

А. А. АШРАБОВ, Ч.С.РАУПОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

**ГАЗК «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО**

ТРАНСПОРТА

А. А. АШРАБОВ, Ч.С.РАУПОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ
ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

Часть I

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

для магистров специальностей

5A580212 –Мосты и транспортные тоннели,

5A580603–Эксплуатация мостов и транспортных тоннелей,

5A580204–Проектирование и строительство зданий и сооружений

Ташкент – 2007

УДК 69.058(075.8)

В учебном пособии приведены основные сведения по экспериментальным основам и методологии статических и динамических испытаний конструкций и элементов зданий и сооружений. Изложены основы теории планирования эксперимента, основные положения метрологии и стандартизации измерений в строительстве, даны конструктивные и технические особенности измерительных средств и приборов. В книге подробно освещены средства и современные практические методы проведения статических испытаний материалов и строительных конструкций зданий и сооружений.

Книга предназначена для студентов и аспирантов строительных ВУЗов и факультетов и может быть использована специалистами научных и строительных организаций в их практической деятельности.

Рекомендовано к печати учебно-методической комиссией института.

Рисунки – 64; таблицы –5; библиографии – 9 наим.

Составители: **А. А. Ашрабов**, д.т. н, проф., **Ч.С.Раупов**, к.т.н., доц.

Рецензенты: **А.А.Ишанходжаев** – д.т.н., проф. каф. «Мосты и транспортные тоннели» Ташкентского автомобильно-дорожного института;

Н. А. Красин – к.т.н., доц. каф. «Строительные конструкции, мосты и сооружения» ТашИИТ.

© Ташкентский институт инженеров
железнодорожного транспорта , 2007 г.

I. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ ПРОВЕДЕНИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ

1. Методология экспериментальных исследований

Задачи и общие методы обследования и испытания сооружений. В условиях ускорения научно-технического прогресса происходит интенсивное совершенствование различных технологических процессов. Это влечет за собой замену устаревшего оборудования на новое, высокопроизводительное, работающее на более высоких скоростях, что может привести к повышению нагрузок, передаваемых на строительные конструкции, изменению архитектурно-планировочных решений эксплуатируемых сооружений. Реконструкция зданий и сооружений, приведение уровня их надежности к современным требованиям также обуславливают необходимость оценки их действительного состояния. Требования реконструкции сооружения, а также длительный физический износ, вынужденные изменения режима нагрузок, последствия различных повреждений, перенесенных землетрясений и других стихийных бедствий, аварий и катастроф ставят перед инженерами-строителями задачу оценки состояния строительных конструкций зданий и сооружений, выявление возможностей их дальнейшей эффективной эксплуатации. Решение поставленных задач тесно связано с обследованием и испытанием конструкций и сооружений, результаты которых позволяют подготовить соответствующие рекомендации. На их основе проектировщики разрабатывают необходимые конструктивные решения. Обследование строительных конструкций состоит из трех основных этапов:

1) *первоначальное ознакомление* с проектной документацией, рабочими и исполнительными чертежами, актами на скрытые работы; ознакомление с проектной и исполнительной документацией позволяет дать оценку принятым конструктивным решениям, выявить элементы сооружений, работающие в наиболее тяжелых условиях, установить значения действующих нагрузок.

2) *визуальный осмотр* объекта, установлений соответствия объекта проекту, выявление видимых дефектов (наличие трещин, протечек, отслоений защитного слоя в железобетонных элементах, коррозии металлических элементов, прогибов элементов, а также состояние стыков, сварных, болтовых и заклепочных соединений и т. д.), составление плана обследования сооружения, проведение комплекса исследований неразрушающими методами;

3) *анализ состояния сооружения и разработка рекомендаций* по устранению выявленных дефектов.

Визуальная оценка сооружения дает первую исходную информацию о состоянии обследуемой конструкции, позволяет судить о степени износа элементов конструкций, дает возможность конкретизировать дальнейшие испытания с применением методов, которые не приводят к разрушению отдельных элементов и конструкций в целом. Такие испытания могут проводиться как при статическом нагружении конструкции, так и при динамическом воздействии нагрузок. Комплекс этих испытаний включает определение значений геометрических параметров сооружения (пролеты, толщины, высоты и т. д), прочностных и структурных свойств материалов, толщины защитного слоя бетона, расположения арматуры, прогибов и деформаций элементов, амплитуд и периодов колебаний конструкций, ускорений отдельных точек и др.

При обследовании сооружений широко применяются методы инженерной геодезии, с помощью которых измеряются осадки зданий и сооружений, их сдвиги, параметры трещин и деформационных швов, прогибы элементов конструкций. Методами инженерной фотограмметрии определяются перемещения точек и деформации элементов конструкций при статических и динамических воздействиях. В последнее время эффективно развиваются методы лазерной интерференции.

Аналогичные методики используются при контроле качества изготовления элементов строительных конструкций и их монтажа на строительных площадках. Контроль качества изготовления элементов строительных конструкций производится с использованием неразрушающих и разрушающих методов испытаний. Однако подвергать каждое изделие испытаниям до разрушения абсурдно, хотя при этом информация о действительной работе изделия будет обладать 100%-ной обеспеченностью. Неразрушающий метод не всегда дает достаточно полную характеристику испытываемого объекта, поэтому два метода используются в совокупности. Если провести неразрушающие и разрушающие испытания определенного количества объектов, а затем сопоставить результаты испытаний, то можно установить определенную взаимосвязь между ними. Испытания конструкций зданий и сооружений являются составным элементом обследования, но по своей методологии, аппаратному обеспечению и по методам обработки представляют самостоятельное направление экспериментальной механики. Цель этого направления состоит в создании методов и средств, позволяющих на базе экспериментальных исследований получить объективную информацию о свойствах конструкционных материалов, поведении элементов конструкций и действительной работе сооружений. Никакой, даже самый точный, расчет не сможет дать объективную информацию о действительном поведении реальных систем. В строительной механике, теории упругости и пластичности, сопротивлении материалов излагаются самые современные методы расчета идеализированных расчетных моделей, но любой из этих методов должен быть построен на объективной информации, полученной из опытов. Однако ни один из них не может быть рекомендован к использованию для практических расчетов без его экспериментальной проверки.

Парадоксальным является то, что в рамках сформированных расчетных схем с использованием современных ЭВМ можно получать результаты расчета с погрешностью 10^{-8} и менее, тогда как исходная, вводимая в расчет информация по нагрузкам, прочностным характеристикам и отклонениям параметров действительного сооружения от его расчетной схемы характеризуется погрешностью, реально определяемой в пределах до 10...20%. Это не снижает роли современных методов теории расчета сооружений, а лишь подчеркивает необходимость взаимной увязки точности методов расчета сооружений с точностью исходных предпосылок, определяемых экспериментом, и точностью получаемых результатов, фиксируемых при проведении эксперимента. Существенное влияние на формирование методов и средств испытания конструкций оказывает характер изменения внешних нагрузок, действующих на строительные конструкции, здания и сооружения. Здесь различают постоянные или медленно изменяющиеся статические нагрузки, и динамические, быстро меняющиеся во времени.

Можно сформулировать три основные задачи, которые решаются с помощью методов и средств испытания строительных конструкций, зданий и сооружений.

К первой задаче следует отнести определение теплофизических, структурных, прочностных и деформационных свойств конструкционных материалов, а также выделение характера внешнего воздействия, передаваемого на конструкции.

Вторая задача связана с сопоставлением расчетных схем, усилий и перемещений в конструкции, которые определяются расчетным путем, с соответствующими усилиями и перемещениями, возникающими в реальной конструкции или ее модели.

Третья задача – идентификация расчетных моделей, которая получила развитие лишь в последние годы. Эта задача связана с синтезом расчетных схем, который основан на анализе результатов проведенных экспериментальных исследований..

Однако в отличие от классической постановки при рассмотрении практических задач известны некоторые характерные параметры системы, к которым можно отнести информацию о геометрии конструкций в плане, определяемой архитектурно-планировочным решением, о типе или характере несущих конструкций, о наборе конструктивных элементов, применяемых в сооружениях. На основании анализа

экспериментально полученных данных о внешних воздействиях и реакций системы (прогибы, деформации, скорости, ускорения) в рамках заданной расчетной модели выявляются ее параметры, и оценивается ее эксплуатационная надежность, прочность, устойчивость, жесткость и трещиностойкость.

Цели и задачи испытаний конструкций. При испытаниях конструкций в зависимости от объекта и цели испытаний устанавливаются: 1) *несущая способность*, характеризующаяся нагрузкой, при которой наступает потеря прочности или устойчивости объекта испытания; 2) *жесткость*, характеризующаяся значениями перемещений, предельными с точки зрения возможности нормальной эксплуатации объекта; 3) *трещиностойкость* (в первую очередь для бетонных и железобетонных конструкций); трещины должны или вообще не появляться или их раскрытие не должно исчерпать или затруднять эксплуатацию вследствие потери непроницаемости, развития коррозии и т.д.; при определении трещиностойкости устанавливают также значения нагрузки, при которой образуются трещины, допустимые по условиям эксплуатации.

Существуют четыре разновидности испытаний: приемочные испытания, испытания эксплуатируемых объектов, испытания конструкций и деталей при их серийном производстве, научно-исследовательские испытания.

1. При *приемочных испытаниях* (при передаче законченных сооружений в эксплуатацию и промежуточных приемках в процессе строительства) проверяются состояние объекта и соответствие показателей его работоспособности проектным и нормативным требованиям.

2. *Испытания уже эксплуатируемых сооружений* проводятся: для проверки возможности продолжения нормальной службы объекта под эксплуатационной нагрузкой; для проверки эксплуатационной надежности объекта при появлении значительных повреждений, например, после пожара и в других аналогичных случаях, ставящих под сомнение работоспособность сооружения; для выяснения возможности повышения эксплуатационной нагрузки при реконструкции объекта или изменении характера его использования.

3. *Испытания конструкций и деталей* при их серийном изготовлении выполняются путем выборочных испытаний отдельных образцов (продукции) с доведением до разрушения. Задачей испытаний в данном случае является установление фактической несущей способности и других характеристик испытываемых образцов либо продукции с распространением полученных результатов на всю изготовленную партию.

4. *Научно-исследовательские испытания* и испытания опытных объектов проводятся: при применении новых конструктивных решений и при апробации новых методов расчета; при использовании новых строительных материалов с характеристиками, требующими проверки под действием нагрузки; при особых режимах эксплуатации. Такие испытания могут производиться непосредственно в натуре или лабораторным путем с обеспечением требуемого режима.

2. Основы метрологии и стандартизации в строительстве

В условиях ускорения научно-технического прогресса и строительства особое значение придается унификации методов испытания строительных конструкций, деталей и узлов, повышению качества изготовления и монтажа строительных конструкций. Решение этих задач требует существенного повышения роли метрологии и стандартизации в строительстве.

Метрология – это наука об измерениях, методах и средствах обеспечения их единства и способах достижения требуемой точности. В метрологии рассматриваются: общая теория измерений, единицы физических величин и их системы, методы и средства измерений, методы определения точности измерений, основы обеспечения единства измерений и единообразия средств измерений, методы передачи размеров единиц от

эталонов или образцовых средств измерений к рабочим средствам измерений. Метрология является научной основой метрологического обеспечения, под которым понимают установление и применение научных и организационных основ, технических средств, правил и норм, необходимых для достижения единства и требуемой точности измерений. Метрологическое обеспечение включает следующие системы:

1) *государственных эталонов* единиц физических величин, обеспечивающих воспроизведение единиц с наивысшей точностью;

2) передачи *размеров единиц* физических величин от эталонов всем средствам измерений с помощью образцовых средств измерений и других средств поверки;

3) разработки, постановки на производство и выпуска в обращение *рабочих средств измерений*, обеспечивающих определение с требуемой точностью характеристик продукции, технологических процессов и других объектов в сфере материального производства, научных исследований и других видов деятельности;

4) *разработки стандартных справочных данных* о физических константах и свойствах веществ и материалов, обеспечивающих достоверными данными научные исследования, разработку технологических процессов получения и использования материалов и конструкций.

Кроме того, в метрологическое обеспечение входят такие мероприятия как:

– *государственные испытания* или *метрологическая аттестация* средств измерений, предназначенных для серийного или массового производства и ввоза их из-за границы, обеспечивающих единообразие средств измерений при их разработке и использовании;

– обязательная *государственная и ведомственная поверки* средств измерений, обеспечивающие единообразие средств измерений при изготовлении, эксплуатации и ремонте, а также установление стандартных образцов состава и свойств веществ и материалов, обеспечивающих воспроизведение единиц величин, характеризующих состав и свойства веществ и материалов.

Определим основные понятия, связанные с поверкой средств измерений.

Поверка средств измерений – это определение метрологическими органами погрешностей средств измерений и установление их пригодности к применению. Различают государственную (производится органами государственной метрологической службы) и ведомственную (органами ведомственных метрологических служб) поверку средств измерений.

Метрологическая аттестация средств измерений – исследование средств измерений, выполняемое метрологическими органами для определения метрологических свойств этих средств измерений, и выдача документа с указанием полученных данных.

Поверочная схема – это утвержденный в определенном порядке документ, устанавливающий средства, методы и точность передачи размера единицы физической величины от эталона к рабочим средствам измерений. Различают общегосударственные и локальные (отдельных органов метрологической службы) поверочные схемы.

Средства поверки – это технические средства, необходимые для осуществления поверки средств измерений в соответствии с требованиями нормативно-технических документов на методы и средства поверки. Средства поверки включают в себя рабочие эталоны, образцовые средства измерений, в том числе стандартные образцы и образцовые меры, вспомогательные приборы, устройства и материалы, поверочные приспособления.

Средства измерений – это технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики. Они состоят из системы мер, измерительных приборов и преобразователей, а также измерительных установок и систем.

Под **измерительным прибором** понимают средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателя. Измерительный преобразователь – средство измерения, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме,

удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию с помощью наблюдения.

Измерение – это процесс нахождения какой-либо физической величины с помощью технических средств и сравнения её с эталоном. Измерение включает следующие элементы:

- объект измерения, свойства которого характеризует измеряемая величина;
- единицу измерения;
- техническое средство измерения, градуированное в выбранных единицах;
- метод измерения;
- регистрирующее устройство, воспринимающее результат измерения;
- окончательный результат измерения.

Измерения характеризуются рядом параметров:

- погрешностью измерения – разностью между истинными и измеренными значениями величин;
- точностью измерения, т. е. степенью приближения результатов измерения к истинному значению;
- достоверностью измерения – вероятностью отклонения измерения от истинного значения;
- диапазоном измерений – областью значений измеряемой величины, для которой нормированы допускаяемые погрешности средств измерений;
- ценой деления шкалы – разностью значений величины, соответствующей двум соседним отметкам шкалы;
- пределом измерений – наибольшим и наименьшим значениями диапазона измерений;
- чувствительностью измерительного прибора – отношением изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызвавшему его изменению измеряемой величины.

Различают три класса измерений:

- **особо точные** – связаны с установлением эталона;
- **высокоточные** измерения проводятся при градуировании измерительных систем, а также при проведении измерений в особо ответственных испытаниях;
- **технические** – применяются в практике испытаний строительных конструкций.

Всякое измерение неизбежно связано с **погрешностями** измерений. Погрешности, порожденные несовершенством метода измерений, неточной градуировкой и неправильной установкой измерительной аппаратуры, называют **систематическими**. Систематические погрешности исключают введением поправок, найденных экспериментально. В настоящее время для устранения систематических погрешностей применяется микропроцессорная техника.

Случайные погрешности обусловлены влиянием на результаты измерений неконтролируемых факторов (случайные колебания температуры, вибрация и т. д.). Такие погрешности оцениваются методами математической статистики по данным многократных измерений.

При измерениях могут возникать **грубые ошибки**, вызванные неисправностью измерительных систем, ошибками регистратора и т.д. Эти ошибки также могут быть выявлены методами математической статистики. Проблемы метрологического обеспечения измерений неразрывно связаны с задачами, стоящими перед стандартизацией.

Стандартизация – это установление и применение правил для упорядочения деятельности в определенной области на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности, для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении функциональных условий и требований техники безопасности. Объектами стандартизации являются конкретная продукция, нормы, требования, методы, термины, обозначения и т. д., имеющие перспективу многократного применения, используемые в науке, технике,

строительстве. В области строительства стандартизации подлежат методы расчета и проектирования конструкций и сооружений, требования к материалам и изделиям, допуски конструкций зданий и сооружений на стадии монтажа и строительства, методы испытаний и проведения измерений, методы представления и обработки получаемых результатов измерений и т. д.

В зависимости от сферы действия стандарты разделяются на четыре категории: государственные (ГОСТ), отраслевые (ОСТ), республиканские (РСТ) и стандарты предприятий (СТП). Государственные стандарты в области строительства и строительных материалов утверждаются Госкомархстроем РУз. В настоящее время проводится большая работа по переработке отечественных стандартов в соответствии с международными требованиями и международными стандартами. В области строительства наряду со стандартами действуют строительные нормы и правила (СНиП). Эти документы содержат отдельные общие элементы, но в целом они существенно различны. СНиПы устанавливают требования ко всей строительной продукции и содержат нормы строительного проектирования, тогда как ГОСТы содержат требования к строительным материалам и изделиям массового производства, методам испытания материалов и конструкций, измерений, обработки и представления результатов.

В зависимости от содержания стандарты подразделяются на ряд отдельных видов. С точки зрения освидетельствования и испытания конструкций и сооружений наибольший интерес представляют следующие:

1) *стандарты технических условий*, которые, в частности, содержат всесторонние требования к продукции при ее изготовлении, поставке и эксплуатации, регламентируют методы испытаний, правила приемки;

2) *стандарты технических требований*, которые нормируют показатели качества, надежности и долговечности продукции, устанавливают срок службы и т. д.;

3) *стандарты методов испытаний*, которые включают требования о порядке отбора проб или образцов, методы испытаний материалов и изделий, используемые для оценки качества продукции; эти стандарты обеспечивают единство методов и средств испытаний; в стандартах на методы испытаний содержатся также требования к измерительным приборам, инструментам и установкам, используемым для контроля показателей качества изделий;

4) *стандарты правил приемки, маркировки, упаковки, транспортирования и хранения*, которые регламентируют, в частности, порядок приемки изделий, вид и программу испытаний при приемке.

В большинстве строительных стандартов даны совмещающие данные, свойственные стандартам нескольких видов. Стандарты существенно влияют на темпы развития и уровень производства. Базируясь на последних достижениях науки, техники и практического опыта, стандартизация во многом не только фиксирует достигнутый уровень производства, но и является одним из рычагов прогресса науки и техники.

3. Основные метрологические характеристики средств измерений

При испытании сооружений и их моделей получение информации о работе изучаемой системы основано на измерении физических величин с помощью технических средств. Достоверность полученных экспериментальных данных зависит от выбранных параметров средств измерений, от того, в какой мере метрологические характеристики средств измерений отвечают требованиям проводимого эксперимента. К основным параметрам, характеризующим средства измерения, относятся: статическая градуировочная характеристика, чувствительность измерительного прибора (преобразователя), коэффициент преобразования, порог чувствительности, диапазон измерений, информативность, динамические характеристики – амплитудно- и

фазочастотная, переходная, а также время установления показаний.

Вид функции преобразования средства измерений определяет его градуировочная характеристика, устанавливающая зависимость между значениями величины на входе и выходе. Такая зависимость представляется в виде таблицы, формулы или графика (рис.1).

Отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора $\Delta\theta$ к вызывающему его изменению на входе ΔX – называется *чувствительностью прибора S*. Если градуировочная характеристика преобразователя линейна, то его чувствительность может определяться *коэффициентом преобразования* $K_n = \theta/X$. Протяженность линейного участка – *диапазон измерений* D_u – зависит от свойств измерительного прибора и от допускаемой, т. е. нормированной для данного средства измерения погрешности δ (рис.1). Верхний и нижний пределы измерения определяются уровнем принятой погрешности измерений. За нижний предел – порог чувствительности λ_n – принимается минимальное значение измеряемой величины, при котором обнаруживается сигнал на выходе прибора. Диапазон измерений и порог чувствительности позволяют определить обобщенную характеристику средства измерения – его информативность или разрешающую способность Ω :

$$\Omega = \ln (D_n / 2 \lambda_n), \quad (1)$$

которая тем больше, чем шире диапазон и ниже уровень суммарной погрешности используемого комплекса измерительных средств.

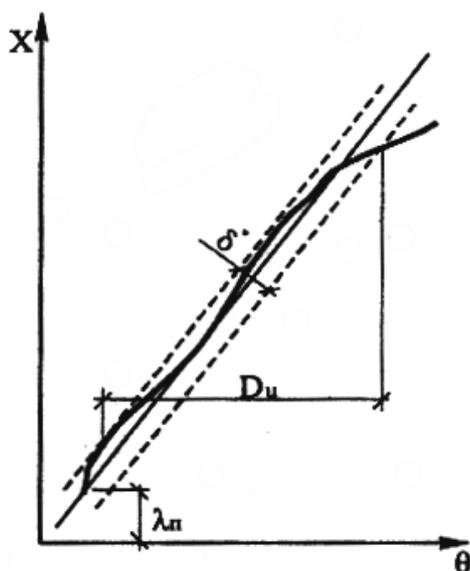


Рис. 1.
Статическая градуировочная характеристика

При динамической градуировке измерительных преобразователей регистрируется их реакция на эталонные сигналы в виде гармонических колебаний различной частоты или импульсных воздействий. В условиях установившихся гармонических колебаний получают амплитудно-частотную характеристику и устанавливают степень нелинейности амплитудной характеристики.

Амплитудно-частотная характеристика представляет зависимость чувствительности градуируемого средства измерений от частоты колебаний, а степень нелинейности – зависимость чувствительности от амплитуды сигнала при фиксированной частоте. На рис. 2,а показана амплитудно-частотная характеристика измерительного прибора. Ординаты кривой представляют собой отношение чувствительности на рассматриваемой частоте к K_n , полученному при статической градуировке. Нижний предел диапазона f_n так же, как и верхний предел f_n частотной характеристики, определяются заданным допуском Δc нормированной погрешности относительно средней

частоты соответствующих диапазонов.

Переходная характеристика приборов устанавливает связь между заданным скачкообразно изменяющимся во времени входным сигналом и мгновенным значением выходного сигнала. На рис. 2,б приведена переходная характеристика акселерометра. Ординаты кривой 1 представляют собой отношение сигнала на выходе к его установившемуся значению X_y . Входной сигнал показан приблизительно в виде прямоугольного импульса 2. Искажение фронта импульса характеризуется временем установления показаний и пиковым значением переходной характеристики X_n . За время установления показаний принимается промежуток времени t_y с момента скачкообразного изменения измеряемой величины до момента, когда значение выходного сигнала войдет в зону установившегося состояния (заданной ширины θ_y).

