

**А. А. АШРАБОВ, Ч.С.РАУПОВ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

**ГАЖК «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»  
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО  
ТРАНСПОРТА**

**А. А. АШРАБОВ, Ч.С.РАУПОВ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПРОВЕДЕНИЯ  
ИНЖЕНЕРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**

**Часть II**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ  
для магистров специальностей  
5А580212 –Мосты и транспортные тоннели,  
5А580603–Эксплуатация мостов и транспортных тоннелей,  
5А580204–Проектирование и строительство зданий и сооружений**

**Ташкент – 2007**

УДК 69.058(075.8)

В учебном пособии приведены цели и задачи испытаний конструкций динамической нагрузкой, дана методика испытания мостов статической и динамической нагрузками, изложены современные методы выявления скрытых дефектов и повреждений, а также методы определения динамических характеристик конструкций или отдельных ее элементов. В книге подробно освещены современные практические методы разрушающих, неразрушающих и оптических испытаний строительных конструкций, материалов и грунтов оснований 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 – 58; библиографии – 11 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.

### III. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СООРУЖЕНИЙ

#### 1. Цели и задачи испытаний конструкций динамической нагрузкой

В соответствии с объектом, задачами и методикой эксперимента, можно выделить три группы испытаний динамической нагрузкой: испытание конструкций существующего сооружения; испытание строительных деталей серийного изготовления; научно-исследовательские испытания динамической нагрузкой.

При испытаниях конструкций обследуемых сооружений динамической нагрузкой исследования проводятся по двум направлениям: определяют реакцию конструкции на заданные воздействия с целью установления ее напряженно-деформированного состояния при динамических воздействиях; оценивают состояние конструкции и ее действительную схему работы, используя при этом динамические испытания в режиме собственных или вынужденных колебаний. Для строительных деталей серийного изготовления с помощью динамических испытаний проводится неразрушающий контроль качества готовой продукции.

Вопросы научного эксперимента при создании динамических нагрузок довольно разнообразны. Однако все они в той или иной степени сводятся к решению четырех главных задач:

- 1) исследование влияния динамической нагрузки на прочностные и деформативные характеристики строительных материалов;
- 2) экспериментальная проверка новой методики расчета конструкции на динамические воздействия;
- 3) исследование статистических параметров динамических воздействий;
- 4) совершенствование методики динамических испытаний.

**Испытания натуральных сооружений динамической эксплуатационной нагрузкой.** При обследовании эксплуатируемых сооружений, на конструкции которых действует динамическая нагрузка, экспериментальные исследования, как правило, проводятся в условиях действия эксплуатационной нагрузки. Задача исследования предельно конкретна – зарегистрировать параметры, характеризующие работу конструкций под нагрузкой и сравнить их с допускаемыми. Сравнение экспериментальных значений динамических деформаций и перемещений с нормируемыми дает возможность проверить условия эксплуатации. В отличие от требований, предъявляемых к конструкциям, воспринимающим только статическую нагрузку, при исследовании динамики сооружения необходимо не только оценить его работу по предельным состояниям, но и проверить соблюдение условий, специфических для эксплуатации конструкций, подверженных колебаниям.

Как известно, колебания оказывают на человека отрицательное воздействие и могут вызвать тяжелые физиологические расстройства. Нормативные документы устанавливают предельно допустимые значения параметров динамических колебаний (вибраций) вредных для человека. Основными критериями оценки вибраций являются их амплитуды и частоты. При установлении предельных величин динамических колебаний нормами учитывается также продолжительность их воздействия. Жесткие требования по допустимому уровню вибрации предъявляются к промышленным и гражданским зданиям, в которых используются оборудование и приборы, чувствительные к вибрациям. К ним относятся здания медицинских учреждений, промышленные сооружения оптико-механической и электронной отраслей и т. д. В этих зданиях необходимо проведение специальных мероприятий по уменьшению вибрации, которые могут быть успешно осуществлены только при наличии информации, полученной в ходе обследования с регистрацией параметров вибраций при динамических испытаниях эксплуатационной нагрузкой. Типичные, наиболее часто

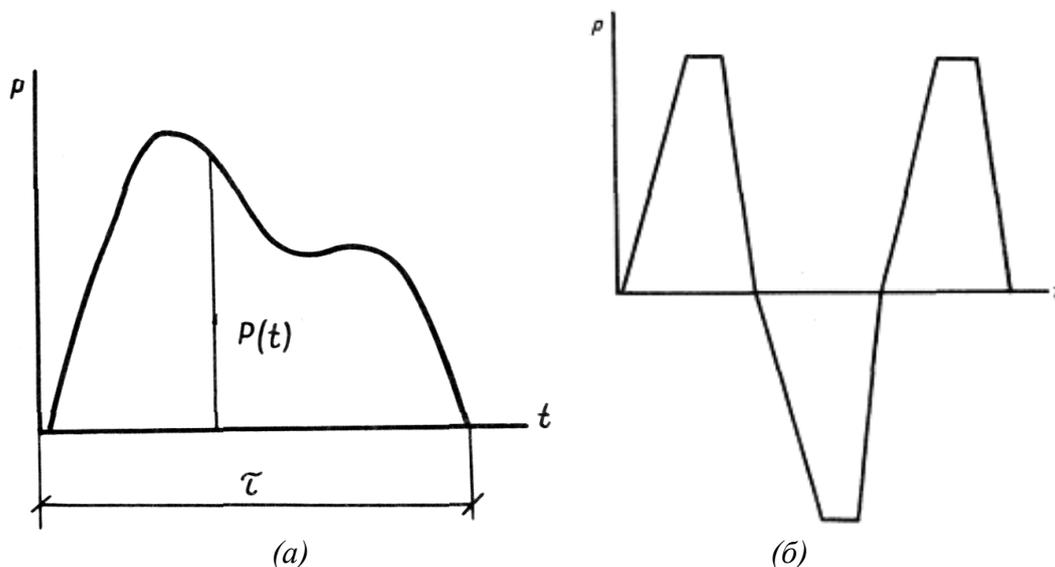
встречающиеся виды динамических воздействий, с которыми приходится сталкиваться при проведении обследований сооружений и при которых проводятся динамические испытания эксплуатационной нагрузкой:

- вибрационная нагрузка, создаваемая работой механизмов с неуравновешенной массой, например, от компрессоров, станков, грохотов, вибростолов и т. д;
- динамическая составляющая ветровой нагрузки, которая вводится в расчет высотных сооружений и многоэтажных зданий (мачты, дымовые трубы, многоэтажные здания высотой более 40 м и др.);
- ударная нагрузка от действия копров, молотов и т. д.;
- подвижная нагрузка от транспорта, мостовых кранов и т. д.

Классификация динамических нагрузок очень разнообразна. Динамические нагрузки могут быть детерминированными (неслучайными) и случайными. Детерминированные нагрузки могут быть полностью описаны законом их изменения во времени. Такие нагрузки возникают при работе механизмов с неуравновешенными массами электродвигателей и генераторов, вентиляторов и молотов, кривошипно-шатунных механизмов и пр. Для случайных нагрузок до проведения испытаний нельзя предсказать их конкретный характер, хотя при наборе представительной статистической информации можно выявить их определенные вероятностные характеристики. При рассмотрении стационарных случайных нагрузок, которыми в частности являются ветровые нагрузки на высотные сооружения, волновые нагрузки на морские основания для освоения континентального шельфа, необходимо знать либо функцию спектральной плотности  $S(\omega)$ , либо корреляционную функцию  $K(\tau)$ , которые связаны между собой прямым и обратным преобразованием Фурье

$$K(\tau) = \int_0^{\infty} S(\omega) \cos \omega \tau d\omega; \quad S(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} K(\tau) \cos \omega \tau d\tau.$$

Динамическая нагрузка может быть неподвижной и подвижной. К неподвижной – относятся воздействия на сооружения стационарно установленного оборудования, подвижной – воздействия на строительные конструкции кранов, электрокаров, подвижного состава, а также перемещение людей. По характеру изменения нагрузок во времени различают непериодические (рис. 1,а), импульсные (рис. 1,б), периодические (рис.1,в), гармонические (рис. 1,г). Особый характер носит ударная нагрузка.



