кривую, построенную по средним результатам тарирования до и после опытов. На практике к такому способу исправления таражной зависимости прибегают редко, так как тщательная предварительная настройка тензоиндикатора, особенно работающего по принципу амплитудной модуляции, обеспечивает большую стабильность таражной зависимости в течение нескольких часов непрерывных измерений.

В случаях когда тензодатчик непосредственно наклеивают на деталь, деформации которой необходимо измерить, тарирование тензоиндикатора производят по вспомогательному датчику. Последний изготовляют точно таким же, как и основной датчик. Вспомогательный датчик наклеивают на эталонный образец в виде бруска равного сопротивления или балки на двух опорах, который подвергают статическим деформациям известными нагрузками. По показаниям тензоиндикатора и величинам деформаций контрольного датчика на эталонном образце строят таражную зависимость, которую и используют при работе с датчиком, прикрепленным к исследуемой детали.

1.5.7. Заключение

Тензометрический метод измерения давления пороховых газов в канале артиллерийского оружия нашел применение в практике баллистических исследований сравнительно недавно. Однако уже

имеющийся опыт показывает, что этот метод обладает достаточно высокой точностью измерений и обладает большими возможностями применения в самых разнообразных условиях экспериментальных исследований.

О положительных качествах тензометрического метода свидетельствуют результаты параллельных измерений различными методами одних и тех же давлений. По сравнению с крешерным методом тензометрический метод дает показания большие на 8–19%, в зависимости от величины и характера изменения давления. Примерно такие же результаты дают метод упругих деформаций и пьезоэлектрический метод. Расхождение в результатах измерений методом упругих деформаций, пьезоэлектрическим и тензометрическим методами колеблется в пределах 2–3%. Основным преимуществом тензометрического метода перед пьезоэлектрическим является возможность исключить влияние длинной линии, соединяющей объект исследования с усилительным и регистрирующим устройством. Последнее весьма важно в условиях полигонных испытаний. В лабораторных исследованиях при измерениях давлений пороховых газов в канале ствола или в манометрической бомбе оба эти метода практически равноценны. Но в более широких баллистических исследованиях, например, при изучении развития давления пороховых газов в газоотводных устройствах, в дульных тормозах, при врезании пояса в нарезы и др., тензометрический метод измерений имеет неоспоримые преимущества: высокую точность, а также чрезвычайно малые габариты и веса датчиков и тензоманометров. Удобство крепления тензодатчика в различных частях ствола и механизмов оружия без нарушения их целостности и нормальной работы позволяет охватить исследованием такие процессы, какие раньше оставались недоступными для изучения.

1.6. Индуктивный метод измерения давления

1.6.1. Принцип действия электромеханических ферромагнитных датчиков и преобразователей, классификация

В практике применяются разнообразные виды и исполнения электромеханических ферромагнитных датчиков. Выбор отдельных видов и исполнений определяется назначением устройства, условиями конструктивного сочетания датчика с другими элементами измерительного комплекта, а также техническими требованиями в

отношении точности, чувствительности и диапазона измерения и условий работы.

В дальнейшем изложении рассматриваются датчики для преобразования неэлектрической величины - перемещения – в электрическую и преобразователи электрического тока в перемещение.

В зависимости от принципа построения устройства различают следующие типы датчиков неэлектрических величин:

1. Индуктивные – работа которых определяется изменением индуктивных сопротивлений катушек, получающегося при перемещении подвижной части датчика–якоря.

Различают: ОИД – одинарные индуктивные датчики, состоящие из одного неподвижного магнитопровода с катушкой и подвижного якоря, и ДИД – дифференциальные индуктивные датчики, состоящие из двух магнитопроводов с отдельными катушками и подвижного якоря.

2. Дифференциально-трансформаторные датчики – ДТД, работа которых определяется изменением числа потокоцеплений между двумя системами катушек датчика при перемещении подвижного якоря.

3. Ферродинамические датчики – ФДД, основанные на возникновении э. д. с. в подвижной рамке, расположенной в переменном магнитном поле при ее смещении от нейтрали.

4. Магнитоиндукционные датчики – МИД, основанные на наведении э. д. с. в катушке при движении ее относительно постоянного магнитного поля.

К преобразователям ток–перемещение относятся:

1) магнитоэлектрические системы (МЭС), применяемые в случаях, когда требуется линейная зависимость величины перемещения X от силы тока I ;

2) ферродинамические системы (ФДС), применяемые в случаях, когда требуется зависимость

$$X = kI^2.$$

3) поляризованные системы (ПС), применяемые в случаях, когда требуется линейная зависимость углового перемещения от тока

$$\varphi = kI.$$

Указанные системы малопригодны для преобразования напряжения в перемещение, так как при неизменном напряжении значение э. д. с. системы зависит от температуры нагрева рабочих катушек.

1.6.2. Одинарные индуктивные датчики – ОИД

ОИД выполняются в виде устройства, состоящего из магнитопровода с катушкой и подвижного якоря, перемещающегося под действием внешних сил (фиг.43,а и б). В цепи катушки включается нагрузка R_H .