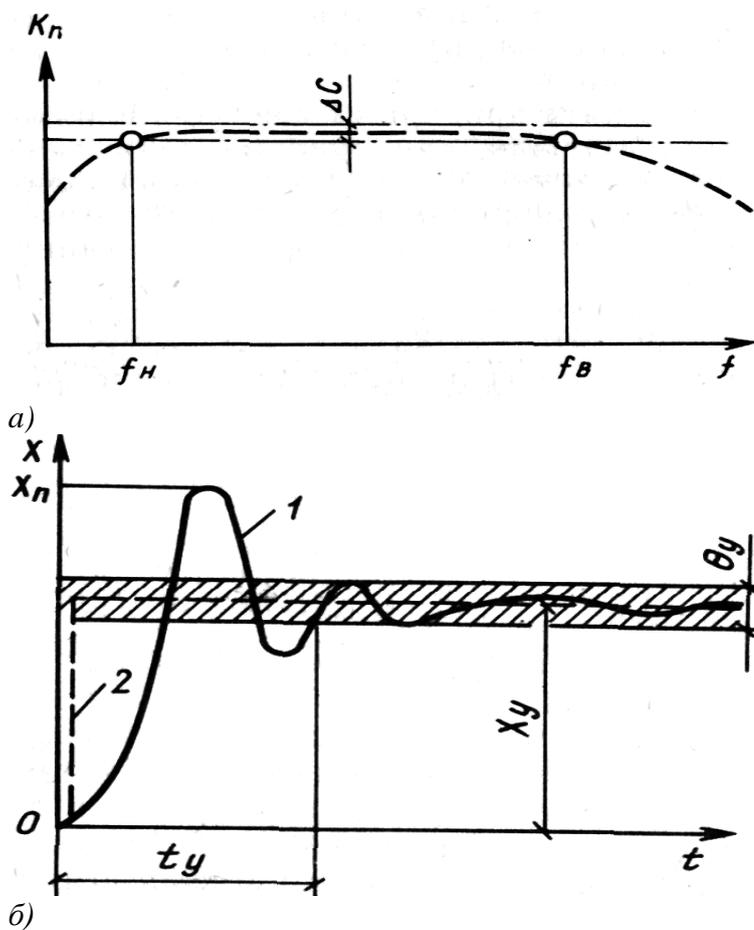


Рис. 2.
Характеристики измерительных преобразователей

Инструментальная погрешность отражает конструктивные особенности измерительного преобразователя и включает погрешности его градуировки.

Методические погрешности возникают от того, что первичный преобразователь неправильно воспринимает или искажает измеряемую величину. Эти погрешности могут быть обусловлены, например, несоответствием между размером базы тензомера и градиентом измеряемой деформации, а также влиянием прибора на исследуемые свойства объекта. Каким бы идеальным ни был тензомер с точки зрения линейности и чувствительности, но помещенный внутрь твердого тела, он в той или иной степени вносит искажение в исследуемое напряженное состояние. Выходной сигнал такого тензомера отражает искаженное им деформированное состояние, а не то, что существовало бы в исследуемой области при отсутствии тензомера. В приведенных примерах причина погрешности полученных результатов заключена в самом методе измерения. Для анализа методических погрешностей требуется проведение теоретических исследований, а также разработка специальных метрологических приемов и образцовых

устройств, которые воспроизводили бы все условия и особенности данного измерения.

На работу измерительных приборов оказывают влияние внешние факторы – атмосферные, температурные, электрические помехи и др. В лабораторных условиях влияние этих факторов можно снизить до допустимых пределов. Суммарная погрешность средства измерения, возникающая при нормальных условиях аттестации прибора (при температуре воздуха 20°C, влажности 60% и др.), называется **основной погрешностью**. Изменение погрешности преобразователя, вызванное помехами, рассматривается как дополнительная погрешность. **Дополнительные погрешности** приводятся обычно в виде коэффициентов или функций влияния $\psi(\xi)$, которые нормируются отдельно для каждого влияющего фактора: температуры, влажности и т. д. Основная и дополнительная погрешности включают случайные и систематические составляющие.

Случайная составляющая погрешности измерений возникает по неизвестным причинам и проявляется в том, что при повторных измерениях постоянной величины получают различные ее значения, т. е, имеет место некоторый разброс значений результатов измерений. Для уменьшения случайной составляющей погрешности измерения увеличивают число повторных измерений, статистическая обработка которых позволяет усреднить полученные результаты и выделить среднее значение случайных отклонений. Уменьшать случайную составляющую погрешности целесообразно до тех пор, пока средняя квадратическая ошибка не окажется значительно меньше величины систематической погрешности. Необходимое число повторных отсчетов можно установить только после оценки суммарной систематической погрешности средств измерений.

Систематическую погрешность вызывает неправильно определенная чувствительность, несовпадение градуировочных характеристик при прямом и обратном ходе (гистерезис) и пр. Систематические погрешности вызывают также постоянно действующие влияющие факторы. В метрологии разработаны специальные приемы, позволяющие снизить или исключить из результата измерений ряд систематических погрешностей. К таким приемам относятся:

1) *стабилизация параметров* средств измерений, т. е. выбор стабильных режимов работы прибора, предварительное старение нестабильных элементов и др.;

2) *защита прибора* от действия влияющих величин или стабилизация значений влияющих величин: гидроизоляция, экранирование магнитных полей, надежность источников питания и т. д.;

3) *автокомпенсация* погрешностей по знаку, что позволяет известную по природе погрешность вводить в результат измерения дважды, но с разными знаками;

4) проведение *вспомогательных измерений* влияющих величин, что дает возможность при известной функции влияния вносить в результаты измерений поправки.

Широкое применение находит и так называемый способ *замещения*, заключающийся в том, что в процессе эксперимента вместо измеряемой величины производится периодическое подключение образцовой меры. Получаемые при этом отклонения измеренных значений меры от ее действительной величины характеризуют изменение масштаба преобразования и используются для внесения поправок в результаты измерений. Указанные приемы исключения систематических погрешностей будут проиллюстрированы при рассмотрении конкретных измерительных средств.

При проведении испытаний непосредственно измеряются физические величины: перемещение, скорость перемещения, ускорение, деформация и др. Вместе с тем, механическое напряжение σ_x , внутренние усилия в сечении (изгибающий момент M_x , поперечная сила Q_x) не могут быть непосредственно измерены и для их определения в эксперименте необходимо воспользоваться аналитическими выражениями, устанавливающими связь между σ_x , M_x , Q_x и измеряемыми физическими величинами. С помощью косвенных измерений устанавливают фактическую жесткость EI_x изгибаемых элементов, жесткость узлов, податливость опорных закреплений и другие параметры,

характеризующие действительную работу конструкций. Поскольку при проведении косвенных измерений используется зависимость искомой величины y от непосредственно измеряемых – x_1, x_2, \dots, x_n :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (2)$$

то достоверность результата будет зависеть не только от инструментальной погрешности измерений величин x_1, x_2, \dots, x_n , но и от того, в какой степени выражение (2) соответствует действительным условиям работы элемента конструкции, т.е. от методической погрешности. Инструментальную погрешность, косвенно определяемой величины можно вычислить по формуле:

$$\Delta y / y = \sqrt{\sum_1^n [(\partial \ln y / \partial x_i) \Delta x_i]^2}, \quad (3)$$

где $\Delta x_1, \Delta x_2, \dots, \Delta x_n$ – абсолютные погрешности измерений величин x_1, x_2, \dots, x_n зависимости (2).

4. Основы теории планирования эксперимента

Первым этапом планирования эксперимента является построение математической модели исследуемого явления. Для этого необходимо установить соотношения между изучаемыми параметрами и измеряемыми величинами, что позволяет обоснованно подобрать средства измерения, уровень допустимых погрешностей, выбрать способ обработки опытных данных и форму представления результатов исследования. Процедура построения математической модели зависит от задач эксперимента и основывается на анализе априорной информации об исследуемом явлении. Если еще не получены соответствующие уравнения, описывающие изучаемое явление, то на основе априорной информации составляют перечень всех возможных величин, которые могут быть существенными для рассматриваемого явления, и математическую модель записывают в виде зависимости (2), где измеряемые независимые переменные x_1, x_2, \dots, x_n в терминах теории планирования эксперимента называются факторами, результаты эксперимента y – параметром оптимизации (откликом), а f – функцией отклика.

После того как сформулированы задачи исследования и составлена модель изучаемого явления, должны быть установлены: *область определения факторов; способы их измерения; число уровней и значения интервалов варьирования каждого фактора.* Область определения факторов, как правило, ограничена. Ограничением верхнего предела является, например, некоторый предельный уровень возможных деформаций (перемещений), а нижнего предела – точность измерения. Чем ниже точность измерений, тем меньше возможное число дискретных значений или уровней фактора.

Назначение числа уровней факторов зависит также от характера функции отклика. В случае, когда функция отклика известна, уровни выбирают такими, чтобы получить значения экспериментальных данных вблизи характерных точек (например, в области ожидаемого перехода в пластическую область деформирования, появления микротрещин, состояния потери устойчивости и т.д.). Если для описания исследуемого явления принимается линейная модель, то достаточно установить лишь два уровня: верхнюю и нижнюю границу интервала варьирования. В относительных координатах, отнесенных к значению интервала варьирования факторов, эти уровни обозначаются +1 и –1 (или просто «+» и «–»). Уровни, записанные в таких обозначениях, называются нормированными. Таким образом, область определения факторов и принятое число уровней позволяют установить факторное пространство плана. Каждая ось факторного пространства соответствует одному фактору, а совместная область определения образует

k -мерный объем (k – число независимых факторов).

Составим план проведения однофакторного эксперимента, в котором одна независимая варьируемая переменная x и одна зависимая (измеряемая в процессе испытаний) переменная y , например, определение модуля упругости стали при растяжении образца. Здесь варьируемой переменной является нагрузка или напряжение σ , действующее в образце, а зависимая переменная ε – деформация, измеряемая в процессе нагружения. Поскольку само понятие модуля упругости предполагает линейную зависимость $\sigma - \varepsilon$, то математическую модель результата опыта можно представить в виде:

$$y = a_0 + bx. \quad (4)$$

Переменную x достаточно варьировать на двух уровнях (+1 и -1) но в общем случае, когда необходима проверка пригодности модели, число уровней увеличивают до трех, четырех. Нижняя граница интервала варьирования x определяется, как отмечалось, погрешностью измерения зависимой переменной y , а верхний уровень в данном опыте имеет конкретный физический смысл: это предполагаемый предел пропорциональности испытываемого материала $\sigma_{пц}$.

Рассматриваемый эксперимент относится к категории воспроизводимых экспериментов, т. е. один и тот же образец можно нагружать, многократно возвращаясь, всякий раз к его исходному состоянию. Согласно принятой модели (2) изучаемого явления при аппроксимации результатов опытов некоторой прямой должно выполняться условие:

$$y_i - a_0 - bx_i = 0. \quad (5)$$

Однако при подстановке в данное уравнение фактических значений y , и x , в силу рассеивания результатов это условие примет вид:

$$y_i - a_0 - bx_i = \delta_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (6)$$

где δ_i – отклонения от центра распределения; i – номер опыта; n – число опытов.

Прямая, проходящая вблизи множества экспериментальных точек должна занимать положение, при котором сумма квадратов отклонений от этой прямой минимальна:

$$\sum \delta_i^2 = \min. \quad (7)$$

Преобразование и решение системы уравнений дает для искомых коэффициентов выражения (2) следующие расчетные формулы:

$$a_0 = \frac{\sum y_i \sum x_i^2 - \sum y_i x_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}; \quad (8) \quad a_0 = \frac{n \sum y_i x_i - \sum y_i \sum x_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}. \quad (9)$$

Метод наименьших квадратов с успехом применяется и в случае аппроксимации нелинейных зависимостей, когда ставится задача отыскания функции, отражающей осредненную зависимость величины y от x . Такая функция называется регрессией, а связанный с этим методом регрессионный анализ является основным инструментом обработки опытных данных при планировании эксперимента.

В рассмотренных планах учитывались ошибки измерения лишь одной переменной y , а значения независимой переменной x принимались строго фиксированными. В действительности, например при варьировании нагрузки, показания динамометра могут зависеть от того, получено ли заданное усилие в процессе увеличения или уменьшения нагрузки, при непрерывном или ступенчатом нагружении. Для компенсации таких факторов используют прием рандомизации последовательности нагружения, заклю-

чающийся в том, что при повторных испытаниях уровни нагружения назначаются в произвольной последовательности.

Если эксперимент невоспроизводимый, как в случае получения диаграммы деформирования материала, то сама последовательность нагружения не может быть назначена произвольно, поэтому в таком эксперименте может быть применен только последовательный план. Однако и здесь при проведении повторных опытов возможна рандомизация условий эксперимента с целью усреднения влияния внешних неконтролируемых факторов или факторов, которые не учитываются принятой математической моделью исследуемого явления. Например, при испытании образцов для получения диаграммы деформирования бетона экспериментатор располагает кубиками четырех типоразмеров. Для сокращения времени проведения эксперимента кубики предполагается испытывать параллельно на четырех прессах разной мощности. При этом известно, что и масштабный фактор, и различие накопленной упругой энергии в системе «образец – машина» оказывают влияние на результаты испытаний. Однако учесть влияние этих факторов не представляется возможным: эксперимент по-прежнему однофакторный и внешние переменные необходимо компенсировать. Рандомизированный план такого эксперимента составляется в зависимости от марки испытательного пресса, типа деформометров и типоразмеров образцов и имеет следующий вид (табл. 1). Из таблицы видно, что каждый вариант испытаний встречается только один раз. Построенный план эксперимента называется *латинским квадратом*. В рассматриваемом *однофакторном эксперименте* результаты, полученные для каждой комбинации факторов, необходимо усреднить. Планы подобного типа могут быть использованы и в многофакторном эксперименте: в сочетании с дисперсионным анализом они позволяют исследовать влияние на результаты испытаний каждого фактора в отдельности.

Таблица 1. Рандомизированный план эксперимента

Марка испытательного пресса	Тип деформометра			
	I	II	III	IV
	Типоразмер образцов			
A	1	2	3	4
B	3	4	1	2
C	2	1	4	3
D	4	3	2	1

Многофакторный эксперимент. Если изучаемое явление описывается функцией нескольких независимых переменных, то такой эксперимент называется многофакторным и при его планировании используют либо факторный план, либо классический план. Классический план строится так, чтобы в каждом опыте варьировалась лишь одна переменная, а значения всех остальных независимых переменных поддерживались на определенном, постоянном уровне. Поочередно варьируя каждую независимую переменную, устанавливают исследуемые зависимости. Например, изучается зависимость механических характеристик материала от температуры испытания. Это – двухфакторный эксперимент, математическую модель которого $y = \varphi(x, z)$ можно представить в виде последовательности отдельных функций $y = \varphi(x)$ при различных значениях параметра z . С этой целью в пределах изучаемого температурного диапазона устанавливают необходимое число уровней переменной z и затем для каждого температурного уровня проводят испытание образцов в заданных изотермических условиях. Таким образом, классический план многофакторного эксперимента представляет собой совокупность однофакторных экспериментов.

Такому подходу свойственны следующие недостатки. *Во первых*, не всегда удастся стабилизировать все независимые переменные и поддерживать их значения на заданном

уровне. Во вторых, при равных объемах экспериментов, построенных по схеме классического и факторного плана, точность последнего существенно выше. Кроме того, факторное планирование позволяет исследовать сложные системы, в которых последовательно разграничить влияние переменных практически невозможно. Приведем основные понятия факторного планирования и примеры использования факторных планов при определении внутренних усилий в стержневых системах. Пусть изучаемый параметр y линейно связан с k независимыми переменными x_1, x_2, \dots, x_k . Уравнение регрессии записывается в виде:

$$y = a_0x_0 + a_1x_1 + \dots + a_kx_k, \quad (10)$$

где x_0 – переменная, введенная для оценки свободного члена a_0 .

Эту задачу можно решать однофакторным методом, варьируя каждую переменную по очереди. Если при этом для каждой переменной сделано m повторных опытов и переменные варьируют только на двух уровнях $+1$ и -1 , то коэффициенты регрессии $a_i = \operatorname{tg}\beta$ (рис. 3) оцениваются по результатам двух опытов:

$$a_i = (y_i - y_0) / 2, \quad (11)$$

а дисперсия коэффициентов регрессии определяется как:

$$S_{ai}^2 = S_y^2 / 2m, \quad (12)$$

где S_{ai}^2 характеризует погрешность измерения параметра y при условии, что в каждом опыте погрешность измерения одинакова.

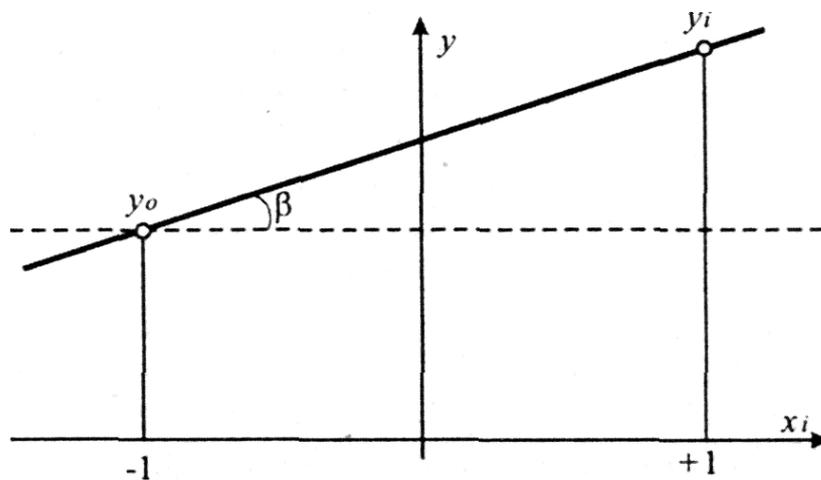


Рис. 3.
Оценка коэффициента регрессии при варьировании переменной на двух уровнях

Следовательно, значения S_{ai}^2 , не зависят от общего числа переменных x_k , поскольку каждая переменная изучается в отдельности. Изменим план эксперимента. Пусть в каждом опыте варьируются все переменные сразу. Рассмотрим для определенности трехфакторный эксперимент и воспользуемся матрицей планирования, приведенной в табл. 2. Из таблицы видно, что минимальное число опытов равно четырем ($3+1$), то есть на один больше числа независимых переменных. Особенностью такого плана является то, что все коэффициенты регрессии могут быть определены независимо друг от друга по формуле:

$$a_i = \sum x_{ij} y_i / (k + 1), \quad (13)$$

где: y_i – значение измеряемого параметра в j – м опыте; k – количество факторов; x_{ij} – значение i -го фактора в j – м опыте.

Таблица 2. Матрица планирования

Номер опыта	Факторы			
	x_0	x_1	x_2	x_3
1	+ 1	-1	-1	+ 1
2	+ 1	+1	-1	-1
3	+ 1	-1	+ 1	-1
4	+ 1	+1	+1	+ 1

Дисперсии оценок коэффициентов регрессии вычисляются как:

$$S_{ai}^2 = S_y^2 (k + 1). \quad (14)$$

Возвращаясь к рассмотрению линейной задачи с тремя независимыми переменными, сравним значения коэффициентов регрессии в случае применения однофакторного и многофакторного плана. При одинаковом общем числе опытов дисперсия коэффициентов регрессии многофакторного плана равна: $S_{ai}^2 = S_y^2(4m)$, т.е. в 2 раза меньше, чем в первом случае. Если число независимых переменных $k = 7$, то применение многофакторного планирования дает выигрыш в точности по сравнению с классическим планом в 4 раза. Следовательно, с ростом числа независимых переменных эффективность многофакторного эксперимента возрастает. Таким образом, при выборе плана эксперимента одним из критериев его оптимальности является минимум дисперсии коэффициентов регрессии исследуемой модели.

В полном факторном плане реализуются все возможные комбинации уровней всех независимых переменных. Так, при двух переменных, варьируемых на двух уровнях, план состоит из четырех опытов, матрица планирования которых подобна табл. 2, где столбец x_3 заменен столбцом x_1x_2 . Результаты эксперимента можно представить неполным квадратным уравнением в виде:

$$y = a_0x_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2, \quad (15)$$

которое содержит один нелинейный член $a_{12}x_1x_2$. Коэффициент a_{12} является оценкой эффекта взаимодействия факторов x_1 и x_2 . Планы такого вида называются *полным факторным экспериментом* типа 2^k , где k – число независимых переменных, а 2 – число уровней варьирования переменных.

Пример составления плана полного факторного эксперимента

1. **Определение внутренних усилий в сечении стержня.** С позиций планирования полного факторного эксперимента рассмотрим задачу об определении внутренних усилий в сечении стержня. С этой целью в процессе эксперимента предполагается определить в n точках нормальные напряжения σ_j . Пусть связь между действующими в сечении внутренними усилиями N , M_x , M_y и нормальными напряжениями линейна. Функция отклика (математическая модель) в этом случае известна:

$$\sigma_j = NA^{-1} + M_x y_j I_x^{-1} + M_y x_j I_y^{-1}, \quad (16)$$

где: y_j, x_j – координаты точек измерения σ_j ; A – площадь сечения; I_x, I_y – моменты инерции относительно соответствующих осей.

При решении этой задачи классический план применить нельзя, поскольку разделить переменные, т. е. фиксировать в эксперименте значение каждого внутреннего усилия по отдельности невозможно. В уравнении (16) контролируемые переменные y_j и x_j достаточно варьировать лишь на двух уровнях ($k = 2$), поскольку уравнение (16) линейное. Таким образом, можно воспользоваться планом типа 2^2 . Для того чтобы уровни варьирования привести к нормализованному виду (+1, -1), преобразуем масштаб факторного пространства. Положение центра плана относительно главных осей сечения найдем по формулам:

$$y_0 = I_x^{-1} \sum y_i / 4; \quad x_0 = I_y^{-1} \sum x_i / 4. \quad (17)$$

Масштабы в направлении осей y и x получим из выражений:

$$k_y = \sqrt{\sum (y_j I_x^{-1} - y_0)^2 / 4}; \quad (18) \quad k_x = \sqrt{\sum (x_j I_y^{-1} - x_0)^2 / 4}; \quad (19)$$

а переход к нормализованным уровням переменных произведем по формулам:

$$y_{oj} = (y_j I_x^{-1} - y_0) / k_y; \quad (20) \quad x_{oj} = (x_j I_y^{-1} - x_0) / k_x. \quad (21)$$

При этом область планирования оказывается заданной координатами вершин квадрата (рис. 4). Полученные таким способом координаты точек установки тензодетекторов максимально удалены от центра плана, что позволяет полностью использовать факторное пространство и обеспечить минимальную дисперсию коэффициентов регрессии. Сравнивая уравнение регрессии (15) плана типа 2^2 и математическую модель исследуемого явления (16), нужно отметить, что в последней взаимодействие координат y_j и x_j не имеет реального смысла, поэтому коэффициент $a_{12} \rightarrow 0$ и матрица планирования принимает вид, приведенный в табл. 3. Здесь число опытов ($k + 1$) равно 4. Такой план называется *ненасыщенным*; кроме оценки всех неизвестных, он позволяет также произвести проверку адекватности выбранной математической модели.