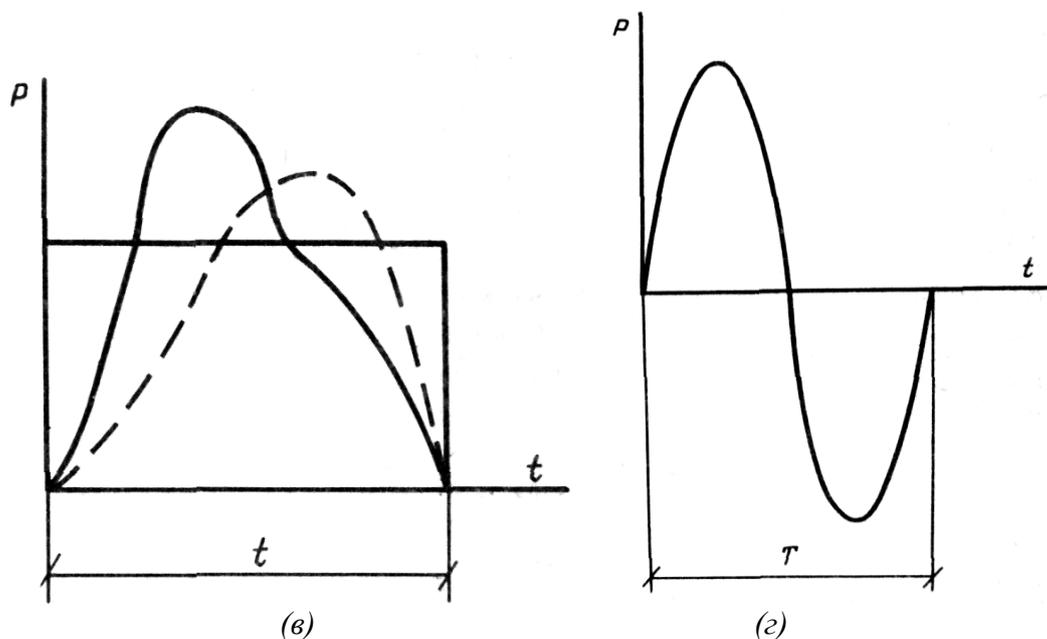


Рис. 1. Характерные типы динамических нагрузок

Примерами непериодической нагрузки может являться воздействие на строительные конструкции взрывных нагрузок, обусловленных взрывом ВВ, горением газовой смеси и т. д. В отдельных случаях такие нагрузки могут действовать относительно короткий промежуток времени. В этом случае становится несущественным характер распределения нагрузки во времени. Если время действия нагрузки  $\tau$  подчинено неравенству  $\tau < 0,1T$ , где  $T$  – наибольший период собственных колебаний конструкции, то эффект оценивается значением величины действующего импульса  $J$ , которая определяется выражением

$$J = \int_0^{\tau} P(t)dt.$$

Под ударной нагрузкой понимается воздействие на строительную конструкцию другой массы, когда необходимо учитывать взаимодействие двух, а иногда и более, соударяемых тел. В этом случае иногда возникает необходимость изучения местных явлений, протекающих вблизи точек соприкосновения, а также закономерностей распространения волновых колебаний.

Динамическим испытаниям эксплуатационной нагрузкой предшествуют все операции первого этапа обследования и все подготовительные работы, связанные с проведением самих испытаний, за исключением работ по созданию испытательной нагрузки. Для того чтобы заключение по результатам испытания не носило формальный характер, требуется не только провести сравнение измеренных параметров с предельными, но и представить данные по оценке конструктивных динамических свойств сооружения. Для этого проводят пробные испытания ударной нагрузкой с регистрацией и последующей обработкой записи собственных колебаний конструкции. Это дает возможность уточнить расчетную схему конструкции, определить ее динамические упругие и неупругие характеристики, установить место наибольших динамических перемещений. Пробные испытания в режиме собственных колебаний могут быть проведены с использованием простейших приборов для записи колебаний.

В динамических испытаниях эксплуатационной нагрузкой используются более

сложные приборы для получения и обработки информации. Планируя эксперимент, следует стремиться к минимальному числу используемых приборов и располагать их в наиболее ответственных сечениях. Для получения синхронной записи изменения динамических параметров во времени необходимо согласование работы измерительно-регистрационной аппаратуры.

В большинстве случаев оценка параметров вибраций проводится на основании сравнения их с предельно допустимыми из условий обеспечения нормальной жизнедеятельности людей и работы технологического оборудования, т. е. рассматриваются колебания низкого уровня, которые не оказывают влияния на несущую способность и трещиностойкость конструкций. В том случае, когда динамические перемещения и деформации велики, когда при обследовании обнаружены повреждения несущих элементов и в то же время отсутствуют ограничения на вибрации, связанные с обеспечением технологического режима, задачи обследования значительно усложняются, потому что прочностные свойства конструкции определяются явлениями усталостного характера. Постепенное накопление повреждений, вызванное периодически повторяющимися нагрузками для различных материалов, проявляется по-разному: развитие одиночных усталостных трещин в металлических конструкциях (сосуды давления, мачты, опоры ЛЭП и т. д.); микро- и макротрещинообразование в железобетонных и каменных конструкциях (несущие конструкции открытых крановых эстакад, мосты, фундаменты копров, здания в сейсмических районах и т. д.). Оценка прочностных показателей конструкций возможна в этих случаях методами теории надежности с привлечением аппарата механики разрушения. Для этого проводится дополнительное обследование с целью определения вероятности безотказной работы конструкции в течение требуемого периода эксплуатации. Долговечность реальных конструкций, работающих в условиях многократно повторяющейся нагрузки, связана с выносливостью конкретного строительного материала и особенностями напряженно-деформированного состояния в исследуемой области конструкции. Достоверный прогноз безотказной работы конструкции может быть основан только на экспериментальных данных. Для металлических конструкций – это данные о деформациях в зоне концентрации напряжений при нагружении эксплуатационной нагрузкой, параметры усталостной трещины на момент обследования, прочностные характеристики материала (например,  $K_{1c}$  – критический коэффициент интенсивности напряжений). Эти данные позволяют определить статистические характеристики случайной величины скорости роста трещины и рассчитать вероятность безотказной работы.

Прогноз вероятности безотказной работы обследуемой железобетонной конструкции должен быть построен на опытных данных о характере деструкции бетона при испытаниях эксплуатационной динамической нагрузкой; на информации о прочностных свойствах бетона, арматуры и ее сцепления с бетоном в условиях малоциклового нагружения. Для целого ряда железобетонных конструкций, работающих в условиях малоциклового нагружения, количественная оценка вероятности безотказной работы основана на анализе условий разрушения только бетона. Для этого за короткий период эксплуатации необходимо определить параметры изменения интенсивности макротрещинообразования в бетоне. В отличие от металлических конструкций, где малоцикловое нагружение приводит к распространению макротрещины, в бетоне многократно повторное нагружение вызывает макротрещинообразование и, следовательно, ослабление структуры, что на определенной стадии приводит к спонтанному росту магистральных макротрещин. Методика оценки остаточного ресурса бетонного элемента построена на определении с помощью акустических методов статистических параметров

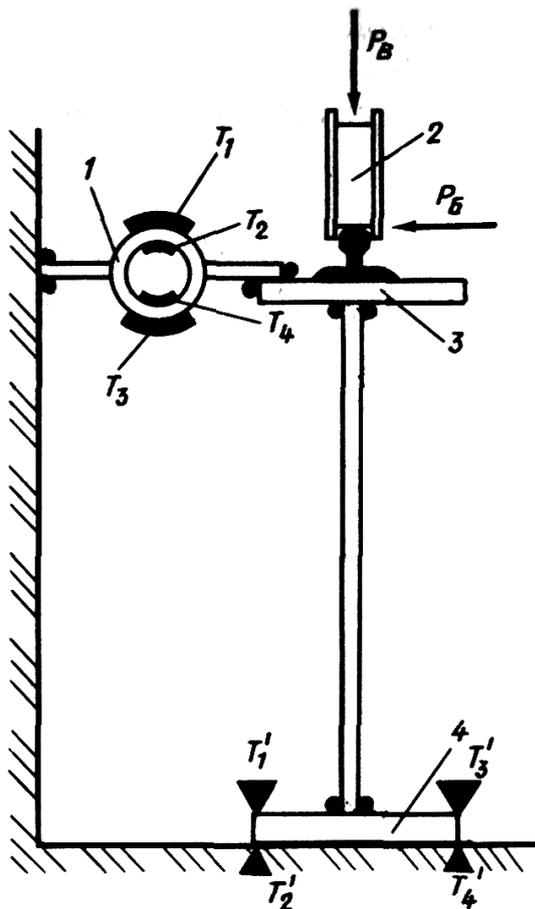
микротрещинообразования при эксплуатационном нагружении, проведении экспресс-испытаний на малоцикловое нагружение (при высоких уровнях максимальных напряжений) образцов бетона обследуемой конструкции, расчете по этим данным вероятности безотказной работы.

Помимо основной задачи – оценки опасности динамических воздействий – для сооружения при испытаниях реальных конструкций эксплуатационной нагрузкой изучаются также и статистические характеристики самих нагрузок. С этой целью проводятся специальные длительные экспериментальные исследования, в которых по реакции конструкции (перемещениям и деформациям) судят о характере воздействия. В качестве примера рассмотрим методику определения статистических характеристик режима нагружения подкрановых конструкций. Коэффициент надежности по нагрузке от мостовых кранов, назначаемый согласно нормативным документам, является окончательным расчетным показателем, который определяется в результате статистического анализа данных о режимах нагружения. Значения этого коэффициента зависят от принимаемой вероятности безотказной работы конструкций. По своей структуре коэффициент надежности является функцией нескольких параметров, которые могут рассматриваться только как случайные величины. Это – масса грузов, частота их подъема и число проездов крана, положение крана и тележки относительно рассматриваемой конструкции, сочетание нагрузок от нескольких кранов.

Совокупность многих случайных факторов делает очень сложным экспериментальное решение задачи по оценке каждого из факторов с последующим определением общего выражения для коэффициента надежности по нагрузке. В связи с этим представляется целесообразным использование методики интегральной схемы нагруженности подкрановых балок вертикальной и горизонтальной нагрузкой. Эта методика была многократно реализована при проведении динамических испытаний эксплуатационной нагрузкой в цехах промзданий. На рис. 2 показана схема измерения усилий и деформаций в одном из сечений подкрановой балки.