Сила тока в нагрузке

$$I = \frac{U_c}{Z} = \frac{U_c}{(R_k + R_H) + j\omega L},$$

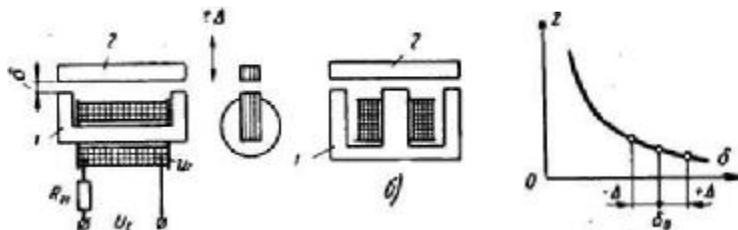
где R_k, R_H – омические сопротивления катушки и нагрузки;

L – индуктивность катушки.

Индуктивность катушки определяется из соотношения

$$L = \frac{w^2}{R_m} [\text{гн}],$$

где R_m – магнитное сопротивление для магнитного потока.



Фиг.43. Одинарные индуктивные датчики.

a – П-образный магнитопровод; b – Ш-образный магнитопровод;

2 – якорь; δ – характеристика $z = f(\delta)$.

В магнитных системах, имеющих воздушные зазоры, падение магнитного потенциала в стали во много раз меньше падения потенциала в зазорах. Практически при средней длине магнитной линии в стали l_c и суммарной длине зазоров 2δ при условии, что

$$200\delta < l_c,$$

пренебрегают падением магнитного потенциала в стали. При расчетах обычно пользуются проводимостью воздушных зазоров G , величиной, обратной R_m , и индуктивность катушки определяют из соотношения

$$L = w^2 G [\text{гн}].$$

Величина G зависит от площади полюса S и длины зазора:

$$G = \mu_0 \frac{S}{2d},$$

где μ_0 – магнитная постоянная.

Таким образом, с изменением длины зазора при перемещении якоря относительно магнитопровода изменяется индуктивность катушки, а следовательно, и ток в нагрузке.

Зависимость полного сопротивления катушки от зазора $z=f(\delta)$ приведена на фиг.43,в.

ОИД обладают рядом недостатков:

а) сила тока в катушке изменяется при колебаниях напряжения и частоты сети;

б) на кривой $z=f(\delta)$ можно выделить лишь небольшой участок $2\Delta \leq 0,1 \delta_0$ с приближенной линейной характеристикой;

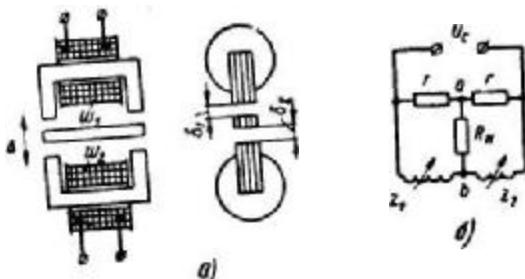
в) на якоре датчика возникают значительные силы, определяемые потоком Φ_p магнитной системы в рабочих зазорах между полюсами и якорем. Эти силы, действуя на контролируемую деталь, перемещение которой передается якору, могут изменить положение детали, что вносит искажения в измерения. Указанные недостатки ограничивают область применения ОИД.

1.6.3. Дифференциальные индуктивные датчики – ДИД

ДИД выполняются в виде системы, состоящей из двух магнитопроводов с общим якорем и двумя катушками.

По форме магнитной системы различают ДИД: плоские – с магнитопроводом плоской формы, набранным из листов электротехнической стали, и цилиндрические – со сплошным магнитопроводом круглого сечения. Выбор той или другой формы определяется конструктивными условиями сочетания датчика и контролируемого устройства.

Плоские ДИД – фиг. 44,а. При среднем положении якоря на одинаковом расстоянии от обоих магнитопроводов воздушные зазоры равны, т. е. $\delta_1 = \delta_2 = \delta_0$.



Фиг. 44. Дифференциальный индуктивный датчик.
а – магнитная система; б – схема включения.

Магнитные проводимости системы и индуктивности катушек w_1 и w_2 равны друг другу. При смещении якоря на величину Δ , например, вверх увеличивается проводимость, а следовательно, и индуктивность верхнего магнитопровода и уменьшается нижнего:

$$L_1 = w_1^2 G_1, \quad L_2 = w_2^2 G_2, \quad L_1 > L_2.$$

катушки включаются в мостовую схему (фиг. 44,б), два других плеча моста выполняются в виде омических сопротивлений r . При равенстве рабочих зазоров ($\delta_1 = \delta_2$) мост находится в равновесном состоянии и разность потенциалов между точками a и b равна нулю. При смещении якоря от нейтрали появляется выходное напряжение U_{ab} и в на грузке R_c протекает ток. Фаза выходного напряжения изменяется на 180° при прохождении якорем нейтрального положения.

Цилиндрические датчики (фиг. 45). Магнитопровод датчика выполняется в виде цилиндрической трубки, играющей роль ярма с двумя крышками, якорь также имеет цилиндрическую форму. Для увеличения проводимости между наружным ярмом и якорем по середине цилиндра (на линии MN) устанавливается диск из ферромагнитного материала. Катушки датчика – w_1 и w_2 расположены по обе стороны диска. Как правило, датчик выполняется так, что $w_1 = w_2$.