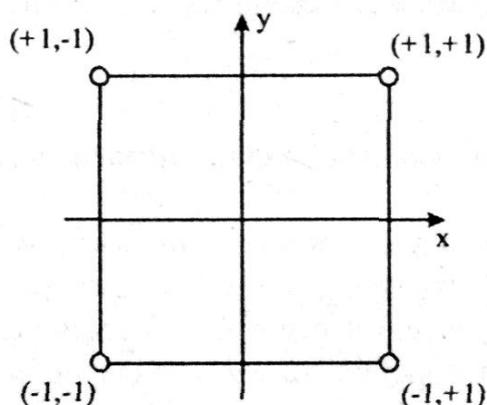


Рис. 4.
Графическое изображение заданной вершинами квадрата области планирования

Таблица 3. Матрица планирования

Номер опыта	Факторы		
	x_0	y_j	x_j
1	+ 1	-1	-1

2	+ 1	+ 1	-1
3	+ 1	-1	+ 1
4	+ 1	+ 1	+1

По результатам опытов искомые оценки внутренних усилий находят из выражений:

$$M_{0x} = \sum \sigma_j y_{oj} / n; \quad (22) \quad M_{0y} = \sum \sigma_j x_{oj} / n. \quad (23)$$

Поскольку нормальное усилие N не зависит от координат измерения σ_j , то его оценку вычисляют как:

$$N_0 = n^{-1} \sum \sigma_j. \quad (24)$$

Переход от N_0 , M_{0x} , M_{0y} вычисленных в нормализованных переменных, к реальным значениям оценок N , M_x , M_y осуществляют по формулам:

$$N_0 = N_0 A; \quad (25) \quad M_x = M_{0x} k_y^{-1}; \quad (26) \quad M_y = M_{0x} k_x^{-1}. \quad (27)$$

Для проведения статистического анализа уравнений регрессии необходимо располагать результатами параллельных и повторных измерений. Для проведения параллельных измерений в каждой исследуемой точке сечения устанавливают несколько измерительных приборов. Воспроизводимые эксперименты, например, исследование работы конструкции в упругой стадии деформирования позволяют реализовать и повторные, и параллельные измерения.

Невоспроизводимые эксперименты допускают постановку только параллельных измерений. Поскольку оценка дисперсии результата измерений зависит от объема повторных или параллельных измерений, то минимальное их число должно быть не менее 3. Оценка дисперсии результатов измерения, считая результатом измерения напряжения σ_{ij} в каждой i -й точке установки, вычисляется по формуле:

$$s_{yu}^2 = \sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2 / (m - 1), \quad (28)$$

где: m – число повторных опытов; \bar{y}_u – среднее значение напряжения в точке u .

Для получения усредненной оценки, характеризующей рассеяние результатов по всему исследуемому сечению в целом, вычисляется дисперсия

$$\bar{s}_{\sigma u}^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\sigma_{ju} - \bar{\sigma}_u)^2 / n(m - 1), \quad (29)$$

где n – число не дублированных точек измерения в сечении.

Дисперсии оценок внутренних усилий вычисляют по формуле:

$$s_{ON}^2 = s_{OM}^2 = n^{-1} s_{\sigma}^2, \quad (30)$$

если переменные представлены в нормализованном виде, и по формулам:

$$\}^2_N = n^{-1} A^2 \}^2_\sigma; \quad \}^2_{Mx} = I_x^2 \}^2_\sigma / \sum_{j=1}^n y_j^2 \quad (31)$$

в случае реальных значений оценок. Из выражений (31) следует, что точность оценок внутренних усилий повышается пропорционально сумме квадратов координат установки тензодатчиков, т. е. минимизацию оценок дисперсий дает план, в котором значения координат размещения измерительных средств (x_j, y_j) по модулю максимальны. Помимо нахождения оценок внутренних усилий, статистический анализ рассматриваемых уравнений регрессии включает проверку значимости оценок найденных усилий, а также определение для них доверительной области и проверку адекватности полученных уравнений регрессии исходной математической модели.

2. Проверка значимости оценок. Если при планировании рассмотренного эксперимента перечень неизвестных внутренних усилий не может быть составлен с полной определенностью, то в уравнение регрессии следует включить максимально возможное их число; проверка значимости позволит исключить несущественные внутренние усилия. Основой для оценки значимости искомых неизвестных служит построение для них доверительных интервалов:

$$|\Delta\theta_j| = \pm t_{p,n-k} \}^2_\theta, \quad (32)$$

где: θ_j – внутреннее усилие; $t_{p,n-k}$ – значение критерия Стьюдента при выбранном уровне значимости (обычно 5%) и числе степеней свободы, равном $n - k$; k – число независимых переменных.

Если абсолютное значение доверительного интервала превышает абсолютное значение соответствующего усилия, то последнее признается незначимым и исключается из уравнения регрессии. При независимой оценке достоверности каждого найденного усилия используются полученные доверительные интервалы (32), которые с заданной вероятностью P определяют область возможных значений этих усилий, т. е. характеризуют надежность найденных оценок.

3. Проверка адекватности полученных уравнений регрессии исходной математической модели. Если по условию стержень работает в линейной области деформирования и математическая модель (16) известна, то такая проверка не требуется. Если на стадии планирования эксперимента вид математической модели неизвестен, то проверка адекватности обязательна; она производится с помощью критерия Фишера F ,

$$F = \}^2_{ad} / \}^2_\sigma \quad (33)$$

где $\}^2_\sigma$ – дисперсия, вычисляемая по (29); $\}^2_{ad}$ – дисперсия, характеризующая рассеяние результатов эксперимента относительно найденного уравнения регрессии, вычисляется по формуле:

$$\}^2_{ad} = \sum (\sigma_j - \hat{\sigma}_j)^2 / (n - k - 1), \quad (34)$$

где: $\hat{\sigma}_j$ – напряжение, вычисленное для j -го опыта с помощью уравнения регрессии; σ_j – напряжение, полученное экспериментально.

Значение критерия Фишера сравнивают с табличным значением для выбранного уровня значимости (обычно 5%). Такие таблицы приведены в любой литературе по математической статистике. Для отыскания табличного значения критерия F нужно также знать числа степеней свободы, которые использовались при вычислении дисперсии s_{σ}^2 и s_{ad}^2 . Согласно выражениям (29) и (34) эти числа:

$$f_1 = n(m - 1); f_2 = n - (k + 1). \quad (35)$$

Гипотеза адекватности принимается (т. е. рассматриваемую модель следует признать адекватной), если расчетные значения критерия F не превышают табличного значения.

5. Конструктивные и технические особенности измерительных средств

При проведении испытаний сооружений и их моделей обычно выполняются измерения большого числа параметров, характеризующих и процесс нагружения, и поведение элементов конструкции под нагрузкой. Такими параметрами являются силовые и температурные воздействия, линейные и угловые перемещения элементов конструкции, скорость перемещений, ускорение и др. Измерение компонентов относительных деформаций позволяет определять напряженное состояние и внутренние усилия, действующие в исследуемых сечениях. Для измерения перечисленных параметров используются десятки видов приборов и измерительных преобразователей, основанных на различном принципе действия, отличающихся конструктивным решением, чувствительностью, измерительным диапазоном и другими характеристиками.

Требования, предъявляемые к используемой *аппаратуре*, определяются, прежде всего, задачами проводимых испытаний. При проведении натурных испытаний предпочтение отдается приборам, которые могут быть быстро установлены на объектах, имеющих автономное электрическое питание, достаточно широкий измерительный диапазон. Эти качества достигаются за счет снижения чувствительности приборов и применения простейших механических преобразователей с визуальным считыванием показаний со шкалы прибора.

При *испытании моделей* сооружений (обычно в лабораторных условиях) становится возможным проведение более полных исследований, включающих моделирование различных режимов силовых и температурных воздействий, измерение в большом числе точек исследуемых сечений конструкции деформаций, перемещений, температур. В этом случае на модели устанавливаются сотни и тысячи преобразователей различного назначения. Поскольку деформации и перемещения элементов моделей во много раз меньше, чем в реальных сооружениях, важнейшими требованиями к средствам измерений становятся их высокая чувствительность и помехозащищенность (низкий уровень погрешностей измерений). Установка большого числа приборов выдвигает требования к их минимальной массе и габаритам, необходимым условием становится высокая скорость регистрации их показаний. Перечисленными достоинствами обладают современные электрические измерительные *преобразователи*, применяемые в сочетании с автоматизированными информационно-вычислительными комплексами.

5.1. Измерительные приборы для статических испытаний и область их применения. При испытании строительных конструкций статическими нагрузками измеряются как действующая сила, так и основные виды деформаций: прогибы (перемещения), продольные фибровые деформации, углы поворота конструкций и ее элементов, сдвиги отдельных элементов конструкции или их волокон относительно друг

друга, кроме того, контролируется изменение напряженного состояния и свойств самого материала конструкции под действием внешней нагрузки. При статических испытаниях используют приборы, как с непосредственным отсчетом значений измеряемой величины, так и измерительные преобразователи, позволяющие осуществлять измерения дистанционно, что на практике существенно расширяет возможности инженерного эксперимента. Указанные преобразователи позволяют автоматизировать процесс измерения и регистрации значений контролируемых величин и выполнять измерения в местах, недоступных для приборов с непосредственным отсчетом. При значительном количестве установленных датчиков и приборов, а также в случае необходимости проведения неоднократных измерений, на практике в настоящее время возможно создание следящих электронных систем с автоматическим опросом и автоматической регистрацией показаний приборов с непосредственным вводом исходных данных проводимых испытаний на ЭВМ и проведением математической обработки полученных результатов.

5.2. Силоизмерительные приборы. При испытании строительных конструкций статическими нагрузками, создаваемыми грузовыми механизмами – домкратами, лебедками, талями; измерение интенсивности нагрузки осуществляют **динамометрами**. На практике различают два вида динамометров – стационарные и переносные. *Стационарные* динамометры применяют в основном для поверки рабочих переносных динамометров и называются образцовыми. Образцовые динамометры должны иметь государственное свидетельство с таблицей зависимостей между нагрузками и показаниями индикатора для нескольких реперных точек.

По конструктивным особенностям рабочие динамометры подразделяются на *пружинные, гидравлические и электромеханические*. В зависимости от способа регистрации измеряемой силы различают динамометры со стрелочным указателем, со счетным приспособлением и записывающие. Динамометры со стрелочным указателем используют, главным образом, для измерения статических усилий, а счетно-регистрирующие и записывающие – для переменных усилий.

Динамометры, имеющие записывающие устройства, называются *динамографами*. Конструктивные особенности образцовых пружинных динамометров, гидравлических и электромеханических представлены на рис. 5, 6, 7. В полевых и лабораторных условиях действующую силу, прикладываемую к строительной конструкции, можно измерить и самым простым способом. В установку для измерения силы вместо динамометра вставляют металлический стержень и индикатором часового типа измеряют его относительную деформацию ε на возможно большей базе с точностью 0,001 мм. Тогда действующую силу N в металлическом стержне в зависимости от его площади сечения A и модуля упругости материала стержня E можно определить по следующей формуле:

$$N = \varepsilon \cdot A \cdot E. \quad (37)$$

В последнее время все шире стали применяться электромеханические динамометры с тензорезисторной измерительной системой, представленной на рис. 7. Рассмотренные динамометры обладают очень высокой чувствительностью, широким диапазоном измеряемых усилий. Одновременно они очень компактны по размерам и сопрягаемы с существующей вычислительной техникой, позволяющей автоматизировать все операции, связанные с измерениями и обработкой получаемых результатов.

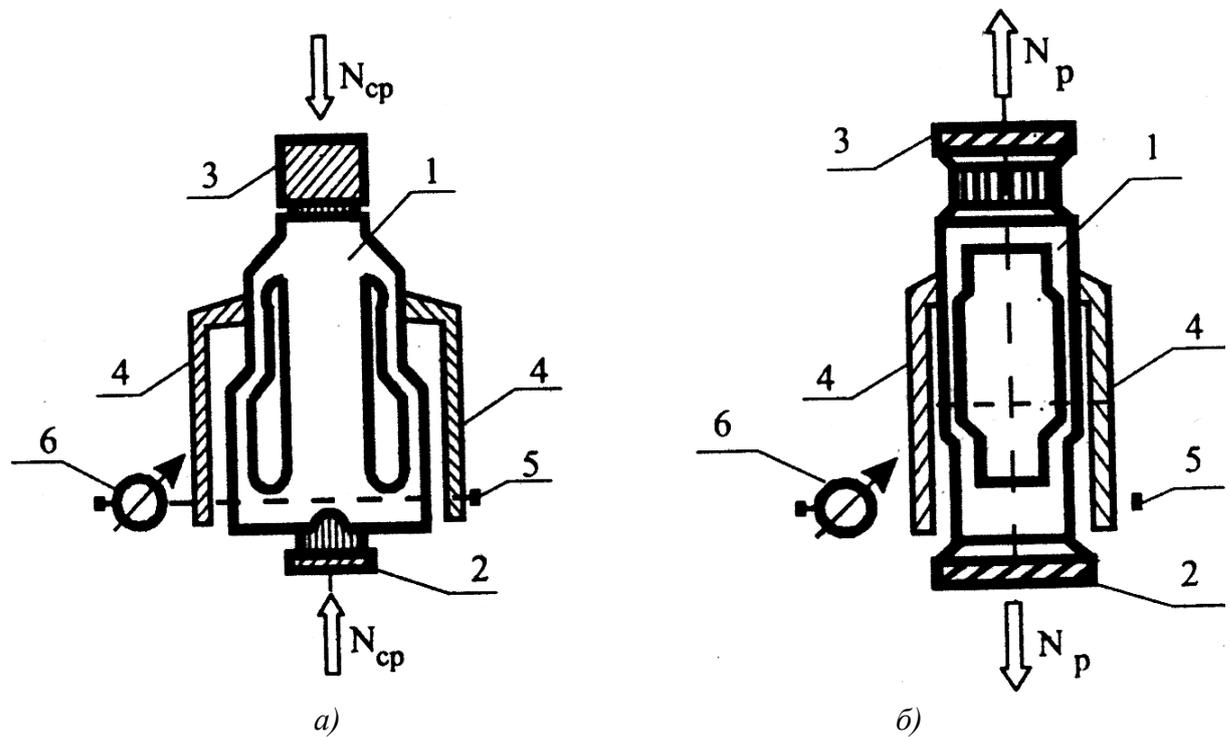


Рис. 5. Образцовые динамометры: *а* – сжатие, *б* – растяжение; 1 – корпус, 2 – нижняя пята, 3 – верхняя пята, 4 – флажки, 5 – рабочая игла, 6 – индикатор

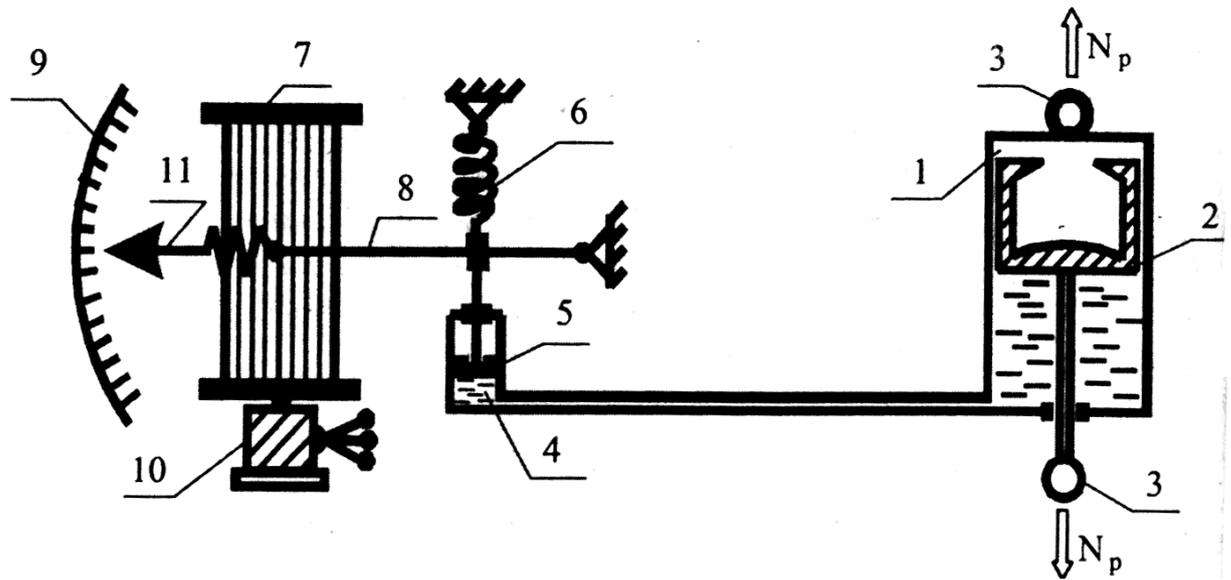


Рис. 6. Схема гидравлического динамометра: 1 – рабочий цилиндр, 2 – рабочий поршень, 3 – серьга, 4 – измерительный цилиндр, 5 – поршень измерительного цилиндра, 6 – пружина, 7 – барабан, 8 – рычаг, 9 – рабочая шкала, 10 – электродвигатель, 11 – указатель давления

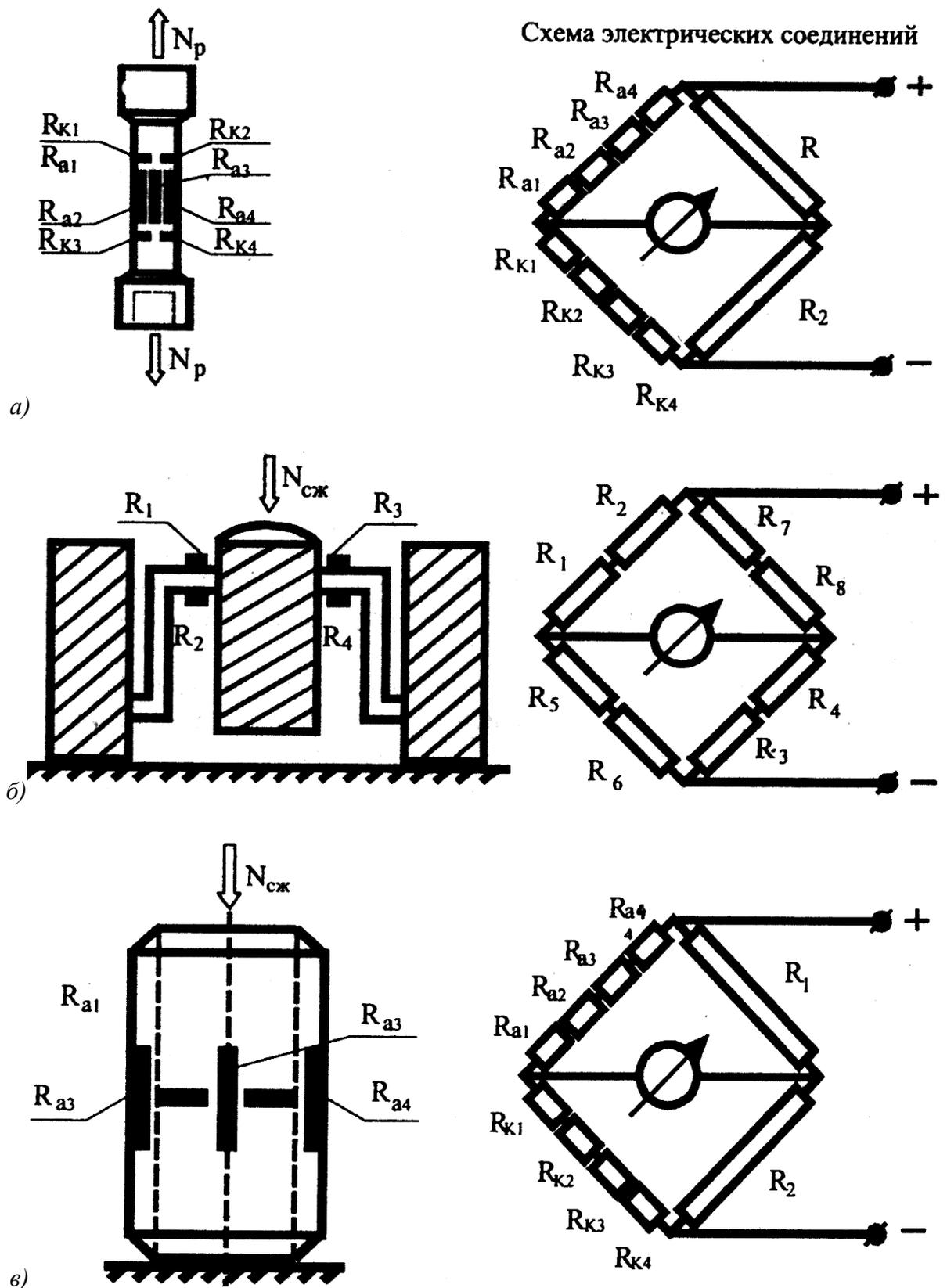


Рис. 7. Конструктивные особенности электромеханических динамометров:
 а – для измерений растягивающих усилий,
 б, в – для измерений сжимающих усилий

5.3. *Приборы для линейных измерений.* При испытаниях деревянных конструкций, в особенности большепролетных, приходится измерять перемещения

порядка нескольких сантиметров. Перемещения различных точек металлических конструкций колеблются в зависимости от размеров испытываемого объектов – от нескольких миллиметров до десятков миллиметров. Наиболее жесткими являются железобетонные конструкции, где перемещения относительно не большие. Особенно повышенные требования предъявляются при наблюдении за характером затухания приращения перемещений во времени в ходе выдерживания нагрузки. В большинстве случаев при этом необходимы измерения с точностью: порядка миллиметра – для деревянных конструкций; десятых и сотых миллиметра – для металлических конструкций; а в отдельных случаях и даже тысячных миллиметра – для железобетонных несущих и ограждающих конструкций. Для удовлетворения всех этих требований и достижения максимальной объективности и достоверности выполненных измерений на практике необходимы приборы с высокими метрологическими характеристиками.

Прогибомеры. Приборы для измерения перемещений называют *прогибомерами*. В зависимости от назначения прогибомеры могут иметь различную конструкцию. В одних случаях это могут быть простейшие устройства, позволяющие замерять перемещения загруженных строительных конструкций с точностью не выше 0,1...1 мм. При больших перемещениях такая точность бывает достаточной. В других случаях, когда требуется высокая точность измерений, достигающая 0,01мм и выше, используются более чувствительные приборы со сложными измерительными устройствами.

Рассмотрим элементарные прогибомеры. К наиболее простым прогибомерам относится устройство, представляющее собой две планки, одна из которых закреплена на железобетонном основании, а другая – на конструкции. По взаимному смещению планок судят о деформации конструкции. Точность измерений таким устройством, как правило, невысокая, но если металлические планки тщательно выполнены и сопряжены между собой, прочно закреплены и снабжены нониусным устройством, то точность измерений можно довести до 0,1мм (рис. 8,а).