После регистрации этих параметров можно рассчитать усилия от вертикальной и горизонтальной эквивалентных нагрузок. Под ударной нагрузкой понимается воздействие на строительную конструкцию другой массы, когда необходимо учитывать взаимодействие двух, а иногда и более, соударяемых тел. В этом случае иногда возникает необходимость изучения местных явлений, протекающих вблизи точек соприкосновения, а также закономерностей распространения волновых колебаний. В этой схеме для интегральной оценки вертикальной крановой нагрузки использовались экспериментальные данные по тензорезисторам  $T'_1 - T'_2$ ;  $T'_3 - T'_4$  о значениях деформаций в нижнем поясе 4 расчетного сечения подкрановой балки. Для измерения горизонтальных сил, передаваемых от колеса 2 крана рельсу 3, применялись электромеханические динамометры кольцевого типа 1 (с парами тензорезисторов  $T_1 - T_2$ ,  $T_3 - T_4$ ), установленные взамен элемента крепления верхнего пояса подкрановой балки к колоннам. Калибровка измерительной системы в значениях вертикальной и горизонтальной нагрузки мостового крана проводилась в ходе испытаний при известном положении крана с различными грузами на

крюке. В дальнейшем разнообразные сочетания значения и положения нагрузок от мостовых кранов могут быть сведены к значениям нагрузки по эквивалентной схеме. Статистический анализ информации, полученной в ходе отработки методики испытаний, показал, что изменение вертикальных и горизонтальных нагрузок



можно рассматривать как случайный процесс. Статистические характеристики этого процесса вычисляются по реализациям конечной длительности, причем продолжительность испытаний может быть ограничена временем 400 час.

Рис. 2.

К определению вертикальной и боковой нагрузки от мостового крана

Исследования режимов нагружения подкрановых конструкций в действующих цехах металлургических комбинатов показали, что коэффициенты надежности по нагрузке могут быть определены по данным испытаний эксплуатационной нагрузкой. Рассмотренная методика натурных испытаний находит применение и в исследовательских работах по уточнению расчетных нагрузок, а также при проведении экспресс-испытаний по определению действительных коэффициентов надежности по нагрузкам в конкретных условиях эксплуатации строительных конструкций нового или реконструируемого производства.

## 2. Испытания конструкций и сооружений искусственно создаваемой вибрационной нагрузкой

В процессе вибрационных испытаний деформации и перемещения в различных точках конструкции изменяются во времени по гармоническому закону. Различают испытания в режиме *собственных и вынужденных колебаний*. Испытания в режиме собственных колебаний в натуральных условиях воспроизводятся значительно проще. Однако использование результатов таких испытаний ограничивается возможностью создания и исследования одной, в лучшем случае, двух форм собственных колебаний, хотя для решения многих практических задач эта информация является вполне достаточной. Испытания в режиме вынужденных колебаний сложнее в исполнении, но ценнее, информативнее по своим результатам. Вынужденные колебания создаются в околорезонансных режимах и обеспечивают исследование различных форм колебаний, в том числе пространственных. Характерной особенностью резонансных испытаний является возможность создания больших динамических деформаций и перемещений в элементах конструкции. Если балку на двух опорах (рис. 3,а), изогнуть силой в

середине пролета и отпустить, то она начнет совершать колебания около исходного (прямого) положения равновесия, изгибаясь то вверх, то вниз (рис. 3,б). Зависимость прогиба  $\delta$  балки от времени  $t$  (рис. 3,в) имеет вид синусоиды с периодом  $T$  и амплитудой  $A$ . Величина  $A$  зависит от начального прогиба и с течением времени уменьшается за счет сил сопротивления в материале и других причин, т. е. колебания затухают. Однако период колебаний  $T$  практически не зависит от начального прогиба и не меняется во времени, т. е. полностью определяется свойствами материала, а также схемой и размерами балки. Для заданной схемы и размеров испытываемой конструкции можно получить (пользуясь теорией упругих колебаний) формулу зависимости между характеристиками периода свободных колебаний, жесткости и плотности материала. Свободные колебания характеризуются собственной частотой  $f = 1/T$ , а жесткость – модулем упругости  $E$ . В случае изгибающих колебаний балки формула для определения частоты имеет вид:

$$f = (ki / l^2) \cdot (E / \rho)^{1/2},$$

где:  $k$  – коэффициент, зависящий от схемы опирания балки (для схемы на рис. 3,а –  $k = 3,57$ );  $i$  – радиус инерции сечения балки, м (для прямоугольного сечения высотой  $h$  радиус инерции  $i = 0,289h$ );  $l$  – полная длина балки, м;  $E$  – модуль упругости материала Н/м<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>. Измерив частоту колебаний образца, можно вычислить модуль упругости материала, если известна его плотность.

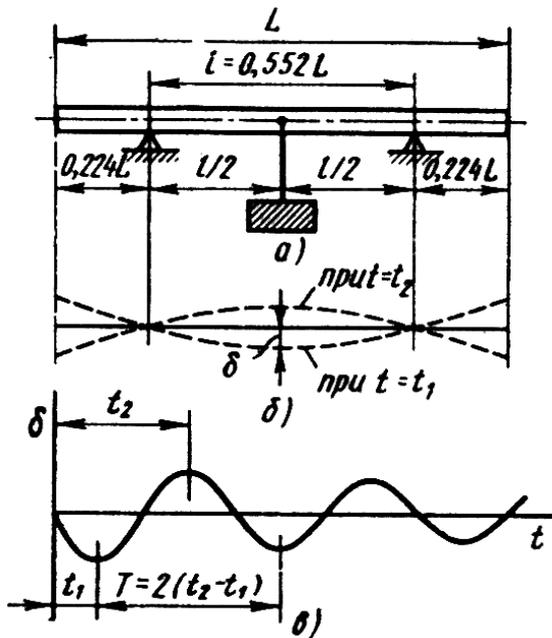


Рис. 3.  
Схема балки (а), форма (б) и график (в) ее колебаний

При натуральных вибрационных испытаниях определяют следующие основные параметры: форму, частоту и декремент колебаний конструкции. При исследовании влияния вибраций на прочностные свойства материалов, элементов и соединений в качестве исходных параметров динамической нагрузки используют коэффициент асимметрии цикла, среднее и амплитудное значения цикла,

выраженные в терминах номинальных напряжений или реальных с учетом их концентрации. Поведение конструкции характеризуется бесконечно большим числом форм колебаний, так как реальные системы обладают бесконечно большим числом степеней свободы. Однако практическое значение имеют лишь первые две-три формы, отвечающие по своим частотам характеристикам действующих нагрузок. На рис. 4,а,б показаны виброграммы, полученные в ходе резонансных испытаний с помощью вибромашины, установленной в четверти пролета балки на двух опорах.

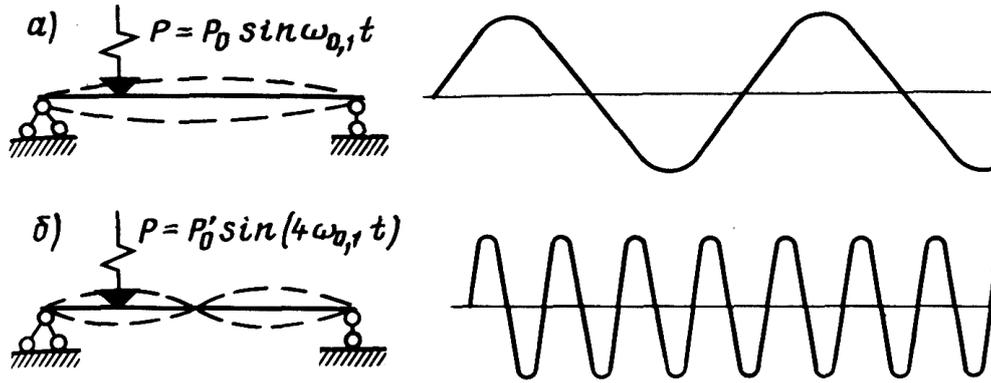


Рис. 4. Виброграммы динамических испытаний

Различные формы колебаний наблюдаются при совпадении частоты возмущающей силы с частотой собственных колебаний по соответствующей форме. Для изгибаемой шарнирно опертой балки отношение значений спектра частот соответствует показателю  $m^2$ , где  $m$  – номер формы. Частота колебаний  $f_0$  измеряется в Гц и связана с периодом колебаний  $T$  соотношением  $f_0 = 1/T$ . В ходе вибрационных испытаний решаются следующие задачи:

- определение динамического коэффициента для воздействий с известными динамическими характеристиками;
- определение состояния несущих конструкций эксплуатируемых сооружений;
- определение упругих динамических характеристик строительных материалов;
- неразрушающий заводской контроль качества строительных изделий;
- определение влияния циклического нагружения на снижение прочностных свойств материалов и конструкций (предел выносливости, малоцикловая усталость).

Испытания по определению динамического коэффициента установившихся вынужденных колебаний проводятся в случаях, когда на конструкцию предполагается установка агрегатов, создающих динамические воздействия. В паспорте агрегата указываются динамические характеристики: масса, амплитудное значение динамической силы, рабочая частота, время запуска и остановки двигателя. Для расчета динамического коэффициента помимо указанных параметров необходимо знать значения собственных частот несущих элементов конструкций и соответствующих этим частотам декрементов колебаний. Расчет конструкций на вибрационную нагрузку проводится с целью определения величины динамических перемещений и деформаций и последующей проверки соблюдения требований нормальной эксплуатации. Динамический коэффициент показывает, во сколько раз динамические перемещения и напряжения в системе с одной степенью свободы отличаются от статических, рассчитанных на действие амплитудного значения динамической силы. С учетом неупругих сопротивлений коэффициент динамичности определяется по формуле

$$k_d = 1 / \sqrt{(1 - \beta^2)^2 + \delta^2 \beta^2 / \pi^2},$$

где  $\beta = \theta / \omega_0$  – отношение круговой частоты возмущающей силы к круговой частоте собственных колебаний конструкции.