Индуктивность каждой из катушек определяется магнитопроводимостью для потоков: Φ_1 – в верхней части магнитопровода и Φ_2 – в нижней. Каждый из этих потоков состоит из двух частей: Φ_o , замыкающийся по торцам якоря к крышкам цилиндра, и Φ_y , замыкающийся по периметру якоря к периметру цилиндра:

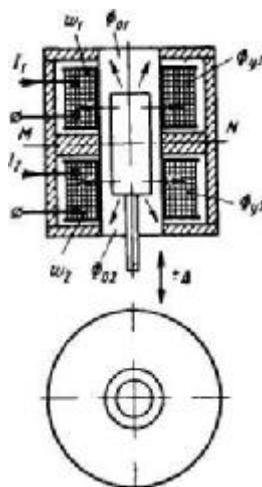
$$\Phi_1 = \Phi_{o1} + \Phi_{к1}; \quad \Phi_2 = \Phi_{o2} + \Phi_{y2}.$$

Магнитная проводимость системы:

$$G_1 = G_{o1} + G_{y1}; \quad G_2 = G_{o2} + G_{y2}.$$

При симметричном расположении якоря в магнитопроводе магнитные проводимости обеих частей системы равны друг другу

$$G_1 = G_2.$$



Фиг. 45. Дифференциальный индуктивный датчик цилиндрической формы.

При смещении якоря, например, вверх увеличивается значение G_1 и уменьшается значение G_2 .

Индуктивность катушек

$$L_1 = w_1^2 G_1, \quad L_2 = w_2^2 G_2$$

также изменяются.

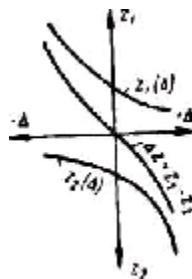
На фиг.46 приведены характеристики ДИД:

$$\Delta z = z_1 - z_2 = f_3(\Delta),$$

$$z_1(\Delta), \quad z_2(\Delta).$$

где Δ – смещение якоря от положения равновесия.

По сравнению с ОИД дифференциальные датчики обладают некоторыми преимуществами: линейная часть характеристики Δz получается на большем участке, уменьшается электромеханическая сила на якоре, так как в дифференциальных системах она является разностью сил притяжения якоря к первому и второму магнитопроводам. Выходное напряжение схемы U_{ab} (фиг. 44) зависит от напряжения и частоты сети меньше, чем в ОИД; в частности, нулевая точка характеристики (при среднем положении якоря) не смещается при колебаниях напряжения.



Фиг.46.

Характеристики ДИД

На основе рассмотренных принципов разработаны индуктивные датчики давления (ИДД).

Индуктивные преобразователи чаще всего включаются в мостовую схему, питаемую переменным током с частотой 50гц. (промышленная сеть), в отдельных случаях применяется ток с частотой 400гц., 500гц. (бортовая сеть).

В последнее время нашли применение индуктивные измерители на более высокой несущей частоты (10 ÷ 40кгц.) отдельного («задающего») генератора.

По величине несущей частоты индуктивные измерители делятся на три группы:

- а) низкочастотные измерители, с несущей частотой 50 ÷ 1000гц.
- б) среднечастотные измерители, с несущей частотой 1 ÷ 10кгц.
- в) высокочастотные измерители с несущей частотой 10 ÷ 50кгц.

В основе работы датчиков лежит измерение малых перемещений, возникающих под влиянием изменений измеряемого давления.

Особенностями низкочастотных индуктивных измерителей являются сравнительно большие изменения начального параметра датчика и значительная величина подводимой к нему мощности, которая в $10\div 100$ раз превышает мощность, подводимую к датчикам других типов, например, к тензометрическим. Это позволяет использовать низкочастотные индуктивные измерительные устройства без применения усилителей.

ИДД имеют большую механическую прочность, надежность, стабильность в работе, хорошую линейность и помехоустойчивость (кроме воздействия сильных магнитных полей непосредственно на датчик), длительность эксплуатации и сравнительно низкую стоимость изготовления. Они нашли широкое применение в системе производственного контроля, особенно для линейных измерений и применялись долгое время для измерения давления при стендовых испытаниях изделий.

Низкочастотные индуктивные измерители переменных давлений из-за ограниченности их частотных характеристик в настоящее время при стендовых испытаниях не применяются. Вместо них используются ИДД на несущей частоте 10кГц. Они сохранили преимущества низкочастотных индуктивных измерителей (механическую прочность, помехоустойчивость, стабильность во времени др.), но с повышением несущей частоты необходимо вводить промежуточный усилитель.

Особенность ИДД состоит в том, что мембрана, воспроизводящая давление, является одновременно участком магнитной цепи датчика и изготавливается из одного куска стали совместно с корпусом.

Динамические характеристики датчика определяются собственной частотой мембраны, которая достаточно высокая (более 20кГц.).

При прогибе мембраны под давлением меняется как индуктивность, так и активное сопротивление рабочего плеча датчика. Степень влияния активного сопротивления сильно возрастает с частотой. Поэтому ИДД, работающие на несущей частоте 10кГц. и более, правильнее было бы называть индуктивно-активными измерителями.

К существенным недостаткам ИДД следует отнести значительную чувствительность датчика к изменениям температуры (что свойственно датчикам и других типов) и их чувствительность к сильным электромагнитным полям, воздействующим непосредственно на датчик.