На практике при измерениях *вертикальных перемещений* для измерения деформаций и перемещений с точностью до 0,1...0,2 мм применяют рычажные *прогибомеры*. При этом перемещение одного плеча рычага равно перемещению конструкции, а перемещение другого плеча, фиксируемое на рабочей шкале, в K раз больше (рис. 8,б,в). Недосток таких элементарных приборов связан с тем, что они имеют небольшое увеличение ($K < 10...20$) и одновременно в системе возможны различные люфты и неточности в соотношении плеч строительных конструкций и варианты установочных схем показаны на рис. 12 и 13.

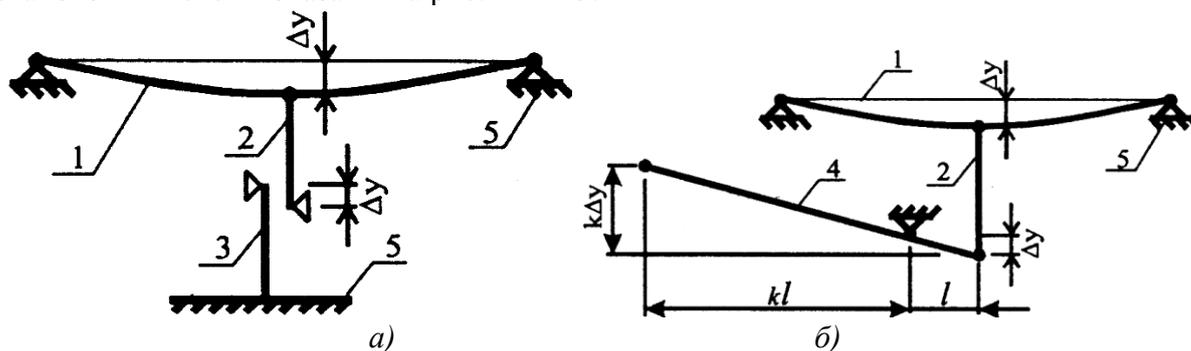


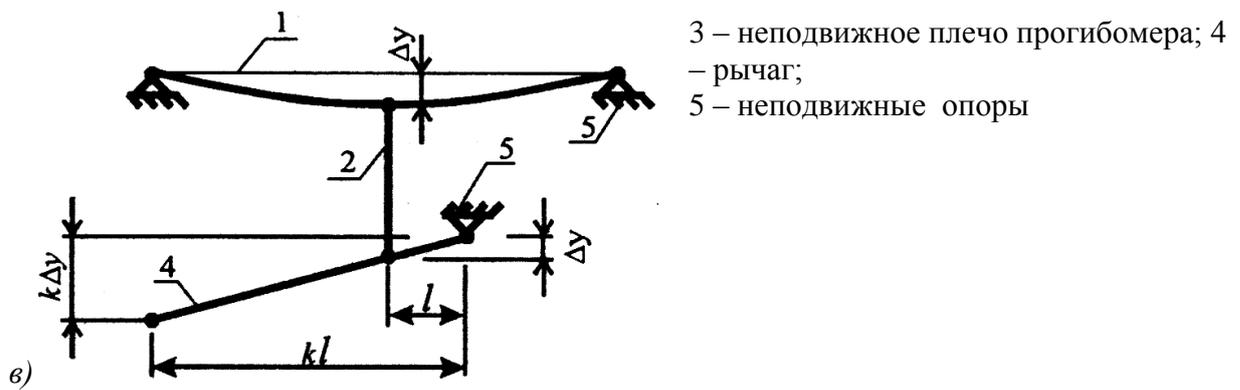
Рис. 8.

Конструктивные схемы элементарных прогибомеров:

а – прогибомер прямого измерения; б, в – прогибомеры с рычажными усилителями;

1 – изогнутая ось загружаемой конструкции;

2 – рабочее плечо прогибомера;



Для более точных измерений применяют прогибомеры, в которых используется редукторная кинематическая схема с проволоочной связью, рис. 9. Прогибомер соответственно закрепляют в перемещающейся (или неподвижной) точке, а к свободному концу проволоки, огибающей шкив прогибомера, подвешивают груз, создающий в ней постоянное натяжение. При смещении прибора на f шкив повернется на угол $\varphi = f / r$. Угловое перемещение шкива через систему передач отклоняет стрелку прибора. Указанная система передач обеспечивает необходимое увеличение измеряемого перемещения (прогиба).

В настоящее время в статических испытаниях мостов широко используется прогибомер Н. Н. Максимова, рис. 10. Хорошо зарекомендовали себя еще две их разновидности конструкции А. М. Емельянова и Н. Н. Аистова, кинематические схемы которых представлены на рис. 10, б, в. В прогибомере Максимова (рис. 9, а) перемещение гибкой нерастяжимой нити 1, охватывающей шкив 2 и соответствующей такому же перемещению испытываемой конструкции, вызывает поворот диска 3 на угол $\Delta\varphi$ и стрелки 3 на угол $k\Delta\varphi$ (k – отношение диаметров диска и фрикционного барабана). При этом точность отсчета по рабочей шкале достигает 0,05 мм.

Диапазон измерений – неограниченный. Одним из главных недостатков прибора является наличие в кинематической схеме прибора – нежесткого фрикционного соединения.

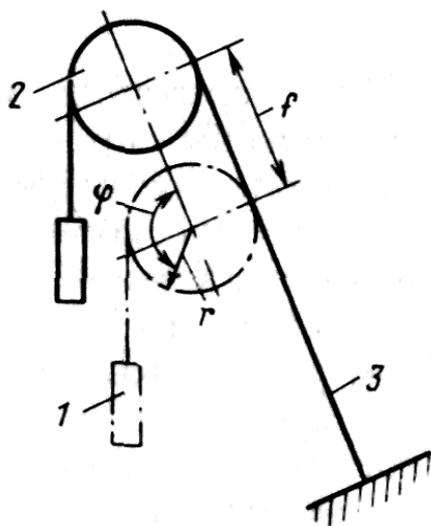


Рис. 9. Схема работы прогибомера с проволоочной связью: 1 – груз; 2 – шкив; 3 – проволока

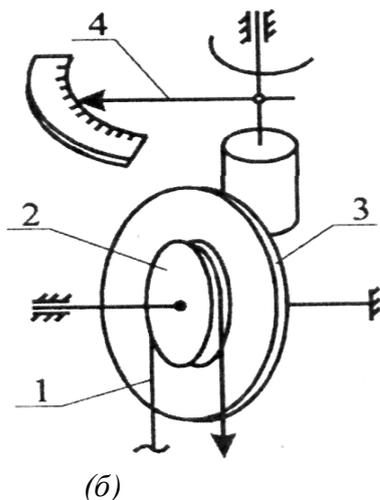
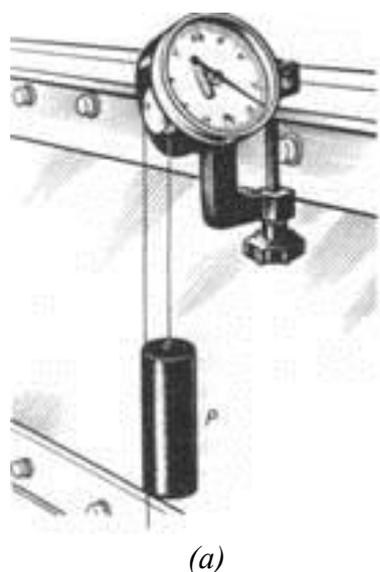


Рис. 10. Общий вид (а) и кинематическая схема прогибомера Максимова (б):
1 – нерастяжимая нить; 2 – рабочий шкив; 3 – рабочий диск; 4 – регистрирующая тарелка

В *прогибомере Емельянова* (рис. 11,а) передача вращения осуществляется с помощью шестерен. При этом шкив шестерен и стрелки находятся в параллельных плоскостях. По одной шкале отмечаются целые миллиметры, по другой – до 0,01мм. При этом диапазон измерений в одном приборе также неограничен. Люфт зубчатого соединения устраняется с помощью пружины разворачивающей шестерни в противоположные стороны.

У *прогибомера Аистова* (рис. 11,б) принципиальная кинематическая схема практически аналогична предыдущей схеме. Однако используемые в ней некоторые усовершенствования позволяют одновременно на трех рабочих шкалах оценивать перемещения испытываемой конструкции с точностью: на первой до 1 см (полный поворот равен 10 см), на второй – до 1мм (полный поворот равен 10мм), на третьей – до 0,01 мм (полный поворот равен 1 мм). Способы установки прогибомеров зависят от удобства снятия отсчетов и месторасположения неподвижной (нулевой) точки отсчета.

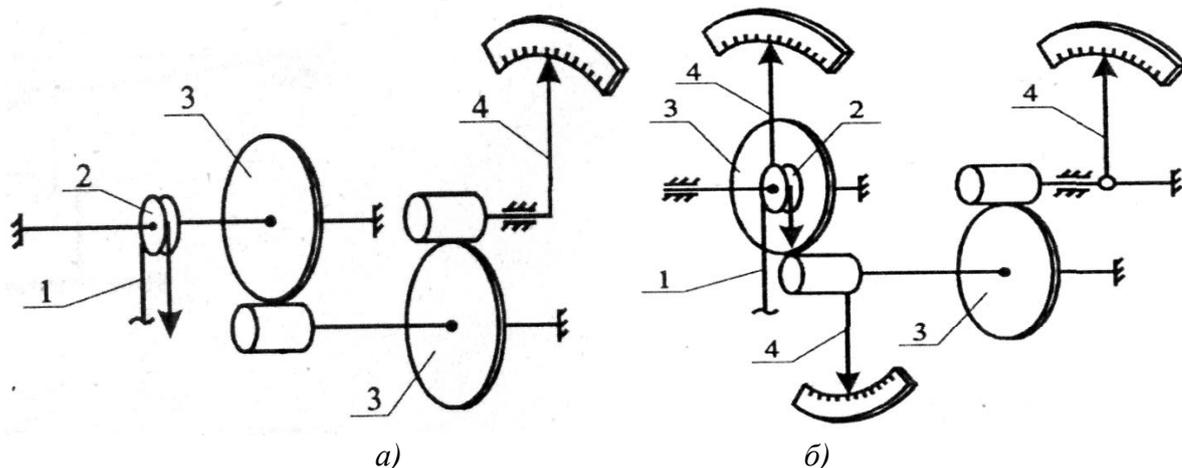


Рис. 11. Кинематические схемы прогибомеров Емельянова (а) и Аистова (б):
1 – нерастяжимая нить; 2 – рабочий шкив; 3 – рабочий диск; 4 – регистрирующая стрелка

1. При наличии доступной неподвижной точки – схема на рис. 12,а (прибор внизу) и схема на рис. 12,б (прибор наверху). Для учета влияния осадок опор требуется установка дополнительных прогибомеров в опорных сечениях. При испытаниях строительных конструкций над водой, при отсутствии быстрого её течения, на дно может быть опущен тяжелый якорь (рис. 12,в), к которому предварительно прикрепляется нижний конец соединительной нити (проволоки).

2. При недоступности или большом расстоянии до неподвижных точек, а также с целью исключения влияния осадок опор на практике достаточно часто применяют систему шпренгелей. В частности, на рис. 13,а показан подвешенный проволочный шпренгель, который оттягивается вниз вертикальной проволокой с пружиной, обеспечивающей практическое постоянство натяжения шпренгеля и тем самым требуемую неподвижность точки крепления рабочей проволоки 4 и прогибомера 3. На рис. 13,б показан шпренгель, оттягиваемый подвешенным грузом, а на рис. 13,в видно, как постоянство натяжения шпренгеля обеспечивается пружиной, соединяющей его вершину с верхним поясом испытываемой балки.

Пример установки прогибомеров для измерения *оризонтальных перемещений* испытываемого объекта приведен на рис. 14. Одновременно следует отметить, что на результаты измерений перемещений, с помощью рассмотренных прогибомеров значительное влияние оказывает изменение длины проволоки в зависимости от температуры воздуха и нагрева её лучами солнца. Так, стальная проволока длиной 1 м при повышении температуры на 10°C удлиняется более чем на 1 мм, что должно тщательно учитываться при обработке результатов проведенных испытаний.

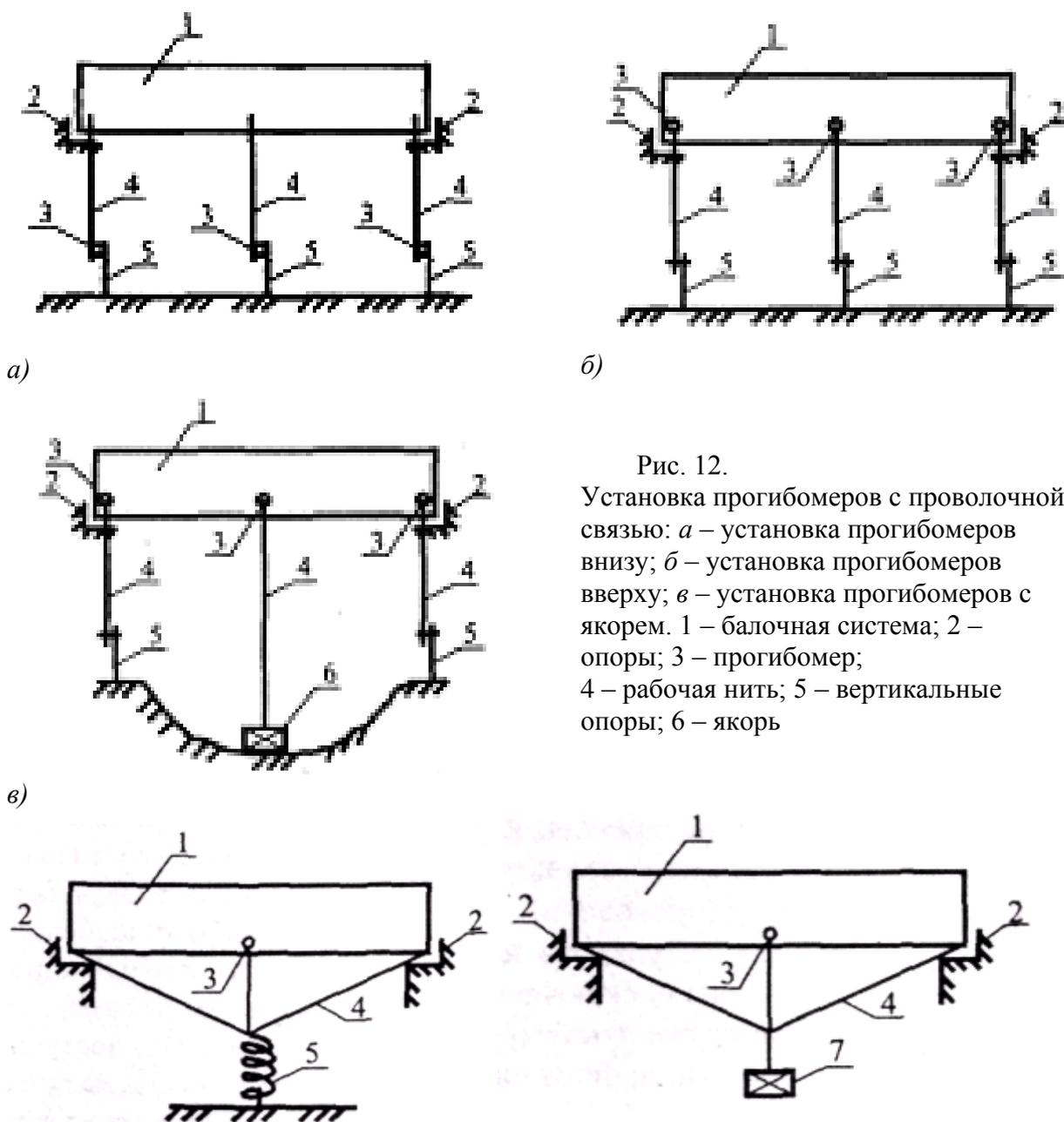


Рис. 12.
Установка прогибомеров с проволочной связью: а – установка прогибомеров внизу; б – установка прогибомеров вверху; в – установка прогибомеров с якорем. 1 – балочная система; 2 – опоры; 3 – прогибомер; 4 – рабочая нить; 5 – вертикальные опоры; 6 – якорь

а)

б)

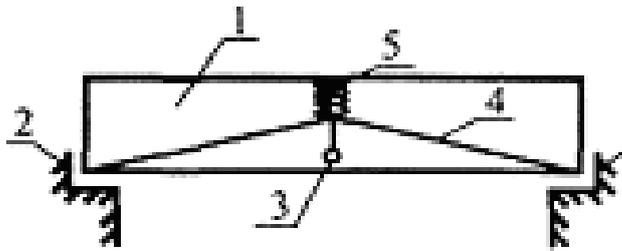


Рис. 13.
Установка прогибомеров с применением рабочей нити к шпренгелю с целью исключения влияния осадок опор: а – шпренгель с пружиной; б – шпренгель с грузом; в – шпренгель с закреплением пружины на конструкцию;
1 – балочная система; 2 – опоры;
3 – прогибомер; 4 – шпренгель;
5 – пружина; 6 – рабочая нить (проволока); 7 – груз

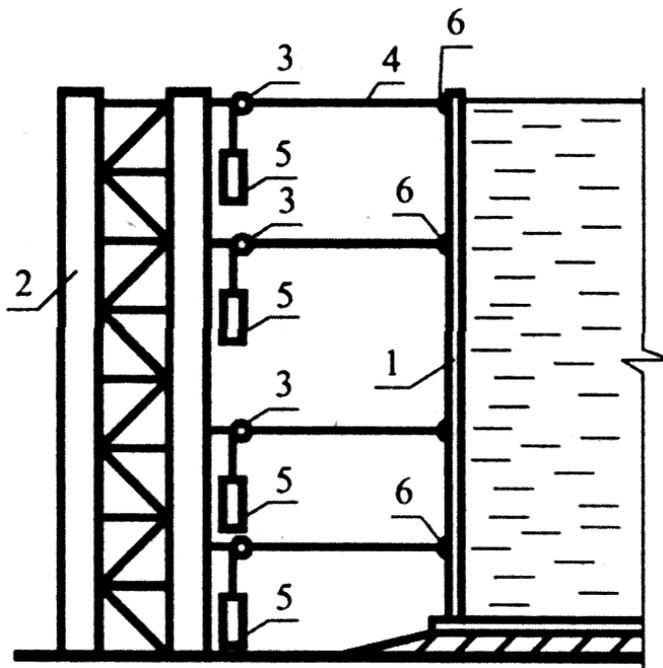


Рис. 14.
Установка прогибомеров для измерения горизонтальных перемещений стенки резервуара:
1 – стенка резервуара;
2 – временная опора;
3 – прогибомеры;
4 – рабочая нить;
5 – противовес;
6 – элемент крепления

Индикаторы (мессуры). Для измерения небольших по абсолютной величине перемещений применяют индикаторы часового типа, которые устанавливаются на неподвижной опоре с упором подвижного измерительного стержня в испытываемую конструкцию или закрепляются на испытываемой конструкции с упором подвижного стержня в какую-либо неподвижную точку. Поэтому очень часто индикаторы называют *контактными прогибомерами*. На практике применяют следующие индикаторы: (а) с ценой деления 0,01мм и пределом измерения 0...50 мм; 0...25мм; 0...10мм; 0...5мм; 0...2мм; (б) с ценой деления 0,001 мм и пределом измерения 0...1мм. Индикатор часового типа (рис. 15) состоит из цилиндрического корпуса, внутри которого размещена вся кинематическая система прибора. На лицевой стороне прибора под стеклом располагается кольцевая шкала и большая стрелка для регистрации отчета с ценой деления либо 0,01мм, либо 0,001мм. Для отсчета целых оборотов большой стрелки индикатора преду-

считывается вторая малая шкала со стрелкой. Схемы установки индикаторов часового типа для испытаний строительных конструкций могут быть идентичны ранее описанным схемам установки обычных прогибомеров с проволочной связью.

Индикатор укрепляют таким образом, чтобы обеспечить передачу измеряемых перемещений на шток. Закрепляется индикатор специальными подставками, струбцинами или винтом через ушко у корпуса. Их обычно закрепляют на одном месте на весь период испытаний. На базе индикатора созданы разновидности прибора, который называется *деформометром* (рис. 16). Этот прибор устанавливают на место измерения только для снятия отсчетов, что значительно расширяет его использование.

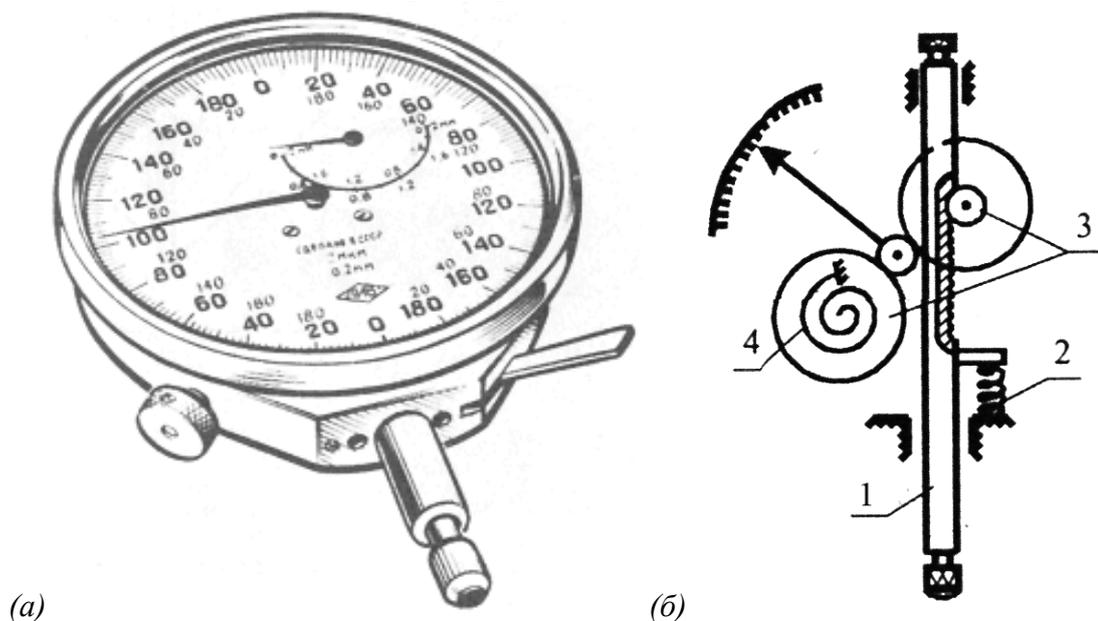


Рис. 15. Индикатор часового типа (а) и его кинематическая схема (б):
 1 – рабочий шток с рейкой – кремальерой; 2 – возвратная пружина;
 3 – зубчатые шестерни; 4 – система ликвидации люфта

Деформометрами измеряют различного рода перемещения, раскрытие трещин, деформации (напряжения) и др. Одним таким прибором можно выполнять измерения во многих местах и в течение длительного времени. Основная часть деформометра – индикатор, к задней его крышке наглухо прикреплена пластинка 4 с конусной ножкой. К штоку 1 закреплена конусная ножка 2. Прибор устанавливают на этих ножках в специально просверленные в марках отверстия диаметром около 1 мм и глубиной 2...3 мм. Если измерения выполняются на металлических конструкциях, то отверстия сверлят непосредственно в них, а в деревянных, железобетонных и каменных конструкциях в местах установки ножек деформометра заделывают специальные металлические стержни (марки) диаметром 3...5 мм и длиной 10...20 мм с просверленными в них отверстиями для установки деформометра. Расстояние между конусами ножек является базой измерения. Деформометры такого конструктивного исполнения изготавливают с базами от 50 до 250 мм. Приборы с большей базой (до 1 м) имеют жесткую конструкцию, чтобы исключить влияние деформации прибора на его показания. Созданы деформометры других конструкций с опорными шариками, которыми прибор опирается на марки (рис. 17).