Для определения коэффициента динамичности необходимо найти в результате вибрационных испытаний частоту и декремент собственных колебаний. Следует отметить, что значение декремента колебаний зависит от частоты и амплитуды

вибраций, поэтому динамические испытания рекомендуется проводить в условиях, максимально приближенных к реальным. В этом смысле испытания в резонансном режиме являются предпочтительными.

По результатам вибрационных испытаний проводится расчет динамических напряжений и перемещений конструкций на действие вибрационной нагрузки от предусмотренного проектом оборудования. Если рассчитанные параметры окажутся выше допустимых, необходимо разработать инженерное решение по улучшению динамических характеристик конструкции.

Для снижения уровня вибрации конструкции возможны два варианта решения, которые могут быть осуществлены путем изменения параметров динамической нагрузки на конструкцию и изменения параметров самой конструкции. Для реализации первого варианта решения существуют следующие способы:

- изменение частоты динамической нагрузки;
- изменение проектного положения агрегата на перекрытии (при вертикальной динамической нагрузке размещать агрегат следует у опор перекрытия, при горизонтальной нагрузке – вдоль балок перекрытия);
- динамическая балансировка вращающейся части механизма со смещенным относительно оси вращения центром массы (осуществляется закреплением дополнительной массы на вращающейся части для полного или частичного погашения динамического усилия); активная виброизоляция агрегата путем уменьшения динамической составляющей воздействия на перекрытие.

Изменение параметров конструкции для реализации второго варианта решения проводится с учетом влияния этих параметров на частоты свободных колебаний и вывода системы из резонансной области при воздействии гармонической динамической нагрузки. Влияние на частоту свободных колебаний конструкций обеспечивается:

- изменением ее конструктивной схемы, т. е. введением связей, пересмотром конструктивного решения опорных узлов, уменьшением пролета при введении дополнительных опор;
- изменением жесткости конструкции за счет трансформации поперечного сечения элементов;
- устройством постагента под агрегат, который в зависимости от необходимого уменьшения или увеличения частоты может быть запроектирован массивным без прочной связи с конструкцией, легким и жестким, прочно прикрепленным к перекрытию.

При разработке конструктивных решений по уменьшению вибраций необходимо учитывать, что уменьшение частоты свободных колебаний конструкции всегда сопровождается увеличением прогибов и напряжений в ней, вызванных статической нагрузкой. В связи с этим требуется проведение дополнительного статического расчета. Вибрационные (резонансные) испытания широко используются для оценки состояния эксплуатируемых сооружений. Этот неразрушающий метод контроля позволяет устанавливать частоты для первых пространственных форм колебаний конструкции (рис. 5,а–г) и определять соответствующие декременты колебаний. Эти параметры используются в качестве показателей степени повреждения конструкций. Особенно актуальна эта задача для сооружений, подверженных сейсмическим нагрузкам.

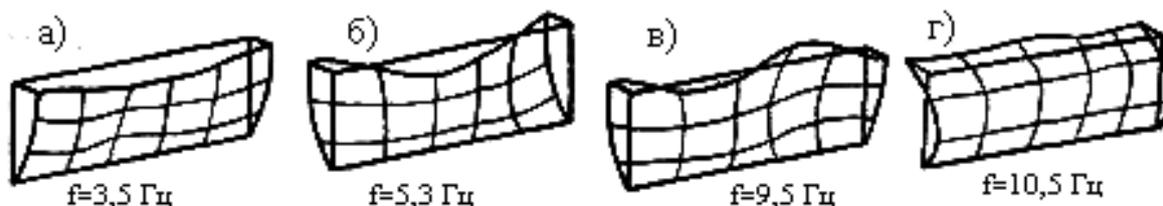


Рис. 5. Пространственные формы колебаний модели металлического каркаса здания

Многочисленные исследования каркасных и крупнопанельных зданий показали, что динамические параметры пространственной конструкции очень чувствительны к повреждениям, вызванным сейсмической нагрузкой. В испытаниях, проведенных на реальных сооружениях и крупномасштабных моделях, были установлены количественные соотношения между уровнем сейсмической нагрузки и динамическими параметрами конструкции, получившей повреждения, причем сейсмическая нагрузка моделировалась вибрационным воздействием. В процессе отработки методики было доказано, что характер повреждений при сейсмическом и вибрационном воздействии идентичен. Кроме того, было установлено, что перемещения и внутренние усилия в конструкции при возмущениях, передающихся через грунт и в случае возбуждения колебаний в уровне перекрытия практически не отличаются. С методической точки зрения эти результаты чрезвычайно важны, так как динамическое нагружение в уровне перекрытия значительно эффективнее.

Динамические испытания строительных изделий в режиме собственных или вынужденных колебаний являются одним из составных элементов комплексного неразрушающего контроля качества заводской продукции. Наиболее широкое применение получили вибрационные испытания на заводах сборного железобетона, проводимые для контроля качества изгибаемых конструкций, в том числе и предварительно напряженных. Оценка прочностных и деформативных показателей конструкции основана на предварительно выявленных статистических зависимостях указанных характеристик с параметрами неразрушающих вибрационных, ультразвуковых, магнитных методов. Эти зависимости носят название градуировочных и строятся по результатам серии испытаний статической нагрузкой и неразрушающим методом. Следует отметить, что косвенный неразрушающий контроль прочности, жесткости и трещиностойкости сборных железобетонных элементов может относиться либо к определенным зонам объекта исследования, либо ко всему объекту в целом. При вибрационных испытаниях измеренный параметр является обобщающей характеристикой сопротивления конструкции. В связи с этим, для получения градуировочных зависимостей вибрационного метода требуется проведение статических испытаний конструкции в целом, тогда как аналогичная зависимость ультразвукового метода строится по результатам испытаний образцов бетона. Методика заводского вибрационного контроля предполагает проведение серии предварительных градуировочных испытаний десяти изделий из партии. В дальнейшем неразрушающий контроль изделий может быть выборочным или сплошным.

Принципиальная схема методики резонансных испытаний заводских изделий не отличается от схемы испытаний образцов и натурных конструкций в режиме вынужденных колебаний. Вместе с тем, необходимо обратить внимание на наличие некоторых характерных особенностей динамических испытаний в заводских условиях. Для массового контроля качества изделий сборного железобетона необходимы специальные автоматизированные установки – стенды, позволяющие возбуждать

колебания основного тона в массивных конструкциях. При резонансных испытаниях образцов в равной степени используются продольные, крутильные и изгибные колебания. В испытаниях заводских конструкций реализуется схема изгибных колебаний. Информативными параметрами неразрушающего заводского вибрационного контроля качества являются собственная частота колебаний железобетонного элемента и декремент колебаний. При резонансных испытаниях натуральных сооружений и образцов строительного материала в качестве контролируемого параметра используется, как правило, частота колебаний основного тона. Декремент колебаний является характеристикой неупругих свойств исследуемого объекта. Он зависит не только от потерь энергии колебаний в конструкции или образце, но и от трения на опорах и сопротивления внешней среды.

При динамическом испытании эксплуатируемых сооружений, например, до и после сейсмического нагружения, значение декремента изменяется существенно. Большой разброс значений декремента затрудняет количественную оценку повреждений конструкции, что обуславливается существенным и неоднозначным вкладом в общие потери энергии колебаний трения в узлах сопряжения конструктивных элементов. При проведении заводских вибрационных испытаний потери на опорах и на преодоление сопротивления внешней среды можно принять постоянными, так как обеспечивается создание стабильных условий испытаний для железобетонных конструкций одного типа. При этом различия в потерях энергии в конструкции определяются степенью поврежденности элемента (трещины в бетоне, в зоне контакта бетона с арматурой). Таким образом, низкое качество изготовления изделия, нарушения в технологии находят свое отражение в увеличении декремента колебаний.

Для контроля качества сборных железобетонных конструкций используются также и испытания в режиме свободных колебаний. На рис. 6 представлена схема проведения вибрационных испытаний железобетонной предварительно напряженной ребристой плиты 1. Для возбуждения колебаний используется ударное устройство 2, создающее фибровые напряжения в бетоне не менее 5% от предельных. Механические колебания преобразуются датчиками 3 в электрический сигнал, который подается на регистрирующий прибор 5. Питание осуществляется через стабилизатор 7 и выпрямитель 6. Значения частоты и декремента определяются по осциллограммам свободных колебаний.