Положительные характеристики лучших современных образцов измерителей ИДД таковы:

- а) высокая стабильность во времени и при изменениях напряжения питающей сети, высокая помехоустойчивость;
- б) достаточно хорошие динамические характеристики;
- в) универсальность в отношении измерений (давление, перепад давления, виброускорения, перемещения, силы).

1.7. Емкостный метод измерения давления

Емкостный датчик в общем случае представляет собой одну или несколько емкостей с изменяющимися параметрами.

Величина емкости между двумя параллельными пластинами определяется формулой

$$C = \frac{\epsilon S}{d},$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость;

S – площадь перекрытия двух пластин, $см^2$;

d – расстояние между ними, $мм$;

C – значение емкости, пф ($10^{-12} \phi$);

Для воздуха с достаточной степенью точности $\epsilon = 1$.

Емкостные преобразователи могут быть использованы при измерении различных неэлектрических величин, функционально связанных либо с ϵ , либо с S , либо с d , либо с диэлектрическими потерями конденсатора.

Емкость C в цепи переменного тока создает сопротивление

$$x_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{d}{\omega \epsilon S},$$

которое линейно зависит от расстояния d , (ω – угловая частота $\omega = 2\pi f$). Зависимость $C(d)$ имеет гиперболический вид (аналогично $z(\delta)$ для индуктивных датчиков), поэтому в цепях, где измеряется непосредственно емкость конденсатора, необходимо выбирать линейный участок характеристики. Уменьшение воздушного зазора d ограничено опасностью пробоя этого промежутка.

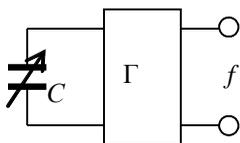
Емкостные датчики можно разделить на две основные группы – датчики параметрические (недифференциальные) и датчики дифференциальные (последние чаще всего применяются для измерения малых перемещений).

В схемах с параметрическими датчиками происходит преобразование входной неэлектрической величины (угла поворота оси рото-

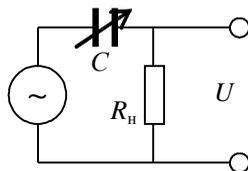
ра датчика) в электрическую выходную величину (частоту, ток, напряжение), функционально зависящую от входной величины.

В схемах с дифференциальными датчиками, включенными в следящие системы, с датчика снимается лишь сигнал рассогласования, который становится равным нулю в установившемся состоянии следящей системы.

Примером параметрического емкостного датчика может служить переменная емкость, включенная в контур генератора (фиг. 47).



Фиг.47. Емкостный датчик, включенный в контур генератора



Фиг.48. Емкостный датчик, включенный в цепь переменного тока

Здесь при изменении угла поворота оси ротора изменяется емкость датчика и меняется частота генератора, являющаяся выходной величиной.

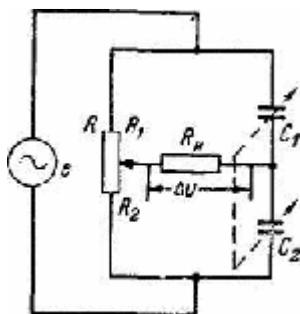
На фиг. 48 приведен другой пример использования параметрического датчика. В этом случае с изменением значения емкости C меняется ток через нее, а следовательно, напряжение на выходе системы, падающее на сопротивлении нагрузки R_n , которое и является выходной величиной. Подобные системы являются разомкнутыми системами регулирования. Основным недостатком этих схем является зависимость значения выходной величины от параметров источника питания датчика, усилителя и других элементов схемы, а также от внешних условий. В самом деле, стоит измениться напряжению или частоте генератора, питающего датчик (фиг. 48), как напряжение, частота и фаза, являющиеся выходными величинами и снимаемые с сопротивления R_n , также изменятся.

От этих недостатков свободны схемы с дифференциальными емкостными датчиками, включенными в замкнутую, систему автоматического регулирования. В этих схемах выходной величиной является угол поворота оси обрабатываемого двигателя или другой оси, связанной с ней через редуктор. Одной из основных характеристик такой системы является чувствительность, показывающая, при ка-

ком минимальном отклонении чувствительного элемента система обработки приходит в действие. Внешние факторы – напряжение питания, температура окружающей среды и т. п. – влияют лишь на чувствительность системы; на точность системы они могут влиять лишь в той мере, в какой она связана с чувствительностью.

Это значит, что схемы с емкостными дифференциальными датчиками, так же как и любые мостовые нулевые схемы с линейными относительно частоты и напряжения сопротивлениями в плечах, предъявляют значительно меньшие требования к стабильности источника питания.