При больших расстояниях между индикаторами и точками упора между ними помещают жесткие соединительные элементы, например легкие штанги (рис. 18).

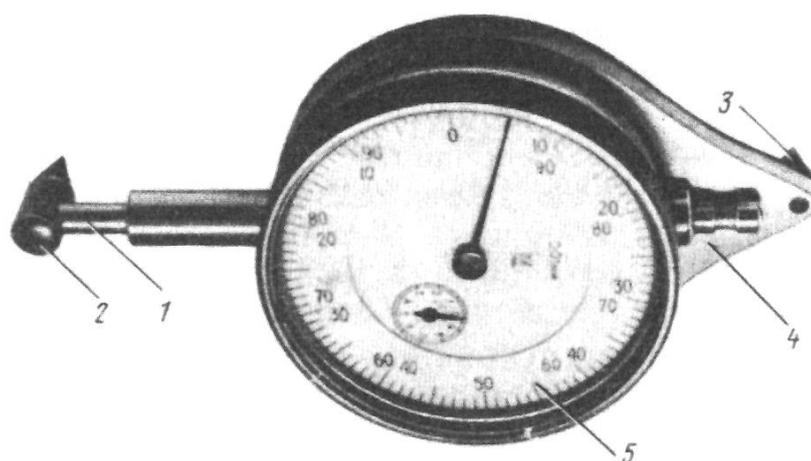


Рис. 16.
Деформометр:
1 – шток;
2 – подвижная
конусная
ножка;
3 – неподвижная
ножка;
4 – пластинка,
5 – индикатор

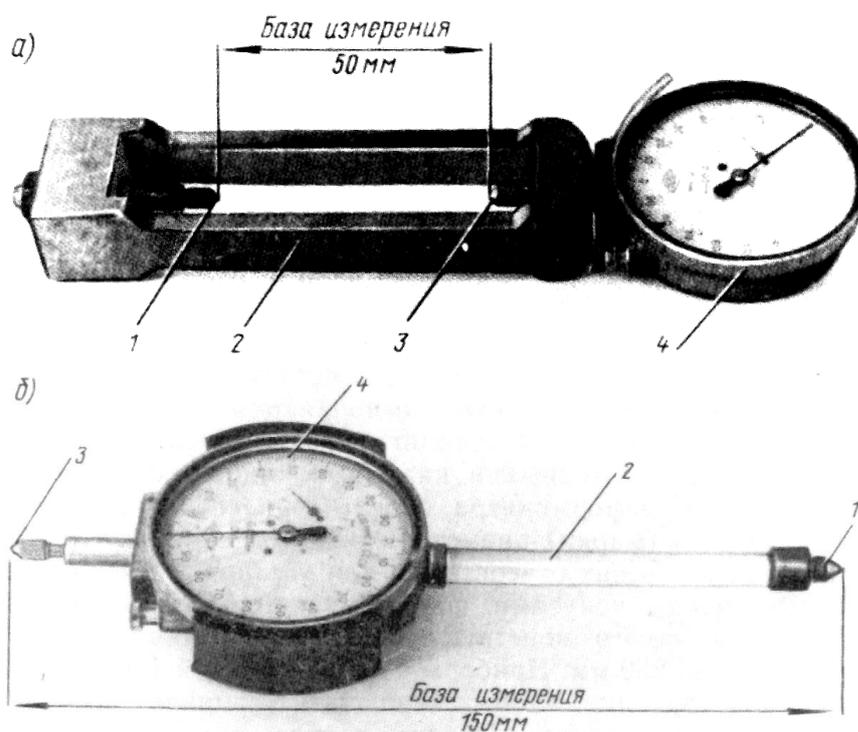


Рис. 17. Съемные деформометры с базами измерения 50 мм (а) и 150 мм (б):
1 – неподвижная шаровая опора; 2 – удлинитель; 3 – шток с подвижной шаровой опорой;
4 – индикаторная головка

Наличие подобною рода буферных элементов связано, однако, с возможностью возникновения дополнительных ошибок измерений в результате хотя и малых, но трудно устранимых дискретных смещений и обмятый в дополнительных соединениях, коробления деревянных реек, изменения длины связующих металлических элементов при переменной температуре и т.д. Возможны колебания также буферных реек при порывах ветра, что делает более целесообразным применение проволочной связи с индикатором по схеме, представленной на рис. 18.

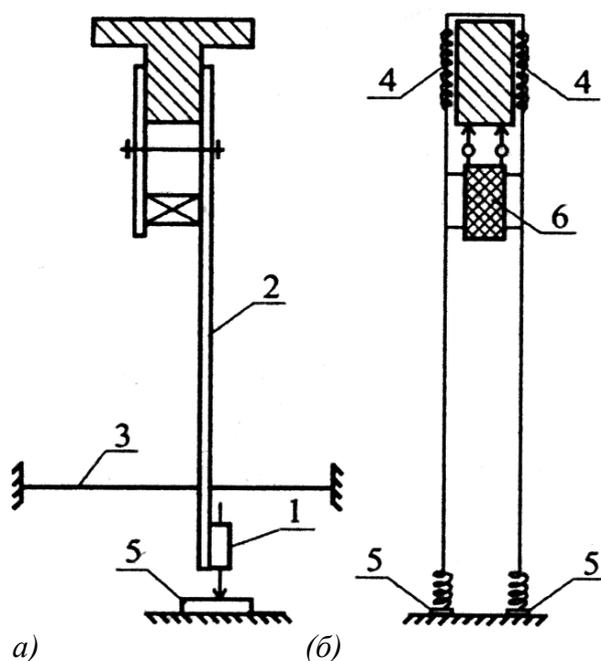


Рис. 18.
 Схема установки индикаторов при удаленных измерениях перемещений:
 а – с использованием рейки-удлинителя;
 б – с применением проволочной связи;
 1 – индикатор;
 2 – рейки-удлинители;
 3 – проволочная растяжка;
 4 – пружины; 5 – опора;
 6 – буферная неподвижная опора

Прогибомер закрепляют к конструкции струбцинами. Для связи используют стальную проволоку диаметром около 0,5 мм, масса груза должна быть 1...2 кг. Прогибомерами можно измерить взаимные перемещения точек в различных направлениях; направление измеряемого перемещения будет совпадать с направлением проволоки, связывающей взаимно перемещающиеся точки.

При испытании мостов прогибомерами измеряют вертикальные прогибы пролетных строений под статической нагрузкой. Если пролетное строение расположено над открытой поверхностью земли, то прогибомер можно устанавливать на пролетном строении (в подвижной точке) или на забитой под пролетным строением свайке (в неподвижной точке). Выбор места установки прогибомера в этом случае зависит от удобства снятия отсчетов. Если пролетное строение находится над водой, то прогибомер закрепляют на пролетном строении. Для обеспечения связи с землей (неподвижной точкой) под прогибомером на дно водоема опускают груз массой около 10 кг, к которому привязывают конец проволоки. При большой длине проволоки из-за температурных изменений в ней могут возникнуть значительные деформации: их нужно учитывать, иначе будут погрешности в измерении прогибов. Для учета температурных деформаций температуру воздуха измеряют при снятии каждого отсчета.

Для измерения прогибов на пролетном строении устанавливают не менее трех прогибомеров: два у концов и один в месте измерения прогиба. Это позволяет исключить осадки опор и опорных частей, которые определяются по показаниям концевых прогибомеров.

Электромеханические измерители перемещений. В настоящее время существует большое количество электромеханических систем измерений, позволяющих преобразовать механические перемещения в электрические сигналы, усиливаемые и передаваемые на любые расстояния от места проведения статических испытаний строительных конструкций. Указанные системы сопрягаемы с любой вычислительной техникой, что позволяет обрабатывать полученные сигналы по запланированной программе и одновременно управлять проводимыми экспериментами. В частности, к подобным измерителям перемещений относятся различные конструктивные решения, основанные на преобразовании механических перемещений в изменение их емкости, либо индуктивности или электрического сопротивления. Все вышеперечисленные системы преобразования относятся к пассивным. Наряду с пассивными системами в технике статических испытаний существуют и активные системы преобразования, основанные на

генерировании непосредственно самим преобразователем электрических сигналов. Подобные системы используются в так называемых "следающих" системах, называемых сельсинами. *Сельсины* – это генераторные электрические устройства для синхронной передачи углов поворота. При этом запись либо углов поворота, либо линейных перемещений на регистрирующем приборе можно проводить с заданным увеличением, в отличие от обычного классического механического прогибомера. На практике наиболее часто для дистанционного измерения перемещений используют электромеханические измерители перемещений на базе применения тензопреобразователей (рис. 19, *а, б*), которые позволяют измерять перемещения в диапазоне от 0 до 50 мм с точностью, превышающей 0,001мм.

5.4. Клинометры. Углы наклона элементов, подлежащие определению при испытаниях в пределах расчетных нагрузок, как правило, не велики. В большинстве случаев приходится учитывать доли градуса и минуты, а при испытаниях особо жестких железобетонных конструкций – и секунды. Приборы и приспособления, применяемые для измерения столь малых углов, должны обладать высокой чувствительностью.

При загрузках за пределами расчетных нагрузок, и в особенности при приближении к стадии разрушения, угловые перемещения начинают резко возрастать, и для определения их оказываются более целесообразными геодезические методы и фотосъемка. Ниже рассмотрены основные типы клинометров и приспособлений для измерения малых угловых перемещений.

1. Способ жесткого рычага. К наблюдаемому сечению крепится металлическая консоль (рис. 20). Линейные перемещения двух точек консоли, обусловленные наклоном сечения, измеряют с помощью прогибомеров. Зная разность перемещений на базе B , определяем угол наклона α .

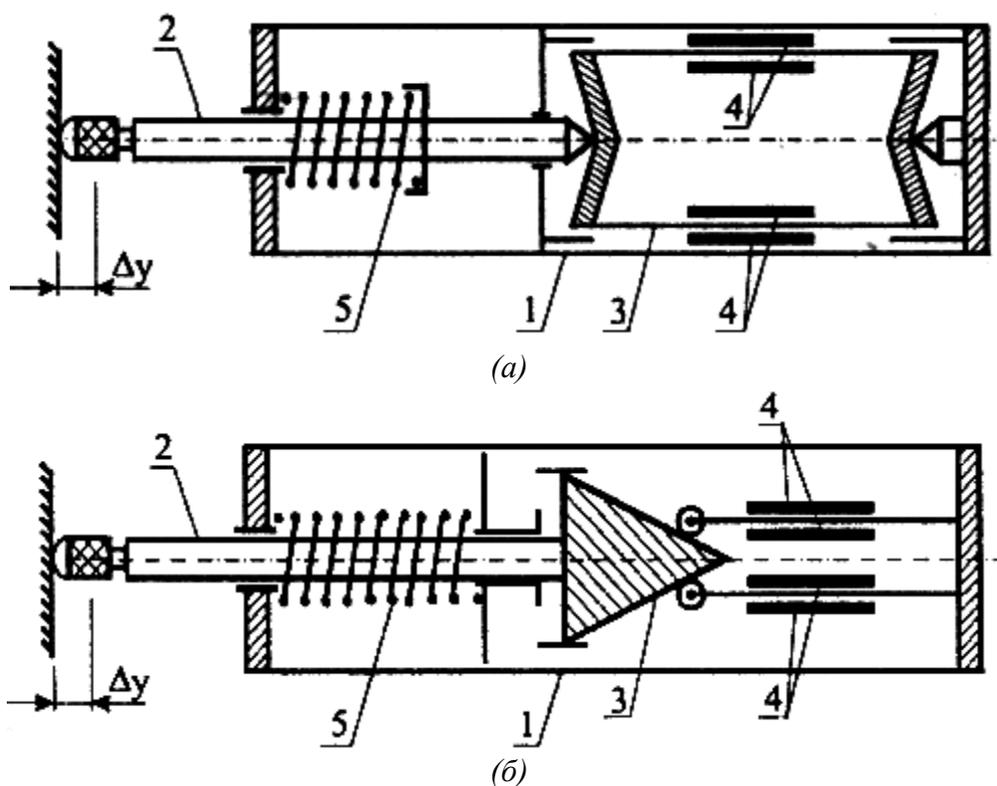


Рис. 19. Электромеханический измеритель перемещений: *а* – в диапазоне 0 – 1 мм с ценой деления 0,0001 мм; *б* – в диапазоне 0 – 10 мм с ценой деления 0,001 мм; 1 – корпус; 2 – рабочий шток; 3 – система преобразования перемещений; 4 – тензосопротивления; 5 – пружина

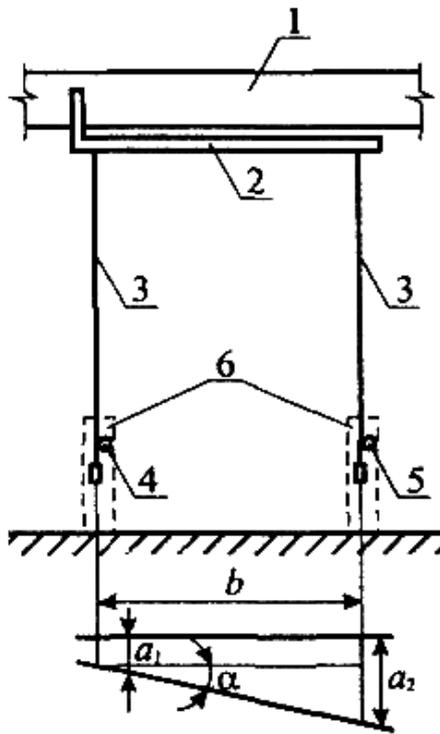
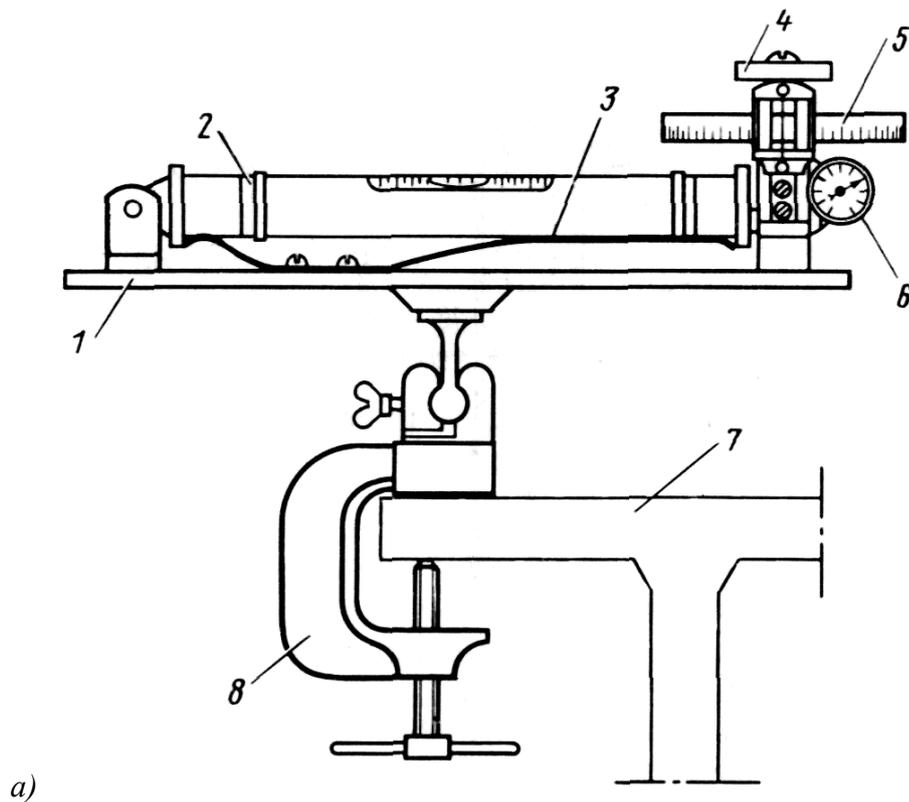


Рис. 20.
Измерение угла наклона при помощи жесткой консоли:
1 – испытываемый элемент;
2 – жесткая консоль;
3 – соединительная проволока;
4, 5 – прогибомеры;
6 – неподвижные опоры для крепления прогибомеров;
 a_1 и a_2 – перемещения, измеренные прогибомерами

2. **Клинометр с уровнем.** Общий вид и кинематическая схема их показана на рис. 21. Прибор состоит из станины 1, к которой слева шарнирно прикреплен уровень 2, поддерживаемый пластинчатой пружиной 3. Правый конец уровня микрометрическим винтом 4 можно перемещать в вертикальной плоскости. К микрометрическому винту жестко прикреплен диск 5 с делениями. На испытуемой конструкции прибор закрепляется струбциной 8, соединенной шаровым шарниром со станиной. Для измерения угла поворота конструкции к ней в определенной точке струбциной 8 прикрепляется клинометр. Продольная ось уровня должна находиться в плоскости измеряемого угла поворота.



a)

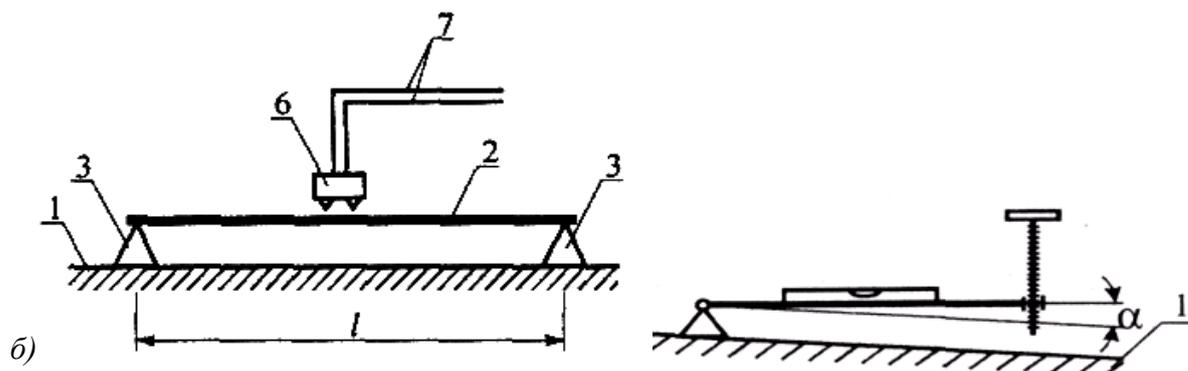


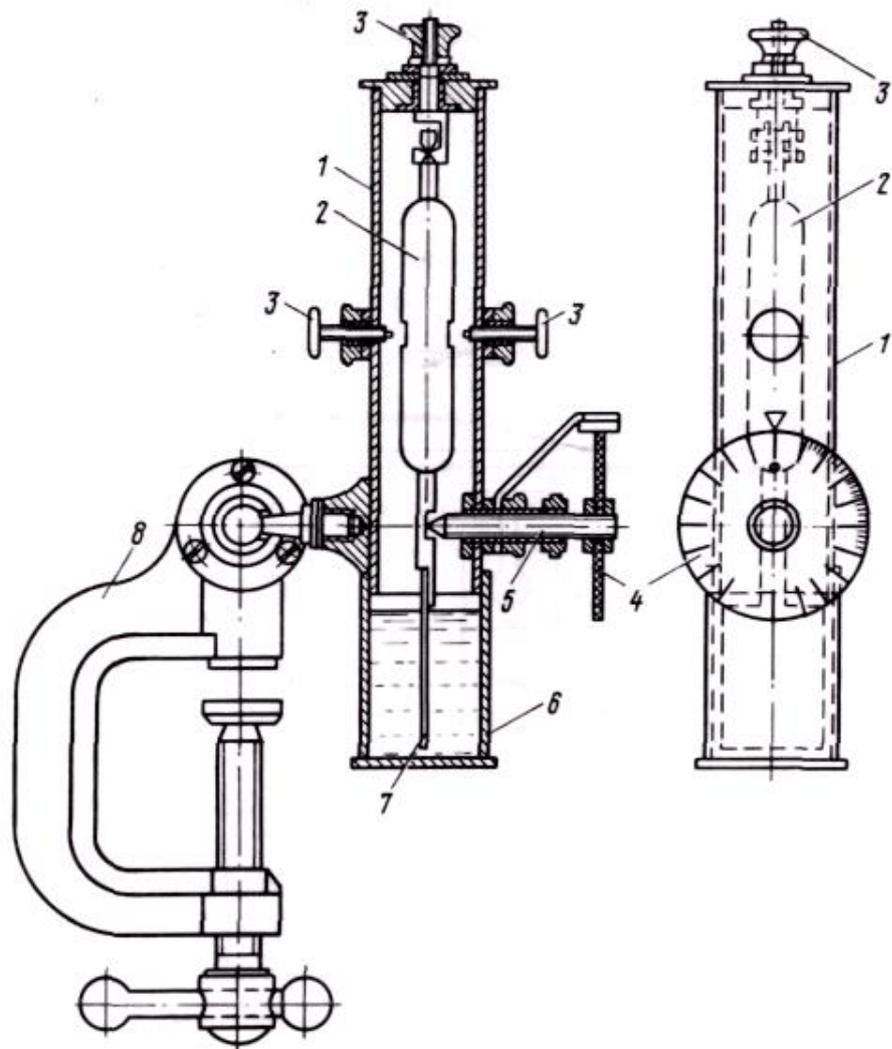
Рис. 21. (а) Клинометры с уровнем Стопани: 1 – станина; 2 – уровень; 3 – пластинчатая пружина; 4 – микрометрический винт; 5 – диск с делениями; 6 – счетчик числа оборотов диска; 7 – элемент пролетного строения; 8 – струбцина; (б) снятие отсчетов: 1 – исследуемая конструкция; 2 – высокоточный уровень; 3 – микрометрический винт; 4 – барабан микрометрического винта со шкалой; 5 – шарнирная опора

Уровень устанавливается поворотом шарового шарнира и микрометрическим винтом 4. Это положение фиксируют снятием отсчета по счетчику 6 числа оборотов микрометрического винта (счетчик показывает целое число оборотов винта) и по шкале диска 5 (показывает долю оборота винта). При повороте конструкции, нагруженной испытательной нагрузкой, уровень повернется на тот же угол. Для определения угла поворота уровень микрометрическим винтом возвращают в горизонтальное положение и снова снимают отсчет.