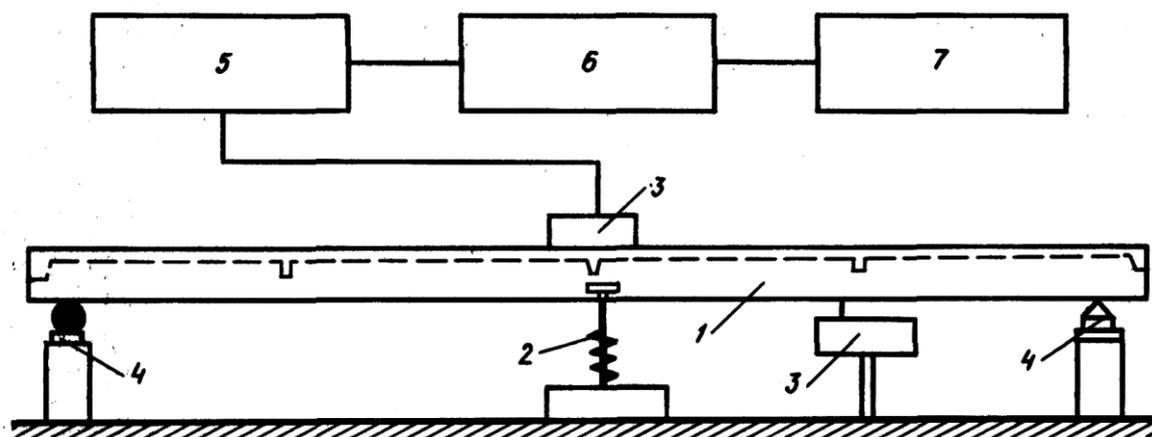


Рис. 6. Схема вибрационных испытаний сборной предварительно напряженной плиты в режиме свободных колебаний

В отдельную группу динамических испытаний следует выделить вибрационные испытания на усталость. Динамические испытания при повторно-переменной нагрузке с заданной асимметрией цикла проводят с целью определения предела выносливости, условий разрушения в результате малоциклового усталости. Условия разрушения исследуемого элемента в результате малоциклового усталости материала выражаются семейством кривых, построенных в координатах «максимальные напряжения – число циклов до разрушения». Предел выносливости является частным случаем для этих зависимостей и представляет собой максимальные напряжения при  $2 \times 10^6$  и более циклах нагружения.

Разрушение металлов при циклическом воздействии носит ярко выраженный локальный характер и происходит в три стадии: образование усталостной трещины, устойчивое ее развитие, разрушение элемента с трещиной критической длины. Для бетонных и каменных элементов характерны также три стадии усталостного разрушения, однако, развитие макротрещин происходит в результате накопления повреждений во всем рабочем объеме. Для аналитического описания процесса усталостного разрушения используется аппарат механики разрушения и теории вероятностей, характеризуемый соответствующими параметрами: длина трещины, коэффициент концентрации напряжений, скорость роста трещины, статистические параметры нагрузок, материала, напряжений в зоне концентрации, количество микротрещин в единице объема и т. д. Эти параметры контролируются при проведении вибрационных испытаний на усталость. Усталостные испытания в большом объеме проводятся на образцах материала, фрагментах и узлах конструкции. Испытания на усталость являются наиболее трудоемким и сложным видом динамических испытаний. Рассматривая многообразие задач и факторов, можно предложить следующий перечень возможных вариантов усталостных испытаний, выстроенных по степени усложнения методики эксперимента:

- испытания гладких образцов строительных материалов;
- испытания образцов с концентраторами напряжений, исследование условий зарождения усталостной трещины;
- испытания стандартных образцов с трещиной;
- испытание фрагментов конструкций и узлов в сложнапряженном состоянии с учетом остаточных напряжений;
- испытание фрагментов конструкций с учетом температуры среды;
- испытания на случайные повторно-переменные нагрузки.

*Динамические испытания при кратковременном силовом воздействии.* Экспериментальная оценка работы конструкций при кратковременных динамических нагрузках большой интенсивности предполагает решение следующих задач:

- определение влияния скорости деформирования на прочностные и реологические свойства строительных материалов;
- исследование влияния параметров импульса нагрузки (длительность, форма, максимальное значение) на кинетику напряженно-деформированного состояния, перераспределение усилий при появлении и развитии неупругих деформаций, на трещиностойкость и несущую способность конструкции;
- исследование совместной работы конструктивных элементов сооружения и основания при импульсном воздействии.

Как показали результаты многочисленных лабораторных испытаний, прочностные и деформативные свойства строительных материалов существенным образом зависят от скорости нагружения. Прочность бетона может увеличиваться до 80% при возрастании скорости деформирования. Модуль упругости возрастает до 30%. Значительно, более чем в 2,5 раза, может возрасти трещиностойкость бетона при

переходе от статического к импульсному нагружению. Точное значение соответствующих коэффициентов динамического упрочнения бетона зависит от структуры бетона, вида напряженного состояния и скорости нагружения.

При высоких скоростях нагружения изменяются прочностные и деформативные характеристики конструкционных сталей и сплавов. Так, для малоуглеродистой стали при скорости деформирования  $10^3$  с предел текучести увеличивается приблизительно в 3 раза, а прочность возрастает на 40%. Для арматурных сталей увеличение временного сопротивления и предела текучести составляет соответственно 20 и 90%. Менее изучены динамические прочностные и деформативные свойства каменных материалов, пластмасс и алюминиевых сплавов. Однако и для этих конструкционных материалов отмечается увеличение прочности и изменение диаграммы деформирования при переходе от статического к высокоскоростному деформированию.

Необходимо отметить, что учет влияния изменения прочностных и реологических свойств конструкционных материалов при высокоскоростном деформировании в расчетах на кратковременные динамические нагрузки позволяет получить существенную экономию материала. Объясняется это тем, что для однократных воздействий допускаются значительные пластические деформации, а именно до этой стадии работы материала отмечается улучшение его механических свойств.

Испытание образцов на ударное сжатие и растяжение проводится, как правило, на вертикальных копровых установках. Методика ударных испытаний должна учитывать ряд специфических особенностей высокоскоростного деформирования. К ним относятся: волновой характер распространения деформаций и напряжений, и, следовательно, неоднородное по высоте образца напряженно-деформированное состояние; большой градиент локализованных пластических деформаций, скорость развития пластических деформаций и скорость развития микро- и макротрещин. При назначении расчетных прочностных характеристик материала по результатам ударных испытаний необходимо учитывать, что полученные данные могут быть использованы для конструкций без концентраторов напряжений. При наличии в конструкции концентратора напряжений (сварные швы, отверстия и т. д.) или при появлении концентраторов (типа трещин) результаты испытаний гладких образцов должны быть дополнены испытаниями на ударное нагружение образцов с соответствующим концентратором напряжений. В результате дополнительных испытаний должна быть дана количественная оценка возможного снижения прочности элемента конструкции, вызванного увеличением хрупкости металлов при высокоскоростном деформировании.

Рассмотренные специфические особенности измерения высокоскоростных процессов деформирования усложняют технику проведения эксперимента. Технические трудности проявляются даже в опытах на образцах (при регистрации скоростей роста трещины в бетоне с помощью тензорезисторов последовательного обрыва, при определении максимальной величины пластических деформаций в зоне с высоким их градиентом, при построении динамической диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  с учетом различия в скоростях распространения упругой и пластической волны). При испытаниях конструкций кратковременной нагрузкой большой интенсивности обнаруживаются дополнительные трудности в процессе регистрации и расшифровки результатов. Вызвано это необходимостью синхронной записи и последующего анализа упругопластических деформаций в нескольких удаленных друг от друга зонах объекта. В связи с этим, количество проведенных испытаний конструкций на ударную нагрузку является весьма ограниченным в связи с недостаточно отработанной методикой таких испытаний.

Опыты по оценке работы конструкций при импульсном нагружении относятся в

настоящее время к области научного эксперимента, как в методическом, так и теоретическом аспектах. В этих исследованиях изучаются вопросы, связанные с формированием предельных состояний несущих элементов конструкций при ударе, с учетом их взаимного влияния и взаимодействия с грунтом основания. Ударные испытания часто проводятся на отдельных фрагментах сооружения, включающих один-два конструктивных элемента, например: ригель на жестких опорах, плита перекрытия – ригель; ригель – колонны; ригель – опора – основание и т. д. В этих испытаниях определяются деформации и перемещения в опасных сечениях, оцениваются динамические реакции и инерционные силы, возникающие при совместных абсолютных и относительных перемещениях двух несущих элементов в упругой и упругопластической стадиях деформирования. Результаты таких испытаний являются составной частью экспериментально-теоретических исследований работы конструкций сооружений при ударных воздействиях. Необходимо отметить, что несмотря на существование общих подходов к методикам проведения натурных испытаний, каждый конкретный эксперимент всегда индивидуален. Повторить опыт в строгом и точном соблюдении всех деталей невозможно, так как каждое новое испытание – это и новая более совершенная ступень в развитии методики, техники и объекта испытаний. Поэтому не может быть универсальных рекомендаций, пригодных для всех случаев испытаний. От исследователя–экспериментатора всегда требуется проявление элементов творчества. Если пример расчета строительной конструкции служит детальным руководством для инженера, то пример испытания конструкции должен иллюстрировать экспериментальный поиск, совершенствование методики. Каждое конкретное испытание конструкции следует рассматривать как предмет детального изучения, который в методическом плане можно и должно изменять к лучшему. Примером таких рациональных научно обоснованных изменений в методике, позволяющих не только усовершенствовать технику инструментального контроля состояния, но и улучшить эксплуатационные характеристики объекта, является опыт развития методики приемочных испытаний сосудов давления. Проведенная с этой целью экспериментальная работа интересна еще и тем, что результаты ее, имеющие большое практическое значение, могут быть получены благодаря комплексному использованию современной усовершенствованной методики статических, динамических и акустических натурных испытаний.