В простейшем случае дифференциальный емкостный датчик представляет собой две последовательно включенные емкости, построенные конструктивно таким образом, что при увеличении одной из них другая уменьшается. Эти две емкости могут быть включены в мостовую схему (фиг. 49), где два других плеча – реостатные. Если при этом напряжение, снимаемое с диагонали моста, использовать в качестве сигнала для следящей системы, перемещающей щетку потенциометра R в сторону уменьшения несогласования, то всегда в установившемся состоянии следящей системы это напряжение $\Delta u=0$. В этом случае справедливо соотношение



Фиг.49. Мостовая схема с емкостным дифференциальным датчиком

$$\frac{U_{R1}}{U_{R2}} = \frac{U_{C1}}{U_{C2}} = \frac{Ix_{C1}}{Ix_{C2}} = \frac{1}{wC_2} = \frac{C_2}{C_1} = \frac{S_2 d_1}{S_1 d_2}$$

Отсюда следует, что в схемах с дифференциальными емкостными датчиками с воздушным диэлектриком показания обрабатывающего органа (например, положение стрелки указателя) не зависят ни от состава газа, ни от наличия в нем влаги (не выпадающей в виде капель), так как для обеих емкостей, составляющих дифференциальный датчик, ϵ меняется одинаково. Для недифференциальных же схем такое влияние может наблюдаться, хотя и в небольших пределах, так как для воздуха с влажностью 0% $\epsilon = 1,0006$, а для воздуха с

влажностью 100% при $t = +20^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 1,0008$. В этих схемах эта величина составит соответственно погрешность примерно 0,02%, в то время как от некоторых систем с емкостными дифференциальными датчиками удастся добиться более высокой точности.

Для измерения давления применяются параметрические (недифференциальные) датчики. Схема датчика приведена на фиг. 50.

Малые изменения емкости преобразуются в электрическое напряжение и усиливаются.

Собственная частота датчика определяется характеристиками мембраны и во всех случаях она более 20 кГц.

Емкостные преобразователи работают, как правило, на несущей частоте (более 100кГц), что обеспечивает им хорошие динамические характеристики.

При работе на достаточно высоких частотах могут быть применены датчики с очень небольшой емкостью ($10 \div 50\text{нф}$). В этом случае изменение емкости даже на несколько пикофард существенно меняет реактивное сопротивление измерительной схемы датчика. Это изменение при работе датчика в настроенном контуре генератора вызывает изменение и частоты контура. Частота легко фиксируется с помощью измерительных приборов.

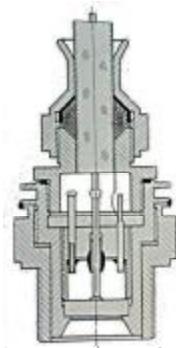
Известно много способов преобразования изменений емкости в напряжение (или ток). Наибольшее распространение нашли:

- а) специальные мостовые схемы;
- б) резонансные схемы с использованием принципа амплитудной модуляции;
- в) схемы, работающие на принципах частотной или фазовой модуляции.

Емкостные датчики обычно работают на звуковых и радиочастотах и в последнее время чаще всего в системах с частотной модуляцией.

При дистанционном измерении давления при разработке измерителя особое внимание необходимо уделять так называемой «проблеме кабеля», т.е. ослаблению влияния паразитных изменений его емкости, сопротивления и индуктивности («кабельного эффекта»).

Для емкостных измерителей «проблема кабеля» особенно важна, т.к. начальная емкость датчика ($C_0 = 10 \div 50\text{нф}$) и ее изменение при работе датчика обычно во много раз меньше собственной емкости кабеля ($C \approx 100\text{нф/метр}$).



Фиг. 50

В зависимости от решения «проблемы кабеля» емкостные измерительные системы можно разбить на пять групп:

а) с выносным датчиком и специальным соединительным кабелем; (например, двухэкранным), в этом случае начальная емкость кабеля не суммируется с начальной емкостью датчика;

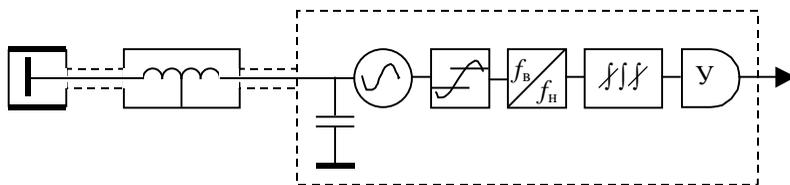
б) с выносным контуром, заделанным в датчик;

в) с выносным контуром и выносным датчиком (по отношению к контуру) – в этом случае датчик соединяется с контуром коротким отрезком кабеля (длиной до 1 метра);

г) с выносным генератором, заделанным в датчик;

д) с выносным генератором и выносным датчиком (по отношению к генератору) – в этом случае датчик соединяется с генератором коротким отрезком кабеля.

Наибольшее распространение нашли емкостные преобразователи, указанные в пункте в), а среди них емкостные преобразователи типа ИЧМ и ИФМ с датчиками ДД-1 и аналогичными.



Фиг. 51. Схема емкостного измерителя с частотной модуляцией (ИЧМ).

Способ частотной и фазовой модуляции обладает повышенной помехоустойчивостью по сравнению со схемами амплитудной модуляции.

Особенности всех датчиков, работающих с ИЧМ и ИФМ индикаторами:

а) малая величина начального зазора ($\approx 0,02\text{мм}$);

б) большая величина паразитных емкостей внутренних электродов датчика, разъемов и отрезка кабеля (до выносного контура), подсоединенных параллельно рабочей емкости датчика;

в) относительно большое ($\approx 20\div 30\%$) изменение зазора (емкости), что понижает требование к чувствительности преобразователя и позволяет несколько улучшить его стабильность и температурные характеристики датчика, но в это же время приводит к повышенной нелинейности датчика.