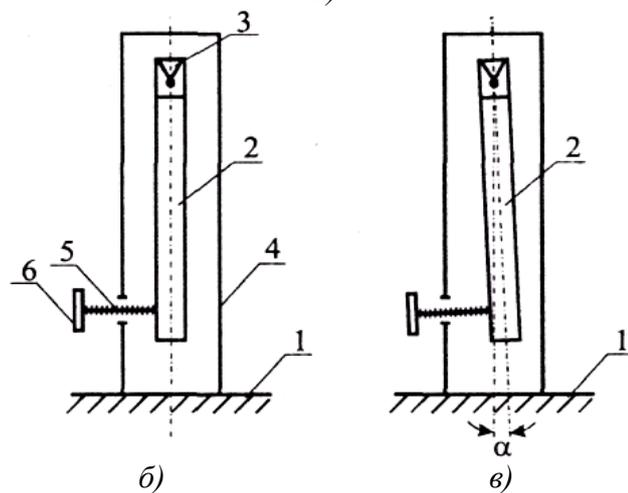
Разность отсчетов, умноженная на шаг винта, равна перемещению конца уровня Δ . Отношение Δ/l равно тангенсу измеренного угла поворота. Цена деления на горизонтальном диске 5 в клинометрах этого типа равна $1 \dots 2''$.

3. Маятниковые клинометры. Схема прибора показана на рис. 22, б, в. Отвес 2 опирается при помощи призмы 3 на опору, расположенную внутри корпуса 4 клинометра. Положение отвеса фиксируется микрометрическим винтом 5. Отсчеты берутся по шкале 6 барабана винта с ценой деления в 2×10^{-2} мм. Разность отсчетов, соответствующих положениям рис. 20, б, в, дает определяемый угол наклона α . Во избежание смещения отвеса микрометрическим винтом контакт их отмечается электросигналом (при соприкосновении острия винта 5 с отвесом 2 замыкается слаботочная электрическая цепь с лампочкой или звонком). Рассмотренный прибор не требует связи с каким-либо репером, что является (в особенности при длительных наблюдениях) серьезным преимуществом представленного клинометра по сравнению с другими.

Маятниковый клинометр конструкции Н. Н. Аустова (рис. 22, а). Прибор состоит из закрытого корпуса, внутри которого подвешен маятник 2. Нижний конец маятника может контактировать с микрометрическим винтом 5, на наружном конце которого расположен диск 4 с делениями. Через клеммы 3 прибор включается в электрическую цепь с лампочкой или звонком. Эта цепь может замыкаться через маятник с микрометрическим винтом. Клинометр струбциной с шаровым шарниром закрепляется вертикально на испытуемой конструкции таким образом, чтобы плоскость качания маятника совпадала с плоскостью измеряемого угла поворота. Затем микрометрический винт 5 вращают до контакта его с маятником (появления светового или звукового сигнала). В этот момент снимают отсчет по шкале диска и отводят микрометрический винт от маятника. При нагружении конструкции корпус прибора повернется вместе с конструкцией относительно маятника на измеряемый угол. Для его определения вращением винта снова замыкается цепь и снимается отсчет по шкале диска. Разность отсчетов в определенном масштабе дает угол поворота.



a)



б)

в)

Рис. 22. (а) Клинометр Н. Н. Аистова КА-4: 1 – корпус; 2 – маятник; 3 – клемма, 4 – диск с делениями; 5 – микрометрический винт; 6 – сосуд с жидкостью; 7 – весло; 8 – трубка; (б), (в) схема определения угла наклона:

1 – исследуемая конструкция; 2 – отвес; 3 – опорная призма; 4 – корпус прибора; 5 – микрометрический винт; 6 – барабан;

Угол поворота в любой плоскости можно измерить при помощи рычажного устройства (рис. 23). Для этого к исследуемому участку конструкции (балки) одним концом наглухо прикрепляют рейку 1. При деформации конструкции эта рейка будет

повертываться на тот же угол, что и сечение балки, в котором она прикреплена. Для определения угла поворота измеряют прогибомерами 2 или индикаторами перемещение двух точек рейки *A* и *B* в направлении ее поворота. По измеренным перемещениям Δ_1 и Δ_2 определяется тангенс угла поворота и угол α :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta_2 - \Delta_1}{l},$$

где l – расстояние между точками измерения перемещений.

Рычажным устройством можно определить взаимные повороты каких-либо двух сечений элемента конструкции. Для этого в каждом сечении укрепляют рейки и измеряют взаимные перемещения их точек.

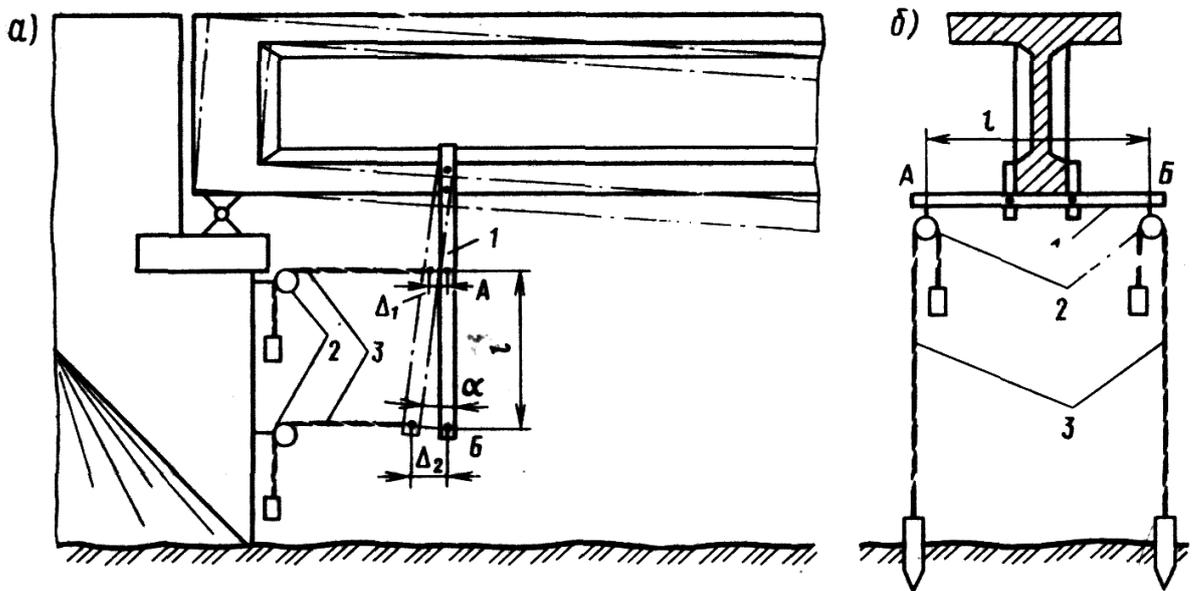


Рис. 23. Схема рычажного устройства для измерения углов поворота сечений пролетного строения: а) – в продольном направлении; б) в – поперечном;
1 – рейка; 2 – прогибомеры; 4 – проволочная связь

4. *Оптический клинометр.* К наблюдаемой точке прикрепляется небольшое зеркальце (отсюда и другое название – «зеркальный способ»). Зеркало 1 (рис. 24) ориентируется так, чтобы с помощью зрительной трубы 2 (обычно, геодезического инструмента) мог быть сделан отсчет по шкале 3 измерительной рейки, расположенной рядом с инструментом. При изменении наклона исследуемого элемента на угол α зеркальце проворачивается вместе с ним на тот же угол, что сопровождается поворотом «оптического рычага» *CB* на угол 2α . Зная расстояние L между рейкой и зеркальцем и изменение a отсчетов по рейке, находим значение α :

$$\alpha \approx a / 2l. \quad (38)$$

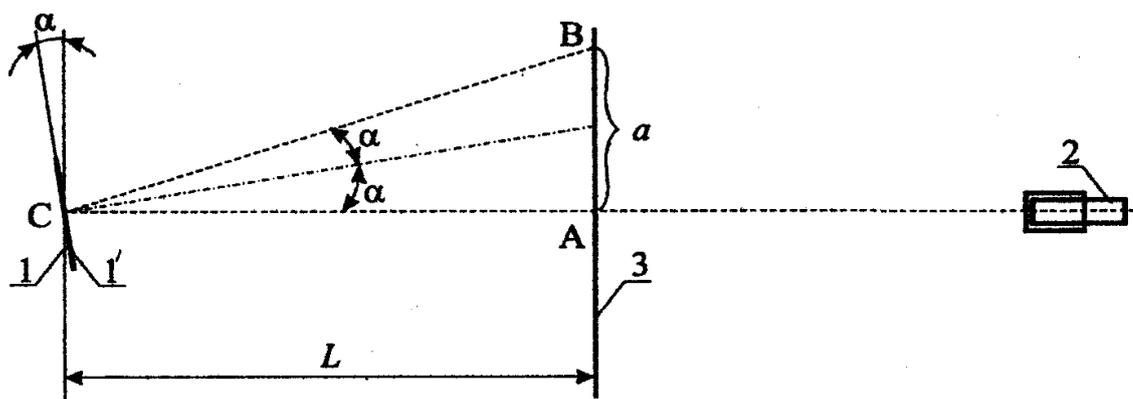


Рис. 24. Схема измерения углов наклона с помощью оптического клинометра:
 1 – зеркало в положении до деформации и 1' – после деформации; 2 – зрительная труба; 3 – шкала зрительной рейки; $a = AB$ – разность отсчетов по рейке до и после деформации

Для облегчения ориентировки зеркало шарнирно крепится к установочной струбцине так, чтобы оно могло проворачиваться вокруг двух взаимно перпендикулярных осей I и II. Применение зеркального способа особенно целесообразно при наблюдении за отдаленными точками сооружения, трудно доступными во время испытания. Другая область применения – наблюдения за изменением углов наклона весьма гибких элементов (например, на моделях), где исключена установка сравнительно тяжелых клинометров или крепление консолей с прогибомерами.

5.5. Тензометры. Тензометры применяются для измерения линейных деформаций поверхностных волокон элементов конструкций при статических испытаниях. Величина измеренной тензометром деформации может быть использована для вычисления приращения напряжения по закону Гука при известном значении модуля упругости материала или для определения модуля упругости при известном значении напряжения. По конструктивному признаку можно выделить четыре разновидности тензометров: *механические, электрические, струнные, тензорезисторные.*

1. Механические тензометры. Механические тензометры представлены рядом типов различного конструктивного оформления. Остановимся несколько подробнее на наиболее распространенном *рычажном* тензометре (Гугенбергера) с кинематической схемой, показанной на рис. 25,а. На жесткой станине 1 с левой стороны

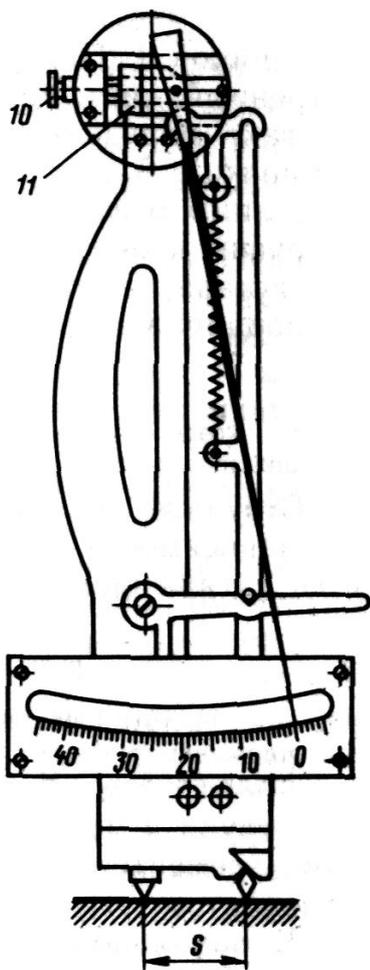
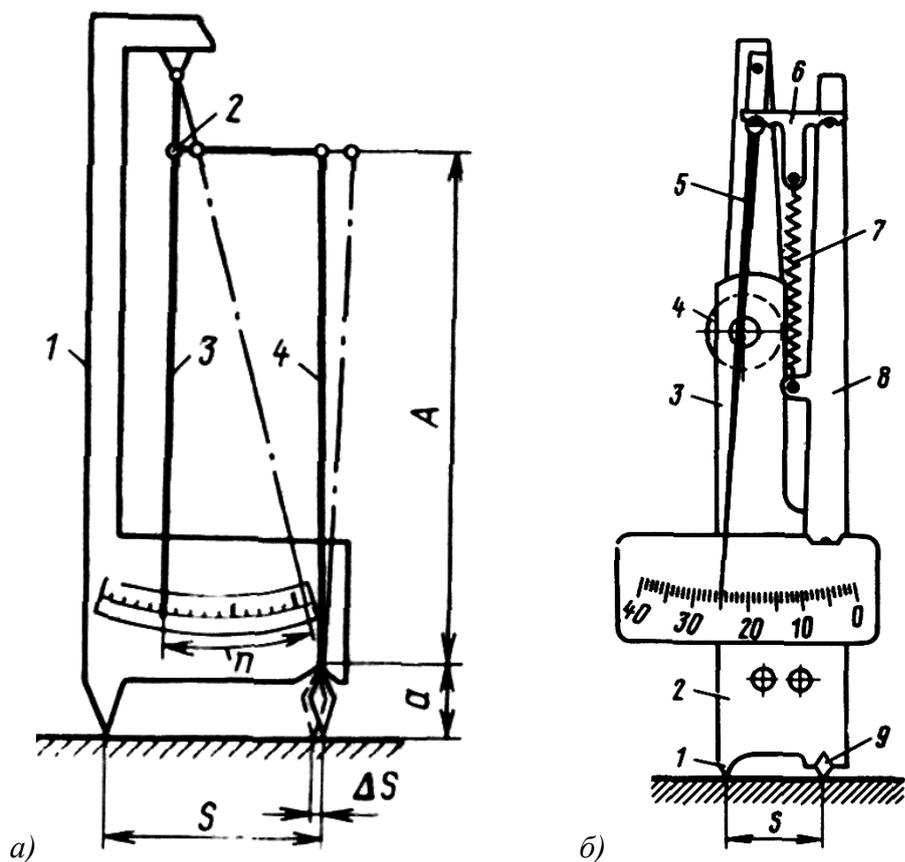


Рис. 25. Кинематическая схема (а) двухрычажного тензомера:
 1 – станина; 2 – коромысло; 3 – рычаг (стрелка) второго рода; 4 – рычаг первого рода; a – малое плечо рычага 4; A – большое плечо рычага 4;
 n – перемещение стрелки по шкале;
 S – база тензомера, ΔS – измеряемая деформация. Общий вид первой (б) и второй (в) модели: 1 – неподвижная ножка; 2 – станина; 3 – стойка, 4, 10 – винт; 5 – стрелка; 6 – коромысло; 7 – пружина; 8 – рычаг; 9 – подвижная ножка; 11 – колодка подвижная

расположены острая неподвижная ножка, а с правой – треугольный вырез для опирания призмы, которая является малым плечом рычага первого рода. Верхняя часть этого

рычага с плечом A шарнирно при помощи коромысла 2 соединена с другим рычагом (стрелкой) второго рода 3 прикрепленным шарнирно к станине 1 . Расстояние между неподвижной ножкой и подвижной призмой – база S . При установке острая ножка и призма струбциной прижимаются и врезаются в поверхность элемента. Нижний конец рычага 4 (призма) при деформации элемента переместится на ΔS , что вызовет перемещение n нижнего конца стрелки 3 , которое определяется по шкале с миллиметровыми делениями. Отношение $n/\Delta S = m$ называется передаточным числом, или коэффициентом увеличения тензометра. Значение m для различных моделей прибора составляет от 800 до 2000. На шкале обычно нанесено 40...50 миллиметровых делений. Следовательно, максимальное значение ΔS , которое может быть измерено без перестановки стрелки, приближенно равно $50/m$ мм. Рассмотрим конструкцию двухрычажного тензометра двух моделей (рис. 25,б,в). Принципиальная схема обеих моделей одна и та же. Станина 2 опирается на конструкцию неподвижной 1 и подвижной 9 ножками. Рычаг 8 – продолжение подвижной ножки – соединен со стрелкой 5 коромыслом 6 , удерживаемым в рабочем положении пружиной 7 . Стрелка устанавливается на нуль изменением положения верхней части стойки 3 после ослабления винта 4 . Во второй модели стрелка устанавливается вращением винта 10 , который перемещает колодку 11 , на которой закреплена ось стрелки. Обычно у тензометров собственная база постоянная $S = 20...10$ мм. В некоторых моделях она может иметь два значения. Это достигается перестановкой пластинок с треугольными вырезами для опирания подвижной призмы. В тех случаях, когда база тензометра недостаточна, к прибору привинчивают удлинители, увеличивающие ее до 500 мм. Для установки тензометра пользуются различного рода струбцинами и приспособлениями. От качества установки тензометра зависит его работа. Тензометр должен быть прижат к испытываемой поверхности силой 20...30 Н. Чрезмерное прижатие прибора может привести к выкрашиванию ножей призмы и ножек и другим повреждениям, слабое – к проскальзыванию. Правильность установки тензометра проверяют, отклоняя стрелку прибора на 2...4 деления в сторону: если прибор установлен правильно, то стрелка не «ползет» по шкале, а после нескольких колебаний возвращается в первоначальное положение. Измеряемую деформацию (напряжение) определяют по разности отсчетов по шкале прибора до и после нагружения конструкции (элемента). Механические тензометры благодаря простоте их конструкции, малой массе, сравнительно высокой точности и надежности измерений, а также возможности быстрой подготовки к измерениям удобны при статических испытаниях мостов.

Однако тензометры со стрелками не лишены недостатков: ограничена возможность измерения больших деформаций без перестановки стрелки, сложно работать на открытом воздухе в ветреную погоду, значительный «мертвый» ход в шарнирных соединениях. Таких недостатков практически нет в тензометрах конструкции Н. Н. Аистова (рис. 26).

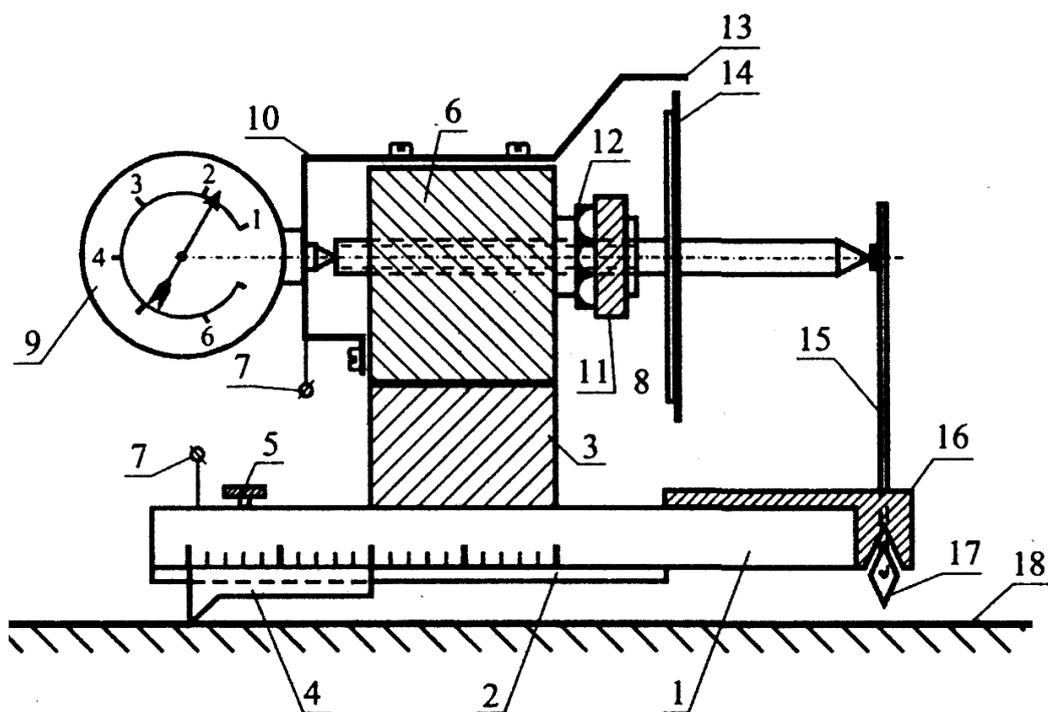


Рис. 26. Кинематическая схема электромеханического тензомера: 1 – основание тензомера; 2 направляющая; 3 – нижняя база тензомера; 4 – опорный нож; 5 – винт фиксирующий; 6 верхняя база тензомера; 7 – электрические клеммы; 8 – микрометрический винт; 9 – счетчик оборотов лимба; 10 – система крепления счетчика; 11 – муфта микрометрического винта; 12 – натяжная гайка; 13 – указатель отсчетов; 14 – лимб; 15 – перо; 16 – вилка; 17 – подвижная призма; 18 – испытываемая конструкция

2. *Электромеханические тензомеры.* Наиболее распространенными в настоящее время среди указанных тензомеров нашли электромеханические тензомеры Аистова. Корпус тензомера состоит из стойки и основания. Стойка прибора разделена электроизоляционной прокладкой на две части 3 и 6. К нижней поверхности основания 1 прикреплена направляющая 2, по которой при настройке прибора на нужную базу перемещается опорный нож 4. Фиксация ножа на направляющей производится винтом 5. На противоположном конце основания имеется вилка 16, в гнездо которой входит подвижная призма 17, жестко соединенная с пером 15. В верхней части 7 стойки прибора находится муфта 11, через которую проходит микрометрический винт 8 с укрепленным на нем лимбом 14. Конец винта, обращенного к перу, имеет форму конуса. С левой стороны на муфте находится кронштейн с указателем (индексом) отсчетов 13 и счетчик 9 регистрации оборотов лимба. Стержень счетчика оборотов упирается в торец микрометрического винта. С правой стороны на муфте имеется натяжная гайка 12, служащая, как и у клинометра Аистова, для устранения люфта между муфтой и винтом. Провода от источника питания подсоединяются к клеммам 7.

Тензомер крепится к исследуемому изделию струбиной. Методика снятия отсчетов с тензомера Аистова такая же, как и с электромеханического клинометра. Чаще всего тензомеры данного типа выпускаются с тысячекратным увеличением, что при базе $l = 20 \text{ мм}$ дает возможность оценивать определяемую деформацию до $\epsilon = 10^{-4}$. Имеются образцы данных тензомеров с увеличением в несколько тысяч раз и базой до 2 мм, используемых при измерениях, например, в зонах концентрации напряжений.

2. *Струнные тензомеры.* В этих приборах дистанционного действия использована зависимость между частотой f собственных колебаний и натяжением струны, определяемая выражением:

$$f = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (40)$$

где l – длина струны, ρ – плотность ее материала.