### **3. Методика испытания мостов статической и динамической нагрузками**

Основная задача испытания мостов состоит в выявлении характера действительной работы как сооружения в целом, так и отдельных его элементов. Известно, что в расчетах мостовых конструкций допускаются определенные упрощения расчетных схем с известной идеализацией свойств материалов. Следовательно, действительная работа мостовых конструкций и их элементов, как правило, отличается от расчетных предположений. Результаты испытания мостов могут быть использованы в совершенствовании методов расчета и в оценке грузоподъемности сооружений. В процессе эксплуатации мостов происходят изменения условий их работы. Могут изменяться и свойства материалов. Испытания мостов позволяют выявлять влияние этих изменений на фактическую работу мостовых конструкций. Испытания мостов производят:

– при приемке новых сооружений в эксплуатацию с целью установления начальных, общих и местных деформаций – прогибов, перемещений опорных частей, периодов и амплитуд вертикальных и горизонтальных колебаний, напряженного состояния в наиболее характерных зонах и т. п. Эти данные сопоставляют с

расчетными, а в дальнейшем – с результатами последующих испытаний для выявления изменений в процессе эксплуатации сооружения;

- при уточнении расчетов грузоподъемности особо ответственных мостов;
- по окончании усиления, для оценки его эффективности;
- периодически, при эксплуатации, для выяснения изменений в работе конструкции;
- в специальных случаях с целью накопления данных для уточнения расчетов мостовых конструкций и проведения научно-исследовательских работ.

Испытанию моста должно предшествовать его обследование. Испытания мостов производят статическими и динамическими нагрузками. Динамические испытания ведут, как правило, под проходящими и иногда под специальными поездами. В необходимых случаях испытания мостов сочетают с лабораторными исследованиями. Для проведения испытаний предварительно разрабатывают программу и методику. Должна быть четко сформулирована цель и подробно описаны порядок и способы испытаний. При этом выбирают тип нагрузки, характер и порядок загрузки испытуемой конструкции.

При испытаниях мостовых конструкций в основном измеряют или регистрируют общие деформации, характеризующие работу конструкций в целом (угловые и линейные перемещения пролетных строений или отдельных их элементов, опор и т. п.) и местные деформации, по которым определяют напряженное состояние элементов конструкций. При динамических испытаниях для получения динамических характеристик сооружения в целом или отдельных его элементов регистрацию процессов изменений деформаций производят обычно приборами и аппаратурой с записывающими устройствами. Для правильного выбора приборов и аппаратуры при проведении испытаний конкретного сооружения необходимо установить заранее приблизительные величины и характер изменения ожидаемых деформаций. Для этой цели используют расчетные материалы или результаты испытаний аналогичных конструкций. На выбор аппаратуры и приборов значительное влияние оказывают сроки и объем работ в процессе испытаний. Нередко для проведения испытаний специально разрабатывают различного рода приспособления и приборы, удовлетворяющие требованиям испытаний данной конструкции.

В методике испытаний в хронологическом порядке планируют проведение самого испытания: подготовительные работы по установке приборов и аппаратуры, последовательность нагружения и разгрузки, расположение испытательной нагрузки на конструкции, время выдержки конструкции под нагрузкой, порядок снятия и записи отсчетов по приборам и т. п.

При динамических испытаниях необходимо указывать скорости прохода испытательных нагрузок на мосту, режимы торможения, моменты включения регистрирующей аппаратуры и приборов и т. д. Перед испытаниями разрабатывают схему установки измерительных приборов и обосновывают их выбор. Для записи показаний приборов во время испытаний заранее составляют специальные журналы. Такие журналы готовят на определенную группу приборов, отсчеты по которым снимает один человек. Желательно обеспечить по возможности одновременное завершение снятия отсчетов.

Сроки подачи испытательных нагрузок на мост заранее согласовывают. При испытаниях эксплуатируемых мостов также заблаговременно должны быть согласованы «окна» в движении поездов на время испытаний. Испытания выполняют под руководством ответственного лица, которое заранее распределяет обязанности между другими участниками работы. Следует помнить, что испытания моста весьма ответственная и дорогостоящая операция, для успешного выполнения которой

требуются тщательная подготовка и высокая организованность. При испытаниях мостов необходимо соблюдать правила техники безопасности.

При испытаниях мостовых конструкций в основном измеряют или регистрируют: общие перемещения, характеризующие работу конструкций в целом (угловые и линейные перемещения пролетных строений или отдельных их элементов, опор и т. д.); местные деформации, по которым определяют напряженное состояние элементов конструкций; динамические характеристики сооружения в целом или отдельных его элементов. В зависимости от места проведения различают натурные и лабораторные испытания. Натурные испытания мостов носят обычно кратковременный характер (исключая длительное наблюдение), включают в себя последующую обработку и анализ результатов испытаний, а в некоторых случаях – дополнительные лабораторные исследования. В процессе натурных испытаний оценивается соответствие действительной работы конструкции принятой в расчете, несущая способность моста в целом или отдельных его элементов, определяются жесткость пролетных строений (иногда отдельных его элементов), характеризуемая общими прогибами от эксплуатационной или испытательной нагрузки, динамические и другие характеристики.

При лабораторных испытаниях оценивается усталостная прочность материала пролетных строений или соединений, исследуется на моделях характер напряженно-деформированного состояния отдельных узлов пролетных строений или конструкций в целом, особенности перераспределения усилий в элементах пролетных строений в зависимости от характера и типа нагрузки, определяются физико-механические характеристики материала, его химический состав, способы защиты от коррозии и т. д. При проведении лабораторных испытаний учитываются масштабные и силовые факторы, скорость нагружения, очередность приложения и снятия нагрузок, продолжительность их выдерживания и т. п.

По характеру внешнего силового воздействия на мосты различают два вида испытаний: статические и динамические. *В процессе статических испытаний* оценивается напряженно-деформативное состояние конструкции или отдельных ее элементов под воздействием статических нагрузок, а *при динамических испытаниях* – динамические характеристики пролетных строений (период, частота колебаний пролетных строений в целом или отдельных его элементов, собственные и вынужденные колебания, скорость затухания колебаний, динамический коэффициент и др.).

При проведении испытаний мосты загружают различными испытательными нагрузками. В процессе испытания моста в элементах и узлах пролетных строений не должны развиваться значительные остаточные деформации, поэтому испытательные нагрузки не должны быть чрезмерно высокими. В качестве испытательной нагрузки используют наиболее тяжелую из обращающихся или вводимых в обращение по данному мосту. В некоторых случаях при испытании отдельных элементов и узлов пролетных строений и опор для нагружения можно использовать домкраты, натяжные устройства или подвесные грузы.

*При динамических испытаниях* в качестве испытательной нагрузки используют: обращающиеся поезда, специальные испытательные поезда, вибрационные машины, специальные ударные нагрузки. В первом случае динамическое воздействие на мост создается проходящими поездами. Это позволяет оценить действительную работу пролетного строения или отдельных его элементов от воздействия эксплуатационных нагрузок. Такие испытания обычно не нарушают график движения поездов и позволяют оценить не только динамические характеристики моста, но и режим его работы в условиях реальной эксплуатации, что очень важно для определения

надежности работы моста при его длительной эксплуатации.

В некоторых случаях для оценки динамического воздействия определенных типов нагрузки по мостам пропускают специальные испытательные поезда, составленные из локомотивов и вагонов. Такие поезда можно использовать для выяснения характера работы определенной конструкции моста при динамическом воздействии конкретного типа нагрузки. С целью получения более полных динамических характеристик пролетного строения на мост воздействуют *вибрационной* нагрузкой, создаваемой вибрационными машинами (рис. 7) с вращающимися эксцентриковыми массами (1 – 4). Диапазон их регулирования достаточно велик, что позволяет создавать вынужденные колебания различных видов: вертикальные, горизонтальные (вдоль и поперек моста), изгибно-крутильные, галопирующие и т. д. Вибрационная машина смонтирована на платформе 8, устанавливается на пролетном строении и жестко крепится к путевым рельсам захватами 5. Место установки определяется программой испытаний и типом конструкции. При работе машины создается инерционная сила  $P$ , изменяющаяся по гармоническому закону:

$$P = ma \omega^2 \sin \omega t,$$

где:  $m$  – масса эксцентрика;  $a$  – радиус вращения эксцентрика;  $\omega$  – угловая частота вращения;  $t$  – время.

Меняя  $a$  и скорость вращения, можно получить различные периодические инерционные усилия в диапазоне вплоть до появления резонанса в испытываемой конструкции. Вибрационные испытания в некоторых случаях проводят с целью оценки усталостной прочности пролетных строений. Для возбуждения свободных затухающих колебаний резко разгружают пролетные строения – сбрасывают с них заранее подвешенный или положенный груз. Таким способом испытываются пролетные строения со сравнительно небольшой жесткостью. Аналогичное воздействие получается, если груз бросают на пролетное строение. Возбудить горизонтальные колебания пролетного строения можно «тараном». Иногда для усиления ударного воздействия поезда на мосту устраивают рельсовый стык с увеличенным зазором или ступеньку. При изучении сейсмостойкости конструкций используют специальные ударные нагрузки – *ударные импульсивные воздействия* можно вызвать направленным взрывом небольшой мощности. Важно отметить, что перед проведением специальных динамических испытаний и после них пролетное строение и опоры должны быть детально обследованы для выявления возможных изменений, возникших в процессе испытаний.