Малый начальный зазор в датчике создает технологические трудности при его изготовлении.

Применение емкостных датчиков при стендовых испытаниях изделий в настоящее время снизилось. Это вызвано:

а) эксплуатационными неудобствами от сильной нелинейности тарировочной кривой;

б) недостаточной механической надежностью датчика и ограниченностью его срока службы, что недопустимо при массовом применении.

Емкостные измерители давления, несмотря на перечисленные недостатки, могут весьма эффективно применяться при решении отдельных частных задач, связанных с регистрацией высокочастотных пульсаций.

1.8. Применение ЭВМ для автоматизации измерений динамических давлений

Развитие новой техники предъявляет повышенные требования к методикам расчета, скорости получения и достоверности результатов натурального эксперимента. По мере непрерывного усложнения техники объемы испытаний и измерений в испытаниях возрастают, а обработка результатов измерений усложняется, часто она должна осуществляться в реальном масштабе времени по алгоритмам, зависящим от получаемой измерительной информации, от результатов сравнения численного и натурального экспериментов. Справиться с решением указанных задач можно лишь с применением вычислительной техники, мощного системного и программного обеспечения, наличие исследователей, хорошо владеющих методами постановки и проведения численного и натурального экспериментов на базе ЭВМ. Автоматизация научных исследований, возникшая более 40 лет назад, превратилась в настоящее время в отдельную отрасль. Автоматизация экспериментальных исследований на базе использования ЭВМ принадлежит к наиболее перспективным путям повышения эффективности труда научных и инженерно-технических работников. За первые 10 лет (1963–1973гг.) малые ЭВМ прошли эволюцию трех поколений и являются к настоящему времени основой для дальнейшего прогресса в области измерительной техники. ЭВМ превратились в самый массовый и дешевый класс вычислительных машин и обеспечили возможность с большой эффективно-

стью автоматизировать с малыми затратами ресурсов даже небольшие исследовательские установки.

1.8.1. Применения цифровых методов и средств для измерения динамических давлений.

Цифровые измерительные приборы осуществляют преобразование непрерывной (аналоговой) входной измеряемой величины в дискретную (цифровую) выходную величину в виде цифрового кода. Высокие быстродействие и точность преобразования, широкий диапазон измерений при высокой разрешающей способности, широкие возможности автоматизации обработки, отображения и регистрации измерительной информации – все это обуславливает широкое применение цифровых измерительных средств в различных отраслях техники. К числу главных преимуществ оперирования с дискретными величинами относится высокая помехоустойчивость и достаточная оперативность действий при выполнении последующих этапов преобразования. Помимо высоких метрологических характеристик и автоматического характера измерительного цикла цифровые измерительные средства отличаются высоким быстродействием и удобством передачи результатов измерений на расстояние, непосредственно в ЭВМ или в регистраторы для последующей обработки.

1.8.2. Аналого-цифровые преобразователи

Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) устройство, осуществляющее преобразование непрерывно изменяющейся во времени аналоговой величины в цифровой код известной разрядности. Количественная связь между аналоговой величиной $A(t_i)$ и соответствующей ей цифровой величиной $N(t_i)$, для любого момента времени t_i определяется соотношением

$$N(t_i) = \frac{A(t_i)}{\Delta A} \pm dN(t_i)$$

где ΔA – шаг квантования, величина кванта по уровню, аналоговый эквивалент единицы младшего разряда кода (цена разряда):

$\delta N(t_i)$ – погрешность преобразования на данном шаге.

Переход от непрерывного сигнала к дискретному приводит к его округлению. Такая замена точного значения величины сигнала приближенным дискретным значением называется квантованием по уровню, или дискретизацией. Два ближайших разрешенных значения различаются на величину кванта. Величина кванта по уровню

связана с диапазоном измерения входной величины и числом двоичных разрядов n в выходном коде АЦП по формуле

$$\Delta A = \frac{X_{\max} - X_{\min}}{2^n}.$$

При неизменном диапазоне измерений ($X_{\max} - X_{\min}$) входной величины увеличение числа разрядов АЦП приводит к уменьшению кванта и уменьшению погрешности из-за квантования по уровню. Погрешность квантования имеет максимальное абсолютное значение

$$d_{\text{кв}} = \frac{\Delta A}{2}.$$

Средняя квадратичная погрешность квантования определяется по формуле

$$d_{\text{кв}} = \frac{\Delta A}{2\sqrt{3}}.$$

АЦП обеспечивает квантование входной величины как по уровню, так и во времени. Квантование по времени в АЦП обусловлено тем, что для выполнения заданного цикла измерений необходимо определенное время и только после его окончания возможен прием для обработки новых исходных данных.

Инструментальная составляющая погрешности АЦП появляется из-за шумов, помех во входном сигнале.

Динамическая составляющая погрешности АЦП обусловлена инерционностью элементов, участвующих в передаче сигнала от входа к выходу АЦП, и изменением входной величины в процессе преобразования. Это и приводит к возникновению динамических погрешностей дискретизации.