Струнные тензометры применяются как *приставные* (рис. 27,а), так и *закладываемые* в толщу материала конструкций, например в бетон массивных гидротехнических сооружений. В этом случае (рис. 27,б) струна 2 защищается от соприкосновения с бетоном трубками 5, жестко соединенными с дисками 4, втопленными в кладку. При деформации бетона расстояние L между дисками меняется, что сопровождается изменением натяжения струны. Если f_1 и f_2 – последовательно замеренные частоты ее собственных колебаний, то значение деформации ε может быть найдено из выражения

$$\varepsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} = 4 \frac{l^2 \rho}{E} (f_2^2 - f_1^2), \quad (41)$$

где E – модуль упругости материала струны.

Для возбуждения колебаний используется помещенный рядом со струной электромагнит 6, в котором возникшие колебания струны, в свою очередь, индуцируют переменный ток той же частоты f определяемой с помощью регистрирующих устройств, соединенных с тензометром проводами 7. Для исключения влияния температуры и других возможных воздействий, влияющих на получаемые результаты, рядом с группами заложенных в бетон «рабочих» тензометров помещают «компенсационный» прибор, размещаемый таким образом, чтобы деформации бетона на него не действовали. Учитываются также показания заложённых в кладку телетермометров и т.д. Струнные тензометры применяют главным образом для длительных измерений, поскольку существенным их преимуществом по сравнению с тензорезисторами являются то, что на частоту колебаний струны не влияют возможные утечки тока и изменения омического сопротивления в соединительных коммуникациях, с чем приходится серьезно считаться и принимать соответствующие защитные меры при пользовании тензорезисторами.

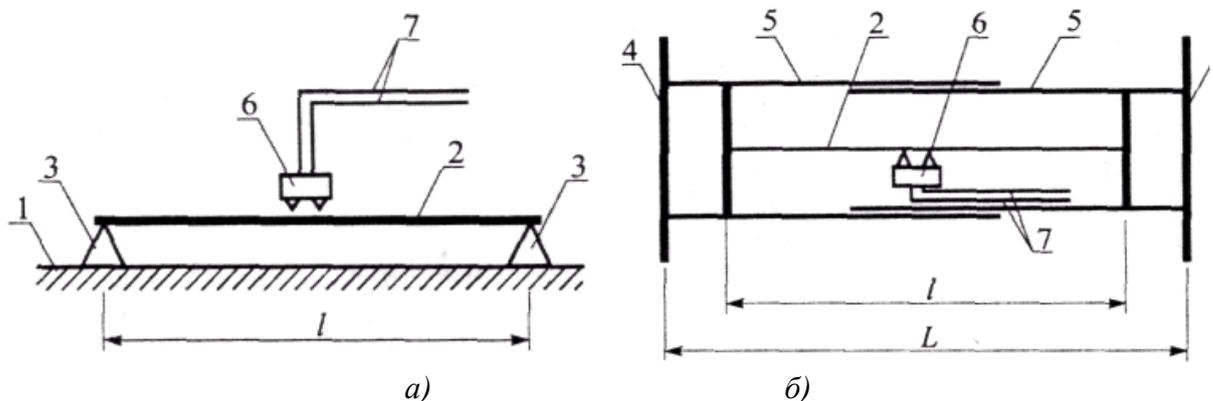


Рис. 27. Струнные тензометры: а – приставной (или «накладной») тензометр; б – закладной тензометр; 1 – испытываемая конструкция; 2 – натянутая стальная струна; 3 – опоры для крепления струны; 4 – жесткие диски; 5 – ограждающие трубки; 6 – электромагнит; 7 – соединительные провода; l – длина струны; L – расстояние между средними сечениями дисков 4

3. Электрические тензометры. В настоящее время для измерения деформаций при испытаниях сооружений, строительных конструкций и деталей наиболее широко используются электрические проволочные (петлевые), фольговые или полупроводниковые тензометры, в основу которых положены тензорезисторы различной конструкции. Тензорезисторы предназначены для *дистанционных* измерений деформаций. Принцип действия тензорезисторов основан на изменении омического сопротивления R проводников при деформации. Основной характеристикой тензорезистора является его *коэффициент тензочувствительности*:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}, \quad (42)$$

т.е. отношение относительного изменения электросопротивления $\Delta R/R$ тензорезистора к вызывающей это изменение деформации $\varepsilon = \Delta l/l$ исследуемого материала, где l – длина базы тензорезистора.

Для изготовления тензорезисторов используются обычно сплавы меди и никеля (константан, элинвар и др.), характеризующиеся высоким коэффициентом тензочувствительности K , постоянством значений K в требуемом диапазоне деформаций, большим удельным омическим сопротивлением $\rho = R/Al$ (где A – поперечное сечения проводника, которое может быть взято достаточно малым) и практически постоянством значений ρ при колебаниях температуры, возможных в условиях пользования тензорезисторами при испытаниях строительных конструкций. Следует отметить, что с помощью тензорезисторов измеряется относительное удлинение ε , а не изменение Δl длины базы (как у механических тензометров). Однако длина базы имеет существенное значение и для тензорезисторов, поскольку при исследованиях материалов с неоднородной структурой для получения усредненных значений деформаций в рассматриваемой зоне длина базы должна в несколько раз превосходить размеры наиболее крупных составляющих материала. Однако при исследовании деформаций в зонах концентрации напряжений длину базы следует брать по возможности наименьшей.

Петлевые проволочные тензорезисторы (рис. 28,а) из тонкой проволоки (диаметром 12...30 мк), приклеенной к бумажной или пленочной подложке, были еще сравнительно недавно основным типом приборов, применявшихся при испытании сооружений. Эти тензорезисторы (с базой 5, 10, 20, 50 и 100 мм) удобны в работе и несложны в изготовлении. Однако им свойственна в большинстве случаев поперечная чувствительность, обусловленная наличием закруглений, соединяющих прямые участки тензорешетки и воспринимающих деформации, направленные перпендикулярно к продольной оси тензорезистора. Наличие поперечной чувствительности тензорезистора снижает его осевую тензочувствительность. От этого недостатка свободны беспетлевые тензорезисторы (рис. 28,б) с низкоомическими медными перемычками.

Из-за отсутствия поперечной тензочувствительности и лучших условий передача деформаций (ввиду продолжения прямолинейных участков тензорешетки и за перемычки) база их может быть уменьшена до 2...3 мм. В настоящее время все большее распространение получают фольговые тензорезисторы (рис. 28,в) из металлической фольги толщиной не более 4...6 мк. Этими тензорезисторами при изготовлении фотолитографским способом могут быть приданы любые очертания, требуемые условиями эксперимента. Вследствие низкой поперечной чувствительности и плоского сечения элементов тензорешетки, они имеют при той же площади сечения более развитую поверхность приклейки, что улучшает условия их работы.

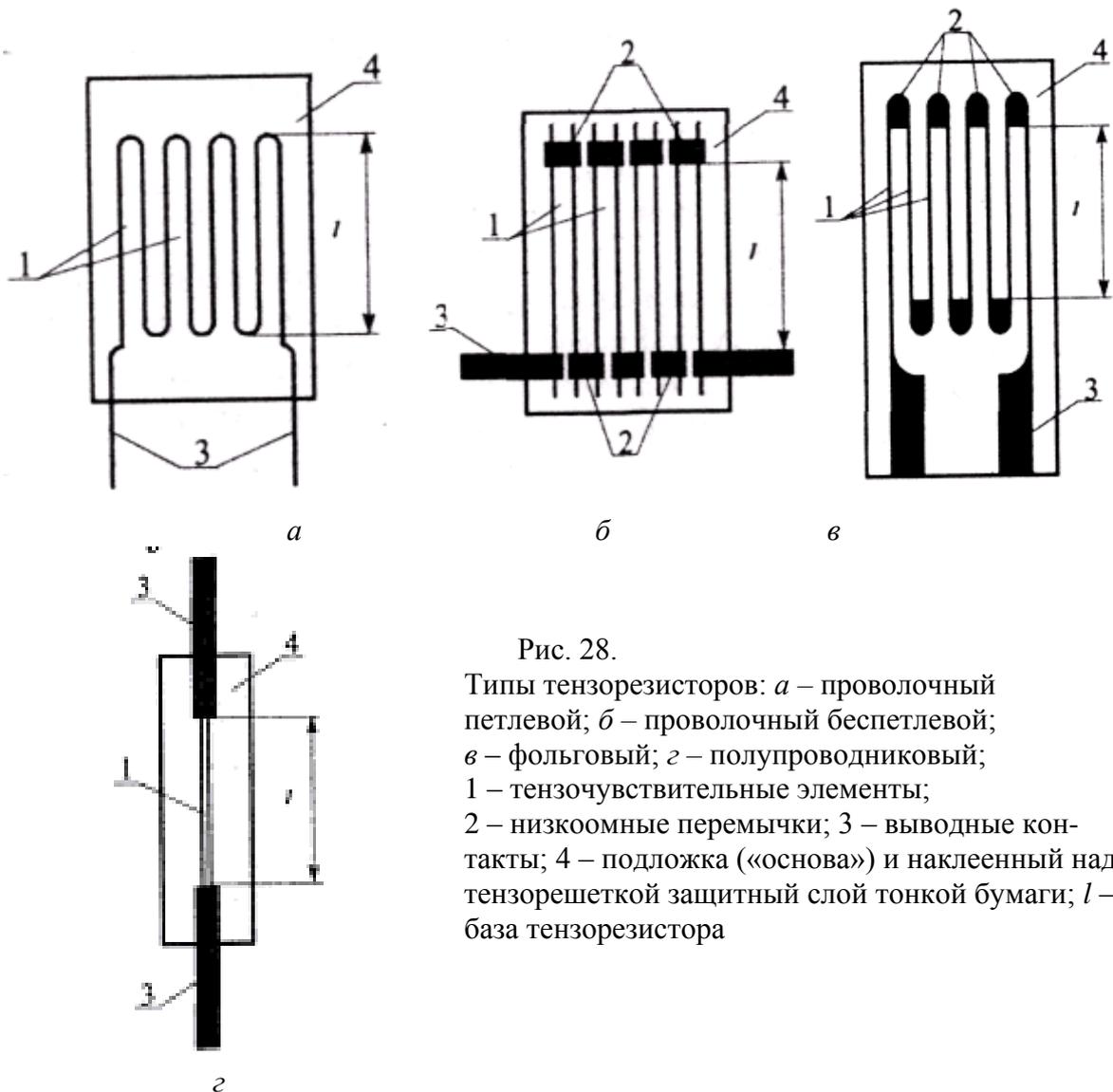


Рис. 28.
 Типы тензорезисторов: *а* – проволочный петлевой; *б* – проволочный беспетлевой; *в* – фольговый; *г* – полупроводниковый; 1 – тензочувствительные элементы; 2 – низкоомные перемычки; 3 – выводные контакты; 4 – подложка («основа») и наклеенный над тензорешеткой защитный слой тонкой бумаги; *l* – база тензорезистора

Полупроводниковые тензорезисторы (рис. 28,г) по сравнению с рассмотренными выше типами обладают значительно большей тензочувствительностью, меняющейся, однако, при деформации и при изменениях температуры. Несмотря на это, они эффективно применяются в упругих элементах различных измерительных приборов (например, динамометров), где большое значение имеет их высокая чувствительность, а отмеченные недостатки могут быть компенсированы. Тензорезисторы, применяемые при испытаниях сооружений, должны давать возможность измерения деформаций в диапазоне до 10^{-5} : при исследовании упругой стадии работы материала – до $5...7 \times 10^{-3}$ и упругопластической до 10^{-1} и более. Необходимым условием является также стабильность показаний тензорезисторов, их влагостойкость т.п.

Влияние температурных погрешностей, обусловленных температурным коэффициентом изменения сопротивления тензонитей β и разностью температурного коэффициента расширения материала тензорезистора α_r и исследуемого материала α_m , исключают установкой компенсационных тензорезисторов. В случаях, когда установка компенсационных тензорезисторов невозможна или они не могут быть помещены в те же температурные условия, используют так называемые самокомпенсированные тензорезисторы, материал которых должен удовлетворять условию $\beta = (\alpha_m - \alpha_r)K$, где K – коэффициент тензочувствительности тензорезистора.

Повышенные требования предъявляются к глубинным тензорезисторам разной

конструкции, закладываемым в толщу схватывающегося материала (например, бетона), когда должна быть обеспечена их безотказная работа в течение длительного времени. Изменения сопротивления тензорезисторов в процессе испытаний весьма малы (тысячные доли ома). Для измерения столь малых колебаний сопротивления применяют в большинстве случаев *мостовые измерительные схемы* (рис. 29).

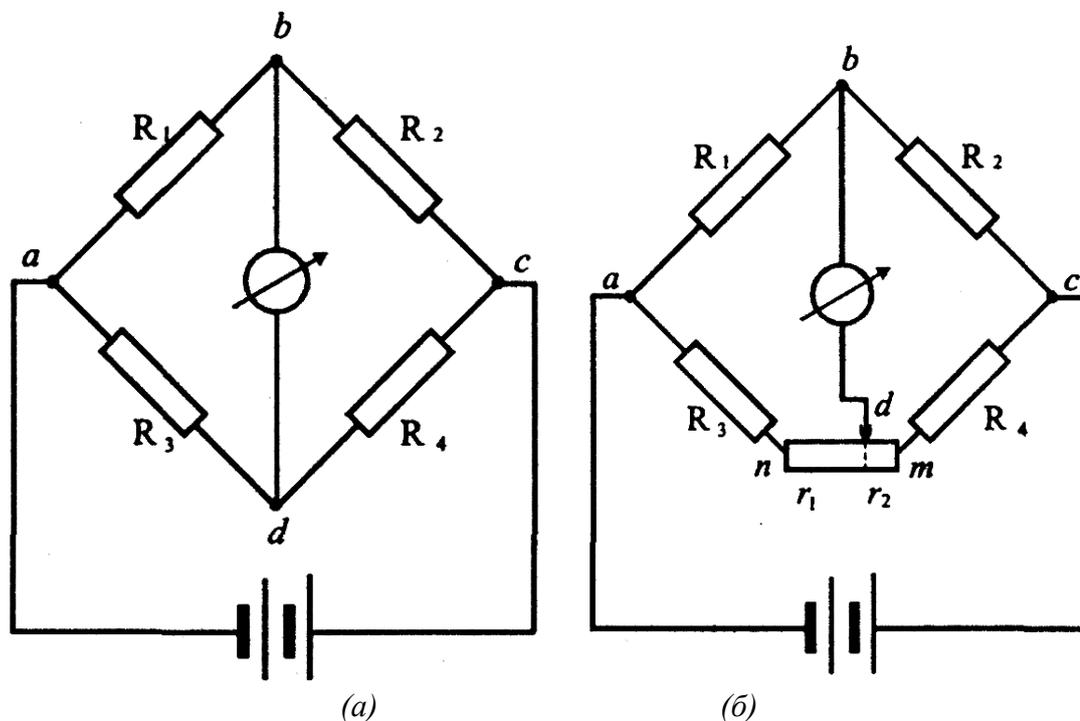


Рис. 29. Измерительные мосты: *a* – схема моста Уитстона; *б* – мост с реохордом; R_1, R_2, R_3, R_4 – сопротивления, включенные в плечи моста; r_1 и r_2 – сопротивление реохорда

Во *внешние* плечи моста включены «рабочий» тензорезистор с сопротивлением R_1 , воспринимающий наблюдаемые деформации, и «компенсационный» тензорезистор с сопротивлением $R_2 = R_1$, помещаемый в одинаковых с ним температурных условиях в непосредственной близости от рабочего, но не подверженный воздействию измеряемых деформаций. Во *внутренние* плечи включены тензорезисторы с сопротивлениями R_3 и R_4 , помещаемые в регистрирующем приборе и связанные с рабочим и компенсационным тензорезисторами электропроводами. Как известно, мост будет сбалансирован (т.е. ток в его измерительной диагонали bd будет равен нулю) при условии:

$$R_1 R_4 = R_2 R_3. \quad (43)$$

Возможны два метода измерений:

1) метод *отклонений* (называемый также «методом непосредственных отсчетов»), когда изменение сопротивления ΔR_1 рабочего тензорезистора определяется по силе тока, возникающего в измерительной диагонали ранее сбалансированного моста,

2) *нулевой* метод (более совершенный), при котором относительные изменения сопротивления $\Delta R_1/R_1$ определяют балансировкой моста с помощью включенного в цепь (рис. 29,б) реохорда nm изменением отношения сопротивлений r_1/r_2 . Этот метод является основным при статических испытаниях.

В настоящее время разработано большое количество различных систем коммутаторов, которые позволяют последовательно присоединять к отсчетному устройству большое количество (до нескольких сот) тензорезисторов. При использовании автоматически действующей аппаратуры на регистрацию показаний каждого

тензорезистора требуется всего несколько секунд. Поэтому возможен непосредственный ввод данных в ЭВМ для их обработки. Все это, а также дешевизна, крайне малый вес, малые габариты тензорезисторов и возможность крепления (приклейки) в любых точках исследуемой конструкции, обуславливают широкое их применение на практике.

4. Сдвигомеры. Приборы, измеряющие деформации сдвига, называются сдвигомерами. Широкое распространение из этой группы приборов получил тензомер – сдвигомер Аистова (ТСА). Он может быть использован как тензомер или сдвигомер. При этом кинематическая схема указанного сдвигомера практически полностью аналогична представленному выше электромеханическому тензомеру на рис. 26, с той лишь разницей, что у тензомера–сдвигомера Аистова имеется еще дополнительно оснастка (рис. 30) для установки прибора на строительную конструкцию, состоящую из нескольких элементов, между которыми в процессе испытания возможны сдвиговые деформации.

5. Геодезические методы измерения перемещений. Классические геодезические методы. Под геодезическими методами понимают обычно совокупность приемов для измерения перемещений в исследуемых конструкциях с помощью геодезических приборов – теодолитов и нивелиров. *Измерение вертикальных перемещений* отдельных элементов сооружений производится на основе нивелирования – либо технического, либо высокоточного. Нивелирование во время испытания может производиться по маркам и реперам, установленным для длительных наблюдений за деформационным поведением обследуемых сооружений. При использовании нивелиров с приспособлением для оптического смещения линии визирования возможна оценка определенных перемещений сооружения с точностью до 0,01мм.

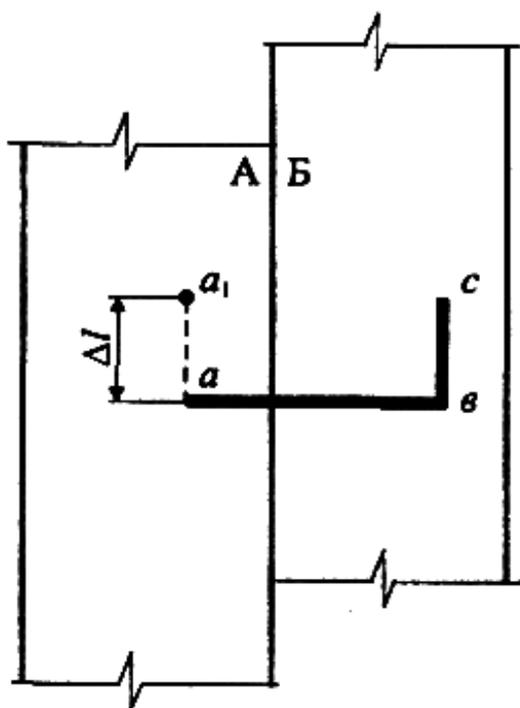


Рис. 30.
Дополнительная оснастка и схема установки тензомера – сдвигомера на строительную конструкцию

Измерение горизонтальных перемещений сооружений или отдельных элементов несущих и ограждающих конструкций производят на практике с использованием теодолитов. На практике теодолит центрируют под неподвижной точкой, выбранной на расстоянии 25...40м от сооружения в зависимости от его высоты. При этом на необходимых точках сооружения прикрепляют временные марки; при определении горизонтальных перемещений наиболее часто используются 2 способа.

1. *Способ измерения углов* при повторных наведениях теодолита на наблюдаемые марки. При этом, зная расстояние от теодолита до наблюдаемой марки и абсолютную величину приращения измеряемых горизонтальных углов, находят расчетным путем

линейные горизонтальные перемещения наблюдаемых точек.

2. Способ так называемого "бокового" нивелирования, в котором при каждом отсчете рабочую трубу теодолита сначала наводят на наблюдаемую марку, а затем поворотом в вертикальной плоскости на 180° – на горизонтальную рейку с миллиметровой шкалой, закрепленной так, чтобы она заведомо всегда оставалась неподвижной во время испытаний. Разность последовательных отчетов, взятых по рейке, и дает искомое перемещение наблюдаемых точек в горизонтальном направлении. Однако на практике имеют место случаи отсутствия прямой видимости для наблюдаемых точек, что не позволяет широко использовать геодезические методы для глобальной оценки деформационного поведения обследуемого сооружения.

Гидростатическое нивелирование. Гидростатическое нивелирование нашло широкое применение в геодезии и машиностроении при построении различных профилей местности и установке в проектное положение оборудования различных технологических линий. Этот способ основан на определении взаимного превышения проверяемых точек на уровне стояния жидкости в сообщающихся сосудах. Схема установки показана на рис. 31.

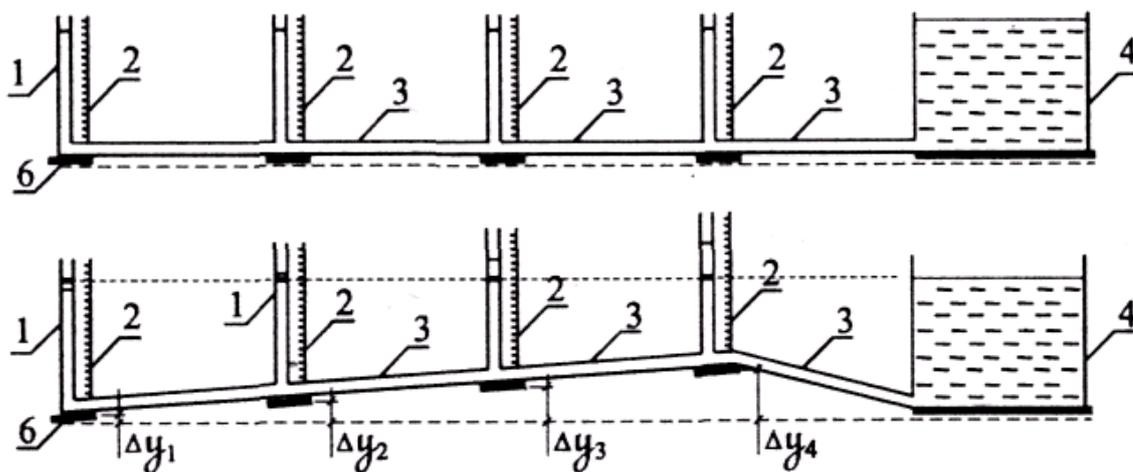


Рис. 31. Схема измерения вертикальных перемещений сооружений с помощью системы гидростатического нивелирования: 1 – стеклянная трубка; 4 – уравнивательный бак; 2 – рабочая шкала; $\Delta y_1, \Delta y_2, \dots, \Delta y_n$ – измеряемые перемещения; 3 – гибкие шланги; 6 – базовая (нулевая) линия измерения

Чувствительность метода может быть значительно повышена установкой в трубках с внутренним диаметром 5 см специальных микрометрических головок, оканчивающихся специальным коническим острием. При этом уровень жидкости в рассматриваемом случае определяется путем световой, либо звуковой сигнализации в момент касания острия головки поверхности жидкости. Рабочие отчеты берутся по шкале головки с точностью 0,01мм.