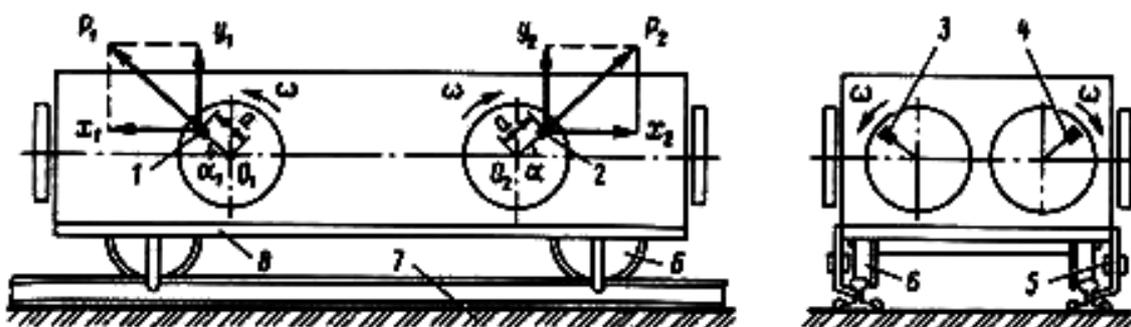


Рис. 7. Схема вибрационной машины для испытания пролетных строений мостов: 1, 2 – неуравновешенные массы поперечных валов; 3, 4 – то же продольных, 5 – захваты; 6 – колеса платформы; 7 – исследуемая конструкция;

## 8 – платформа машины

Измерительные приборы перед испытаниями должны быть установлены и надежно закреплены на конструкции для обеспечения стабильности показаний и защищены от внешних атмосферных воздействий. Перед испытаниями необходимо проверить возможность доступа к приборам, их освещение, а также выполнение мер по технике безопасности.

*Испытания статической нагрузкой* моста начинают со снятия «нулевых» показаний по всем приборам, затем приступают к предварительному загрузению – «обкатке»: пропускают подвижную нагрузку по пролетному строению с малой скоростью, наблюдая за показаниями приборов. После снятия нагрузки вновь проверяют показания приборов. Завершив эти работы, начинают загружать мост испытательной нагрузкой. Загружение повторяется не менее трех раз для каждого установленного программой испытаний положения нагрузки со снятием показаний по приборам под нагрузкой и без нее. Важное условие проведения статических испытаний — сокращение времени на снятие показаний приборов. Для этих целей лучше пользоваться приборами с автоматической регистрацией показаний. При визуальной регистрации показаний число приборов, обслуживаемых одним наблюдателем, должно быть минимальным. Записи показаний приборов ведутся аккуратно в журнале испытаний по каждому циклу или ступени загрузки. В журнале фиксируется дата проведения испытаний, время записи, характер загрузки, место приложения нагрузки, данные о поведении конструкции, толчки, удары, раскрытие трещин и т. д., а также об изменении температуры, атмосферных осадках и т. п.

При испытании динамическими нагрузками испытательную нагрузку прогоняют по мосту с различными скоростями от 5 км/ч («проползание») до максимально допустимой. Число заездов для каждой из заданных скоростей не должно быть меньше трех. Тип, число и расположение приборов зависят от цели испытаний. Например, для изучения общих перемещений обычно регистрируют вертикальные и горизонтальные перемещения и колебания, а иногда и продольные перемещения и колебания пролетных строений. В пролетных строениях со сквозными главными фермами и со сплошными балками для измерения прогибов приборы устанавливают в середине пролета обеих главных ферм (балок). Если возможно появление колебаний высших форм, то устанавливают приборы и в четвертях пролета. Колебания регистрируются механическими приборами Гейгера или осциллографами. Горизонтальные колебания регистрируют прогибомерами и горизонтальными маятниками конструкции ДИИТа. В ряде случаев при проведении динамических испытаний записывают изменения деформаций в отдельных элементах конструкции. Число приборов и их размещение зависят от программы и цели испытаний. Скорость движения и число осей в проходящих поездах определяются при помощи специальных педалей и индукционных датчиков, соединенных с регистрирующей аппаратурой.

Для оценки грузоподъемности и надежности мостов необходимо знать механические характеристики материалов. При отсутствии технической документации на материал или явном несоответствии его качества проектным данным основные механические характеристики, а иногда и химический состав материала определяют в процессе обследования и испытания мостов. Оценить прочностные характеристики и качество материала можно в лабораторных и полевых условиях. Лабораторные исследования дают наиболее полные и надежные результаты. Однако для их проведения требуется больше времени, а также взятие проб материала, что нередко связано с повреждениями конструкции. Полевые методы контроля позволяют быстро получить прочностные характеристики материала, но они менее полны и точны.

В эксплуатируемых мостах можно встретить элементы, изготовленные из различного материала: чугуна (опорные части), сварочного железа, литого железа и современных сталей (малоуглеродистые, низколегированные и др.). При обследовании важно установить род металла. Предварительно это можно сделать по виду свежего излома снимаемой зубилом стружки. Для литого железа характерна светлая мелкозернистая структура в изломе. Аналогичный вид излома у современных сталей. В изломе сварочного железа хорошо наблюдается слоистая структура серого цвета. Стружка чугуна легко ломается и в изломе имеет крупнозернистую структуру серого цвета. В сомнительных случаях род металла определяют металлографическими исследованиями образцов в лаборатории. Основные механические характеристики и химический состав металла определяют при испытании образцов в лаборатории. Образцы изготавливают из проб (заготовок), вырезанных из пролетных строений ножовкой или высверливанием, газовой резкой так, чтобы не сильно ослабить рабочую часть сечения элемента. Ослабленные участки перекрывают накладками. Следует помнить, что при изготовлении образцов из заготовки, вырезанной газовой резкой, рабочая поверхность образца от кромки реза должна быть удалена не менее чем на 10 мм.

Предел прочности (временное сопротивление), предел текучести, относительное удлинение или сужение стали определяют на стандартных образцах, чаще всего на пятикратных гагаринских (рис. 8,а). Для определения ударной вязкости изготавливают образцы с надрезом (рис. 8,б).

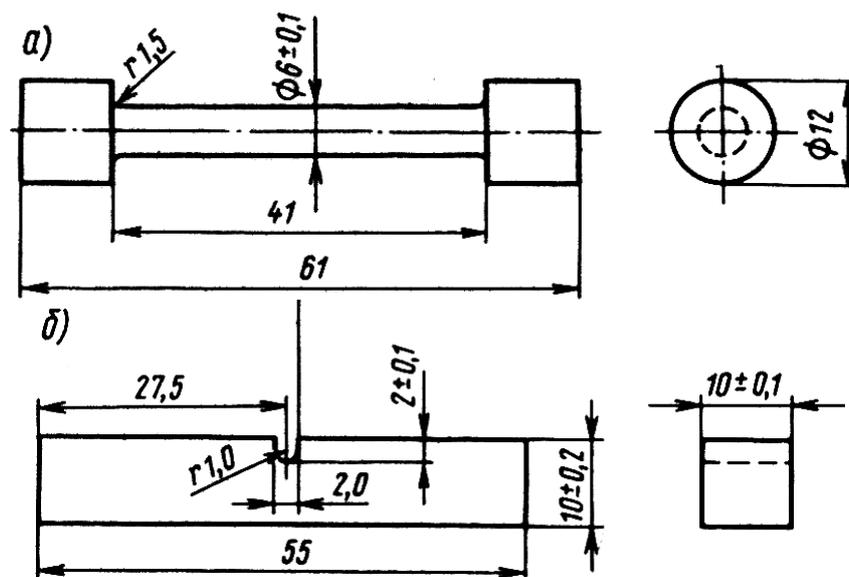


Рис. 8. Образцы для определения механических характеристик металла:

а – пятикратный гагаринский; б – с надрезом для испытания на ударную вязкость

Число образцов каждого типа должно быть не менее трех. Минимальное число образцов изготавливают из заготовки размерами 130x40x10 мм, из нее же можно взять пробы для химического анализа: 50 г стружки или кусочек с плоской поверхностью площадью не менее 2 см<sup>2</sup> (для спектрального анализа).

Прокатный металл обладает различными механическими характеристиками вдоль и поперек прокатки, поэтому образцы строго ориентируют по направлению прокатки или передачи усилия. Направления показывают на заготовках.

Прочность бетона эксплуатируемых железобетонных конструкций определить сложно, так как бетон – неоднородный материал, прочность которого зависит от многих факторов и может значительно различаться в пределах одного элемента. Для лабораторных испытаний из конструкций вырезают керны для изготовления образцов.

Наиболее удобный способ взятия пробных образцов путем выбуривания цилиндров диаметром 70...150 мм. Они имеют большие размеры, поэтому взять их из элементов железобетонных конструкций не всегда возможно. Таким методом прочность бетона можно оценивать лишь в отдельных зонах массивных элементов. Поэтому широко применяются неразрушающие методы, позволяющие оценивать прочность бетона без разрушения. Неразрушающие методы по подготовке к испытаниям можно разделить на две группы. К первой группе относятся методы, в которых прочность бетона определяют по значению усилия, затрачиваемого на выдергивание заранее забетонированных в тело бетона стержней или установленных в шпур, высверленные в бетоне конструкции. Ко второй группе относятся методы определения прочности бетона: 1) по отпечаткам на поверхности от удара молотком, зубилом, шариком или другим бойком – метод пластических деформаций; 2) по отскоку бойка; 3) по скорости прохождения ультразвука. Эти методы подробно рассмотрены в предыдущем разделе. Ниже будут подробнее рассмотрены методы и средства, применяемые при испытании мостов.