Быстродействие АЦП и его динамические параметры определяются характеристиками:

периодом квантования – временем между двумя последовательными преобразованиями. Величина, обратная периоду квантования, – это частота квантования;

длительностью цикла преобразования – задержкой между подачей входной величины на выход АЦП и моментом выдачи кода;

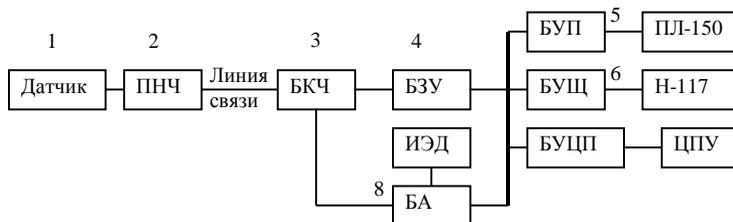
временем преобразования – интервалом, в течение которого входной сигнал непосредственно взаимодействует с АЦП;

аппаратурным временем случайной составляющей погрешности датирования (неопределенность между моментами выборки и времени, к которому она относится).

АЦП входят в качестве составной части в различные системы и устройства. В системах измерения динамических давлений АЦП является промежуточным преобразователем между датчиком и ЭВМ.

1.8.3. Системы цифровой регистрации динамических давлений

Одной из первых отечественных цифровых систем для регистрации динамических давлений явилась разработанная в 1970г. в НИИПММ при Томском госуниверситете система ЧАРД-1 (частотная аппаратура регистрации давления) Система состояла (фиг.52):



Фиг.52. Система ЧАРД

- пьезорезистивного (или тензометрического) датчика давления 1;
- блока кодирования частоты 3;
- буферного запоминающего устройства 4;
- блоков согласования с ленточным перфатором 5;
- осциллографом 6;
- выделения максимума давления и автоматики 8.

В основе работы этой системы был заложен частотный принцип преобразования информации и использование буферных ЗУ.

Другое направление развивалось в Рязанском радиотехническом институте под руководством проф. А.М. Беркутова – создание цифровых осциллографов. В основе работы цифровых осциллографов лежит использование на входе быстродействующих АЦП, записи цифровых кодов (результатов АЦП преобразований) в полупроводниковое ЗУ и вывод информации из ЗУ на ЭВМ или панель индикации, отражающую динамику сигнала, подаваемого на вход. Использование цифровых устройств позволило увеличить точность измерений, применение БЗУ создало широкие возможности для детального исследования сигнала после опыта, включая варьирование масштабами по времени и амплитуде. Цифровые осциллографы в нескольких модификациях успешно используются для измерения

динамических давлений в комплекте с различными датчиками. На основе этих работ созданы и переданы в серийное производство цифровые осциллографы типа С9-5 и С9-6.

Третий путь применения цифровых систем для измерений динамических давлений – применение международной системы автоматизации научных исследований КАМАК. Универсальная модульная система КАМАК (Computer Applications for Measures and Control) была разработана в 1965 г. для автоматизации экспериментов в области ядерной физики, но идеология её построения оказалась настолько удачной, что вскоре КАМАК стал универсальной системой для многих других областей науки и техники. Система КАМАК достаточно независима и может работать без вмешательства ЭВМ. Тем не менее, основное назначение системы КАМАК – это совместная работа с ЭВМ, для чего контроллер подключается к её системе ввода-вывода.

Из зарубежных разработок цифровых систем для регистрации динамических процессов наилучшие результаты получены фирмой «Data Laboratories Limited» (Англия) при создании системы быстродействующих регистраторов «Datalab» типа DL 901 DL 2800. Быстродействующие регистраторы фирмы «Datalab» предназначены для регистрации параметров одиночных импульсов.

Современные цифровые системы позволяют преодолеть основной их недостаток за счет уменьшения шага дискретизации входного сигнала. Другими словами тот интервал времени, в который АЦП осуществляет преобразование, достаточно мал, и тем самым можно обеспечить требуемую точность. Тогда как аналоговые системы этого недостатка не имеют, они непрерывно воспринимают входной сигнал.

1.8.4. Состав и структура автоматизированной системы измерения динамического давления

Рассмотрим принцип функционирования традиционной системы измерения.

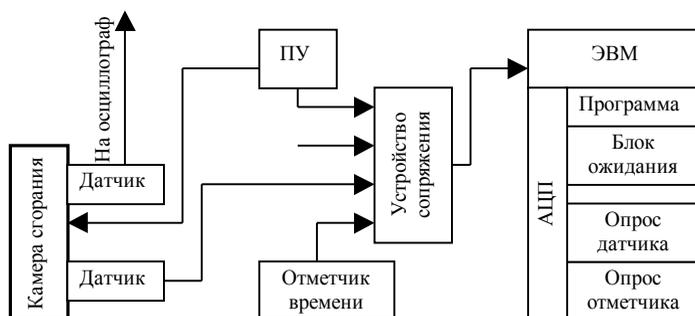


Фиг.53. Традиционная система измерения.

К объекту исследования подсоединяется датчик давления. Сигналы с датчика в виде напряжения пропорционального давлению усиливаются посредством усилителя и поступают на входы элек-

тронного или светолучевого осциллографа. Результат измерения можно визуально наблюдать на экране электронного осциллографа. Для того чтобы зафиксировать результат нужно иметь запоминающий осциллограф, но в памяти будет только один фрагмент в определенный момент времени. Для последующего анализа процесса необходимо будет нанести результат на какой-то носитель, например, на фотобумагу, посредством съемки экрана осциллографа фоторегистратором. В случае же использования системы со светолучевым осциллографом процесс измерения аналогичен, то есть и здесь, чтобы получить результат, необходимо проявлять фотобумагу.