Отвесы. Отвесы применяют для определения взаимных горизонтальных смещений точек сооружения, расположенных на одной вертикали. На практике различают два типа отвесов: прямой и обратный. Конструктивная схема прямого отвеса показана на рис. 32,а обратного отвеса – на рис. 33.

Прямой отвес используют наиболее часто для определения горизонтальных смещений наземных частей зданий и сооружений, возникающих при неравномерных деформациях грунтовых оснований, а также от крановых горизонтальных нагрузок либо от копровых установок.

Обратный отвес используют для выноса на внешнюю поверхность через вертикальную шахту положения рабочей марки заложенной, например, в основании

бетонной плотины.

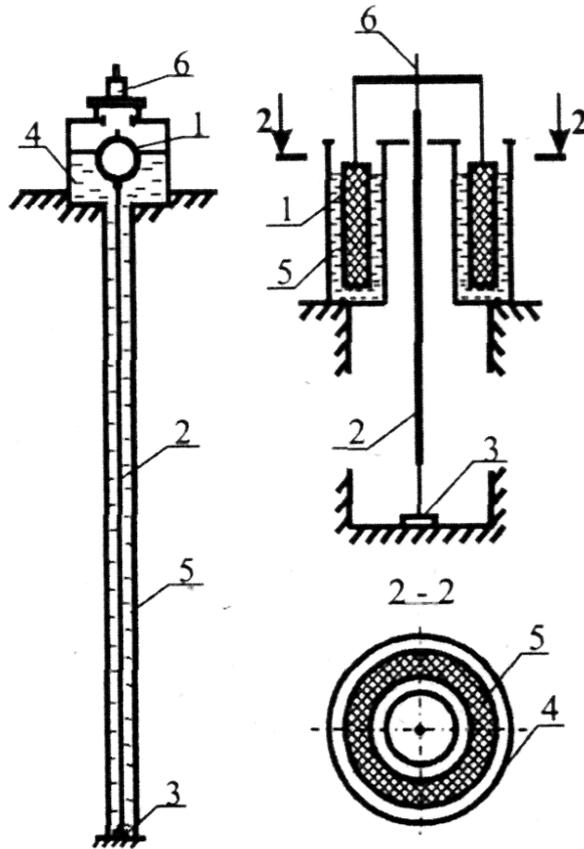


Рис. 32. Конструктивная схема прямого отвеса:

- 1 – исследуемое сооружение;
- 2 – марка с горизонтальной шкалой;
- 3 – отвес в сосуде с маслом; 4 – кронштейн для отвеса;
- 5 – линейная шкала;
- 6 – микроскоп; 7 – струна

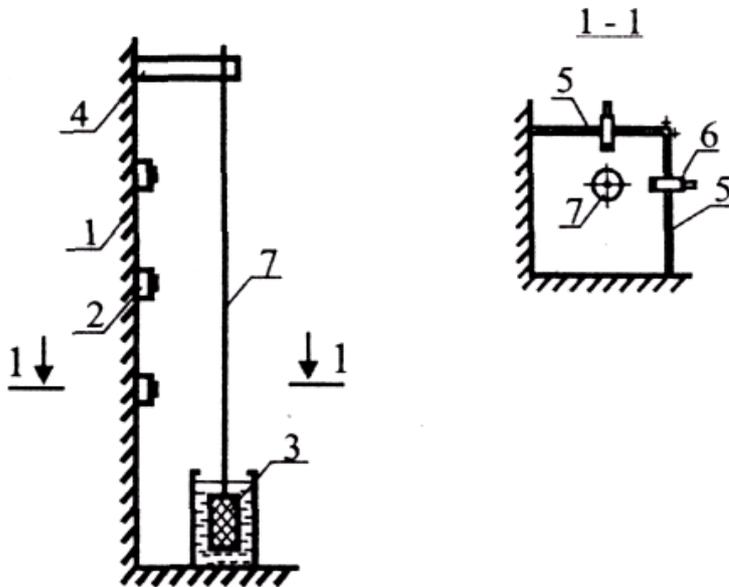


Рис. 33. Конструктивная схема обратного отвеса:

- а – схема, требующая полной герметизации и большого объема масла;
- б – совершенствованная схема; 1 – поплавок;
- 2 – струна; 3 – марка;
- 4 – корпус; 5 – рабочая жидкость; 6 – отсчетное устройство

Метод натянутой нити. Для точек, расположенных по прямой (в горизонтальном "створе"), перемещения, перпендикулярные перемещению створа, могут измеряться с помощью натянутой проволоки. Это целесообразно при отсутствии прямой видимости или при большой длине створа, т.е. в случаях, требующих переноса оптических геодезических инструментов на промежуточные марки, что на практике снижает точность получаемых результатов. На рис. 34 показана конструктивная схема метода натянутой нити. Горизонтальные перемещения, перпендикулярные направлению створа, возникающие в сооружении, определяются с точностью до 0,1мм соответственно

по изменению положения поплавков относительно корпуса их ванночек. Отчеты на практике берутся по линейкам с нониусами. Рассматриваемый метод разработан для наблюдений перемещений в гидротехнических сооружениях. В ходе обследования плотин при длине створов до 600 м разброс показаний при повторных отсчетах не превышает $\pm 0,2\text{мм}$.

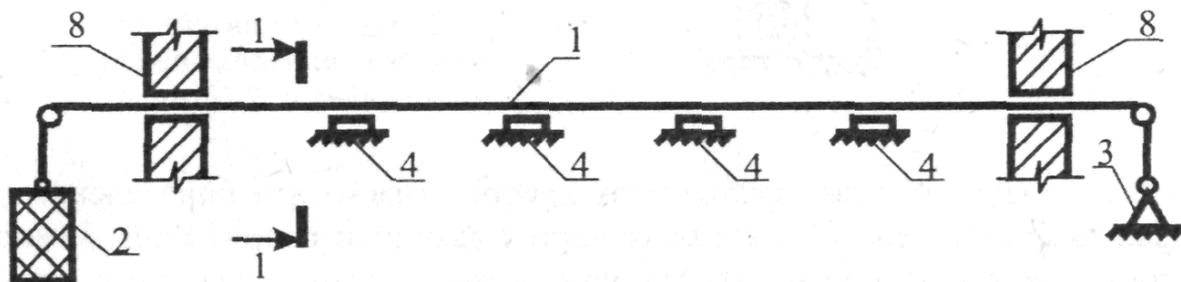


Рис. 34.

Конструктивная схема метода натянутой нити для определения горизонтальных смещений обследуемых строительных объектов: а – общая схема; б – схема плавающих опор; 1 – стальная проволока; 2 – натягивающий груз; 3 – неподвижная опора; 4 – плавающая опора; 5 – ванночки; 6 – поплавок; 7 – вилка фиксатора проволоки; 8 – ограждающие конструкции объекта

6. Тарирование измерительной аппаратуры и приборов

Для определения основных характеристик измерительных устройств проводят их тарировочные испытания. При проведении таких испытаний используют градуировочные установки, обеспечивающие воспроизведение заданных действительных значений измеряемой величины. Для каждой из определяемых характеристик разрабатывают схему градуировки, которая включает оценку коэффициентов влияния различных факторов: температуры, влажности, магнитных полей и др. На основе полученных данных определяется схема анализа погрешностей.

Градуировка силоизмерительных устройств обычно осуществляется с использованием испытательной машины или гидравлического пресса; для контроля усилия последовательно с проверяемым преобразователем устанавливают образцовый динамометр. Класс точности (относительная погрешность градуировки, отнесенная к максимальному значению на шкале и выраженная в процентах) образцовой меры должен не менее чем в 3 раза превышать класс аттестуемого силоизмерителя. Статическую градуировку датчиков давления производят с помощью грузопоршневых устройств или гидравлических установок с образцовыми манометрами. Универсальные измерители перемещений и тензометры градуируют на механических или оптико-механических компараторах с ценой деления шкалы $1 \dots 5 \text{ мкм}$.

В процессе выполнения градуировки преобразователи нагружают и разгружают ступенями, составляющими 0,1 от верхнего предела диапазона; полный цикл повторяют не менее шести раз. По полученным результатам вычисляют средние значения сигналов преобразователя на каждой ступени и по этим данным строят статическую градуировочную характеристику, а также определяют чувствительность, относительную нелинейность, механический гистерезис.

Датчики *нормальных напряжений*, предназначенные для установки внутри дисперсных сред, сначала градуируют в гидростатической камере по той же методике, что и обычные датчики давления. По результатам гидростатических испытаний определяют чувствительность, нелинейность характеристики и механический гистерезис; устанавливают основную погрешность и класс точности. Однако, в отличие от обычных датчиков давления, необходимо дополнительно определить влияние на статическую характеристику условий взаимодействия преобразователя со средой. Так, для проведения испытаний фунтов применяют различные вспомогательные устройства (одометры), воспроизводящие на границах пробы грунта или сыпучей среды со стандартными механическими свойствами заданные значения компонентов напряженного состояния.

При градуировке *виброметров* перемещения и ускорения для возбуждения заданных гармонических колебаний применяют градуировочные и испытательные вибростенды. Наибольшее распространение получили эксцентриковые и электродинамические вибростенды. В *эксцентриковых* стендах возвратно-поступательное движение рабочей платформы создается кривошипно-шатунным механизмом, приводимым в движение электродвигателем, с диапазоном частот от 0,2...5 до 80...100 Гц. В *электродинамических* стендах используется мощный магнитоэлектрический преобразователь, питаемый от специального блока управления и допускающий плавную регулировку частоты и амплитуды колебаний виброплатформы. Для воспроизведения гармонических колебаний с частотой менее 1 Гц и амплитудой до 500 мм применяются астатические маятники с плоскими вертикальными пружинами, физические маятники большой длины и другие приспособления.

При *определении амплитудно-частотной характеристики* виброметр или акселерометр закрепляют на виброплатформе стенда соосно с направлением генерируемых колебаний. К вибропреобразователю присоединяют соответствующие элементы измерительного канала (усилитель, регистрирующий прибор), после чего небольшими ступенями изменяют частоту колебаний виброплатформы. Обычно вибростенды оснащены преобразователем индукционного типа и электроннолучевым осциллографом. В качестве *поверочного средства* может быть использован образцовый вибропреобразователь, установленный рядом с калибруемым. При другом способе контроля измеряются частота и размах колебаний. Для определения частоты на лету с виброграммой, полученной с помощью калибруемой аппаратуры, параллельно записывается сигнал заданной частоты. Наиболее точным методом измерения амплитуды (или размаха) колебаний виброплатформы является оптический.

Используют *измерительные микроскопы* с окулярным микрометром. Микроскоп фокусируют на торцевую поверхность виброплатформы и измеряют длину размытого изображения (двойную амплитуду) какой-либо характерной точки (например, отпечатка, оставленного алмазной пирамидкой). При высоких частотах 5...10 кГц и очень малых амплитудах 1...2 мкм применяют интерферометрический метод измерения перемещений.

В отличие от тензометров, тензорезисторы не могут быть установлены повторно и, следовательно, не могут быть индивидуально проградуированы. Поэтому характеристики определяются для некоторой выборки тензорезисторов, составляющей 5...7% оцениваемой партии. Полученные результаты обрабатываются статистическими методами. Установленные для испытанной выборки средние значения характеристик тензорезисторов и средние квадратические отклонения от этих значений, а также аппроксимированные функции влияния температуры, влажности и других факторов присваивают всей партии тензорезисторов.

В качестве эталонного упругого элемента, обеспечивающего деформирование тензорезисторов, рекомендуется использовать балку равного сопротивления (рис. 35) или постоянного сечения, нагруженную в пределах рабочего участка моментом (рис. 36). Деформацию рабочей зоны балки принимают за действительную величину. Тензорезисторы устанавливают вдоль оси балки на растянутую или сжатую поверхность;

при нагружении балки измеряют стрелу выгиба балки и вычисляют относительную фибровую деформацию поверхностных волокон балки соответственно для консольной балки равного сопротивления по формуле:

$$\varepsilon = f \frac{3 S}{2 l^2}, \quad (47)$$

где f – максимальный прогиб балки консольного типа в месте приложения нагрузки; S – толщина балки, м;

l – длина балки, см; для балки постоянного сечения (рис. 36) – с использованием формулы:

$$\varepsilon = f \frac{4S}{l_0^2}, \quad (48)$$

где f – выгиб балки в пределах пролета балки, равного l_0 , S – толщина балки, см.

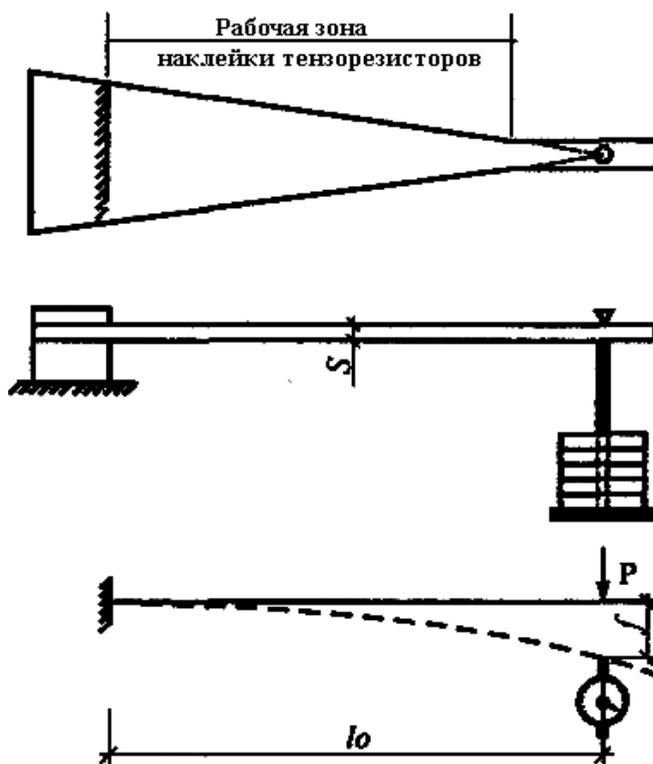


Рис. 35.
Схема тарировочного устройства с балкой равного сопротивления

На градуировочном устройстве определяют статическую характеристику преобразования, механический гистерезис, ползучесть, функцию влияния температуры на чувствительность тензорезисторов. Усталостная характеристика тензорезистора может быть определена с использованием установки, схема которой показана на рис. 37.

Перемещение свободного конца консольной градуировочной балки с тензорезисторами осуществляется качающейся кулисой, которая приводится в движение кривошипным механизмом. Амплитуду колебаний балки и, следовательно, деформацию ее поверхности регулируют изменением плеча кривошипного механизма. При смещении по вертикали опоры можно варьировать и коэффициент асимметрии цикла. Число циклов деформирования регистрируется счетчиком. При определении усталостной характеристики циклическое деформирование производят при нескольких уровнях амплитуды и фиксируют число циклов, при котором происходит отказ тензорезисторов.

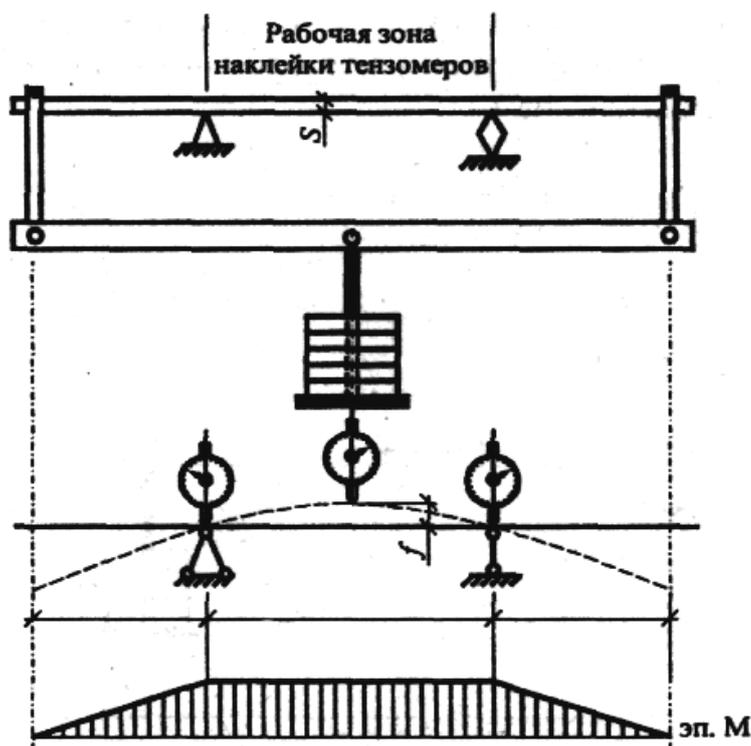


Рис. 36.
Схема тарировочного устройства с балкой равного сечения

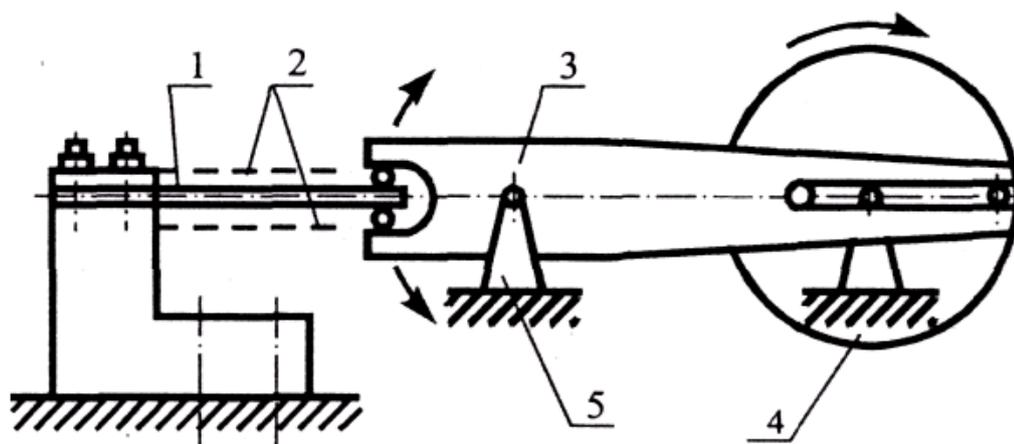


Рис. 37. Устройства для градуировки тензорезисторов при циклической нагрузке: 1 – градуировочная балка; 2 – тензорезисторы; 3 – кулиса; 4 – кривошипный механизм; 5 – опора

Поскольку в процессе циклического деформирования накапливаются усталостные повреждения в материале чувствительного элемента, а также происходит расстройство адгезионных связей в связующем слое, то постепенно начинает проявляться эффект ухода нуля, т. е. изменение сопротивления тензорезисторов при нулевой или постоянной средней деформации. Признаком отказа тензорезистора в этом случае является не обрыв чувствительного элемента, а достижение заданного уровня относительного смещения нуля, например, 0,005...0,01%.

Информационно-измерительные системы. В настоящее время в измерительной технике получили распространение многофункциональные многоканальные автоматизированные устройства, названные информационно-измерительными системами (ИИС), предназначенные для автоматического сбора, обработки и выдачи по заданной программе информации, поступающей от многих источников. При проектировании ИИС пользуются принципом агрегатно-модульного построения системы, состоящей из

ограниченного набора унифицированных блоков и модулей, выпускаемых промышленностью и входящих в государственную систему приборов (ГСП). Такое построение обеспечивает метрологическую, информационную, конструктивную и эксплуатационную совместимость отдельных модулей и блоков для получения информации и ее преобразования, хранения и выдачи в требуемом виде на печать. На рис. 38 приведена структурная схема универсальной информационно-измерительной системы. Входящие в эту систему электрические средства

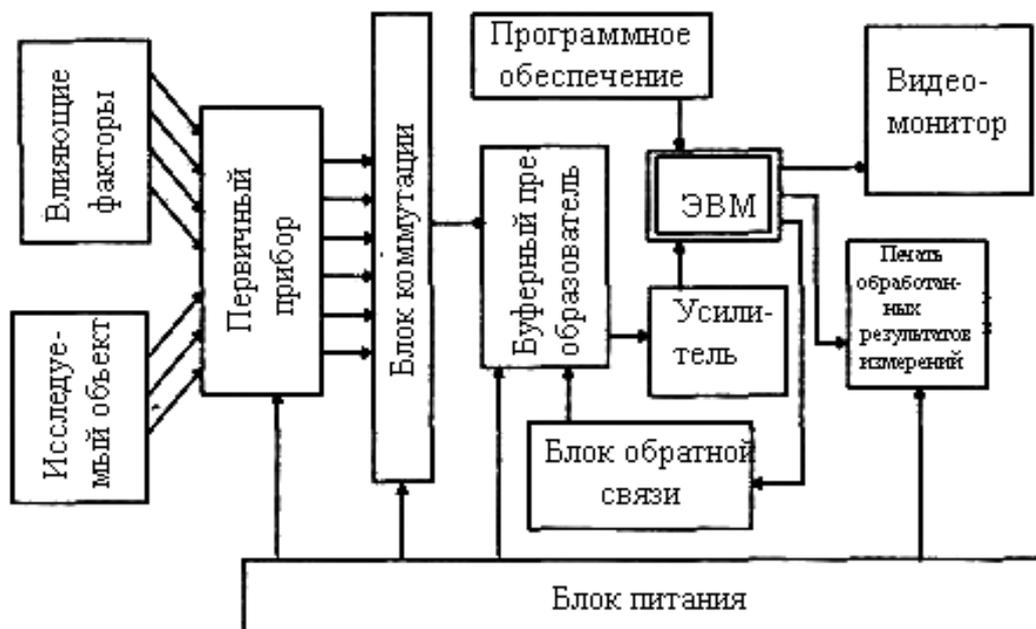


Рис. 38. Структурная схема универсальной информационно-измерительной системы

измерений обеспечивают весь комплекс преобразования информации, начиная от восприятия измеряемой величины и кончая ее автоматической обработкой и регистрацией. Первичные преобразователи представляют собой линейную механическую систему, способную воспринимать значения измеряемой величины (перемещения, ускорения, усилия и др.) и преобразовывать их в относительные перемещения или деформации собственных упругих элементов.

Измерение различных параметров и откликов при испытании строительных конструкций производится на практике с помощью электрических преобразователей или датчиков с электрическими преобразователями, отличающимися исключительной универсальностью.

С помощью электрических датчиков измеряют деформации, перемещения, усилия, ускорения. Они могут применяться как в лабораторных условиях, так и в условиях натурального эксперимента, как при статическом, так и при динамическом воздействии. При этом выходной сигнал электрических преобразователей удобен для последующего преобразования (усиления, интегрирования) и дистанционной передачи и регистрации.