Один из вариантов схемы подключения установки к автоматизированной измерительной системе представлен на фиг.54.



Фиг.54. Принципиальная схема устройства для автоматизированного измерения динамического давления

Для фиксации давления используется, например, пьезоэлектрический датчик ЛХ-601 с собственной частотой 30 кГц. Эта частота должна не менее чем в 7 раз превосходить частоту самого процесса. То есть процесс должен протекать до частот 3–4кГц.

Устройство согласования выполнено в виде простого конденсатора емкостью 2200 *пф*. Данная емкость подбирается экспериментально.

Состав схемы фиг.54 включает в себя следующие элементы:

- Пульт управления (ПУ);
- Камера сгорания;
- Датчик (ЛХ-601);
- Устройство сопряжения с АЦП;
- Отметчик времени;
- ЭВМ.

Рассмотрим назначения элементов системы. Процесс, происходящий в камере сгорания, является объектом исследования. Максимальная частота процесса составляет порядка 1000 Гц. Датчик герметично ввернут в камеру и с помощью чувствительной мембраны позволяет преобразовать давления в электрический заряд.

Пульт управления предназначен для запуска установки и синхронизации процесса сжигания с началом работы программы ЭВМ.

Устройство сопряжения необходимо для электрического соединения датчика с ЭВМ. На плате расположен инструментальный усилитель, позволяющий увеличить уровень сигнала с датчика. Коэффициент усиления выбирается пользователем. Так же на плате предусмотрен АЦП необходимый для перевода сигнала из аналоговой формы в цифровую.

В качестве отметчика времени используется калибровочный генератор осциллографа. Генератор вырабатывает меандр амплитудой 1в и частотой 1 кГц, выполняет функцию определения времени длительности процесса.

В ЭВМ функционирует программа, структура которой, построена как набор определенных блоков, решающих определенную задачу. Блочная структура позволяет использовать разные языки программирования, но совместимые между собой. Запуск АЦП программный, от внутреннего генератора и внешний.

Бланк испытаний в форме таблицы значений «давление-время» в размерных физических величинах или оцифрованного графика автоматически печатается по запросу оператора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая часть «Экспериментальной баллистики» посвящена описанию основных методов измерения давления пороховых газов, используемых как в лабораторных так и в полигонных испытаниях различных систем оружия.

При описании методов дано физическое обоснование, основные принципы конструкции датчиков и системы регистрации сигналов с них.

Важное значение имеет оценка точности полученных экспериментальных данных. Для этого рассмотрен вопрос о частотных характеристиках процесса и методика правильного выбора аппаратуры для регистрации давления во время выстрела.

Все методы (кроме метода пластических деформаций) основаны на упругих деформациях (или преобразованиях их в различные электрические величины), поэтому рассмотрена приближенная теория метода упругих деформаций, которая позволяет определить максимальное значение инерционной погрешности и найти пути её уменьшения.

В настоящее время стали автоматизировать баллистические испытания. Для этого используют ЭВМ, которая связывается со стреляющей установкой, и по полученному из опыта давлению сразу можно решать различные задачи теории внутренней баллистики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ацюковский В.А. Емкостные дифференциальные датчики перемещений. Госэнергоиздат, М-Л. 1960.
2. Волков В.П., Кузьмин В.А., Медведева Н.П., Ревягин Л.Н. Сборник лабораторных работ по внутренней баллистике. Изд-во Томского университета. 1961.
3. Ермонский И.М. Аппаратура экспериментальной баллистики. М. 1955.
4. Зарипов М.Ф., Петрова И.Ю. «Энергоинформационный метод анализа и синтеза чувствительных элементов систем управления». «Датчики и системы», 1999, №5.
5. Крылов А.М. О некоторых дифференциальных уравнениях математической физики. Гостехиздат, М-Л. 1950.
6. Петрова И.Ю., Шиккульская О.М. «Универсальная структурно-параметрическая модель плоской мембраны». «Датчики и системы», 2000, №2, с.14-16.
7. Ратанов Г.С. Методы и средства измерений динамических давлений. Изд-во Томского университета. 1986.
8. Ступель Ф.А. Электромеханические датчики и преобразователи неэлектрических величин. Изд-во «Энергия», М-Л. 1965.
9. Туричин А.М. Электрические измерения. Госэнергоиздат, М-Л. 1961.
10. Туричин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. Госэнергоиздат, М-Л. 1955.
11. Шкворников П.Н., Платонов Н.М. Экспериментальная баллистика. Изд-во Оборонной промышленности. М. 1953.
12. Полупроводниковые тензодатчики. /Под ред. М. Дина/. Изд-во «Энергия», М-Л. 1965.
13. Электрические измерения. Под ред. А.В. Фремке. Госэнергоиздат, М-Л. 1963.
14. Электрические измерения неэлектрических величин. /Под ред. проф. д.т.н. П.В. Новицкого/. 1975.