*Метод пластических деформаций* основан на наличии связи между прочностью бетона  $R$  и значением косвенного показателя, характеризующего внедрение сферического иньектора в бетон при определенной энергии удара. Этот метод реализуется при помощи различных устройств, например молотка Кашкарова, склерометра Шмидта и др. *Склерометр* Шмидта получил широкое распространение при испытании мостов (метод отскока бойка). Принцип работы прибора заключается в следующем. Легким нажатием на головку ударного стержня 2 (рис. 9,а) снимают блокировку 11, при этом стержень выдвигается из корпуса, нажимают ударным стержнем на исследуемую поверхность 1, предварительно зачищенную наждачным камнем. Как только стержень почти полностью войдет в корпус, ударяет молот 13. В момент удара прибор должен находиться строго перпендикулярно к поверхности исследуемой конструкции. После удара молот 13 отскакивает назад, перемещая движок 6 по градуированной шкале 5. Отсчет положения движка 6 дает значение обратного перемещения  $D$  молота 13, по которому определяется прочность конструкции по графику, изображенному на корпусе прибора (рис. 9,б). Измерения производят в 10 точках обработанной поверхности. За расчетную принимают среднее значение прочности. Прибор эталонирован в горизонтальном положении. Если склерометр устанавливается на наклонных или горизонтальных поверхностях, то размер обратного хода  $D$  нужно корректировать (рис. 9,в). При исследовании старых бетонов поверхностный слой снимают на глубину до 10 мм и проводят 5–10 измерений.

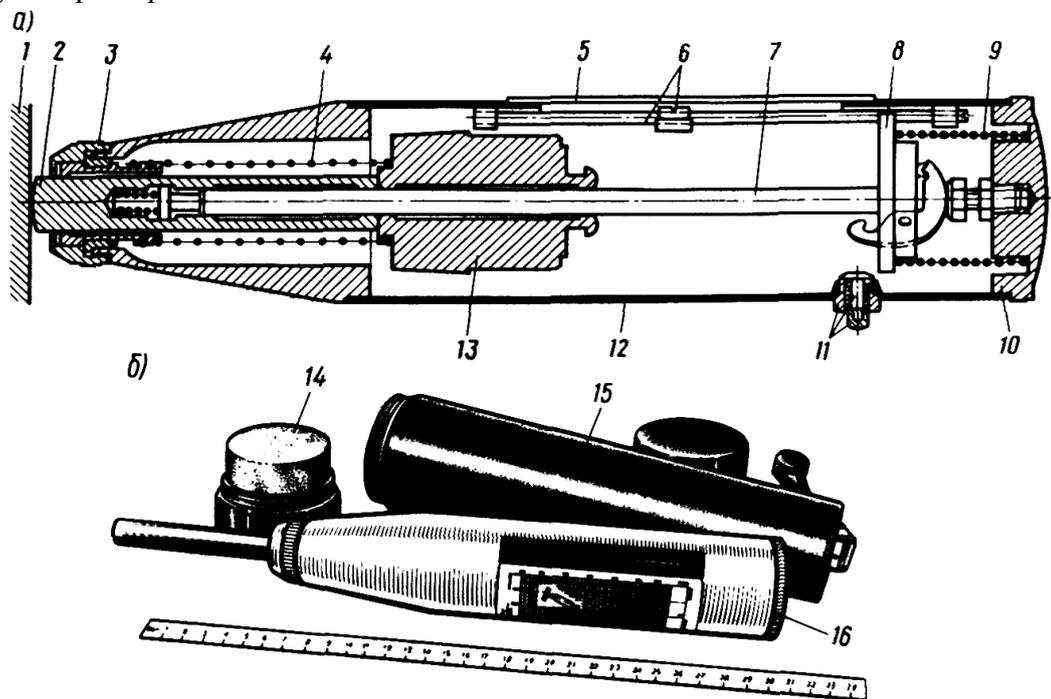
*Метод определения прочности бетона по скорости прохождения ультразвука.* Скорость распространения ультразвука – функция продольной, сдвиговой и поперечной упругости, плотности и геометрической формы.

Отсутствие прямой связи между прочностью (упругими характеристиками) материала и скоростью прохождения через него ультразвука существенно осложняет оценку прочности. При испытании бетона ультразвуком нужно учитывать факторы, влияющие на зависимость между скоростью распространения ультразвука и прочностью (характеристики заполнителей, их содержание в бетоне, технология изготовления, температура и пр.). Для учета влияния этих факторов строят тарировочные кривые зависимости скорости ультразвука от прочности бетона по испытанию кубиков (рис. 10). Если испытывают эксплуатируемые мосты, состав бетона которых неизвестен, то для установления связи между скоростью ультразвука и прочностью бетона можно дополнительно испытать керны, взятые из конструкции. Тогда прочность бетона:

$$R_K = R_K \left( \frac{v_K}{v_K} \right)^4,$$

где  $R_K$  – прочность бетона, по испытаниям кернов на прессе;  $v_K, v_K$  – скорости прохождения ультразвука в кернах и в бетоне конструкции. Влияние различных факторов на скорость прохождения ультразвука можно учитывать дифференцированно введением поправочных коэффициентов. Оценка же влияния отдельных факторов возможна лишь по результатам испытаний.

Точность определения прочности бетона ультразвуковым методом составляет приблизительно 10%. Существует много ультразвуковых приборов для определения прочности бетона, работающих по принципиальной схеме электронного осциллографа со ждущей разверткой.



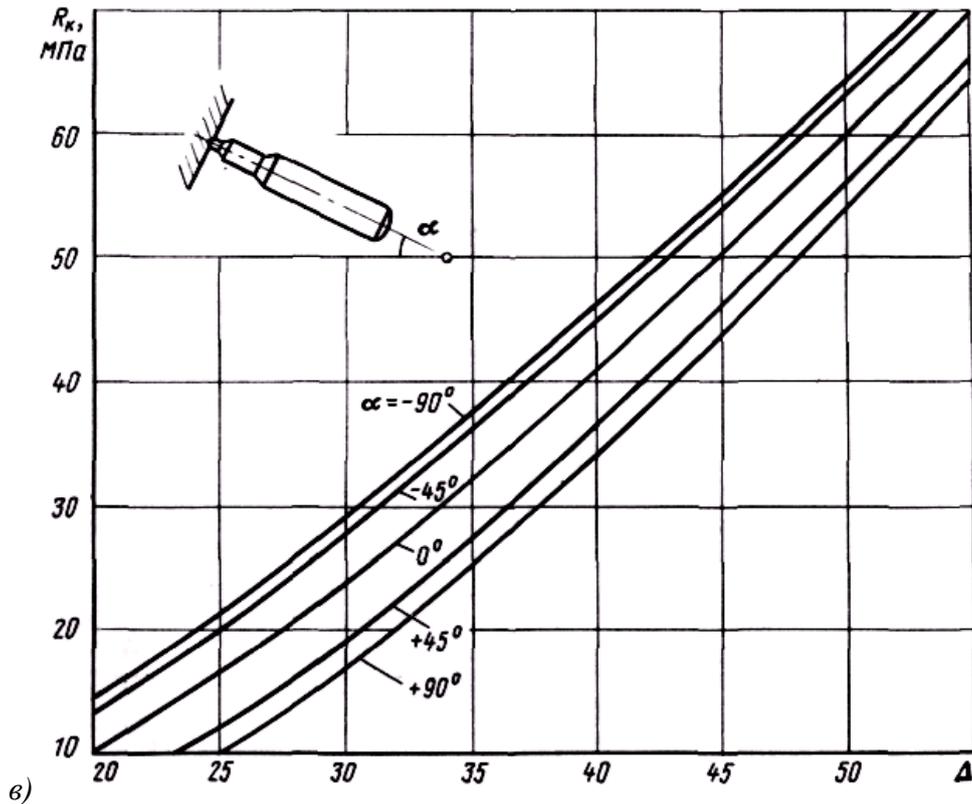


Рис. 9. Склерометр Шмидта: а) – продольный разрез; б) – общий вид; 1 – исследуемая конструкция; 2 – ударный стержень, 3 – колпачок, 4 – ударная пружина; 5 – окно со шкалой; 6 – движок со стержнем; 7 – направляющий стержень; 8 – направляющая шайба, 9 – нажимная пружина; 10 – крышка; 11 – стопорная кнопка; 12 – корпус; 13 – молот; 14 – крышка с наждачным камнем; 15 – футляр; 16 – прибор; в) – зависимость показаний склерометра Шмидта  $\Delta$  от кубиковой прочности бетона на сжатие

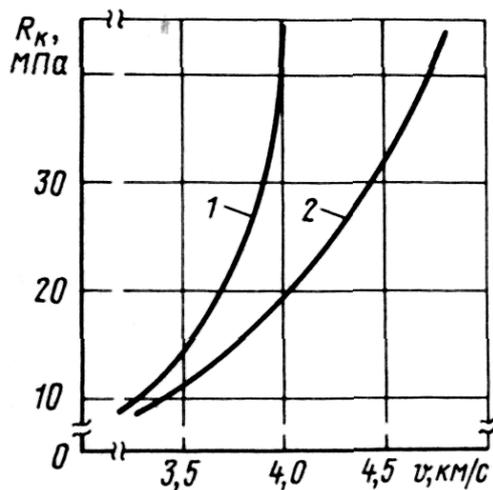
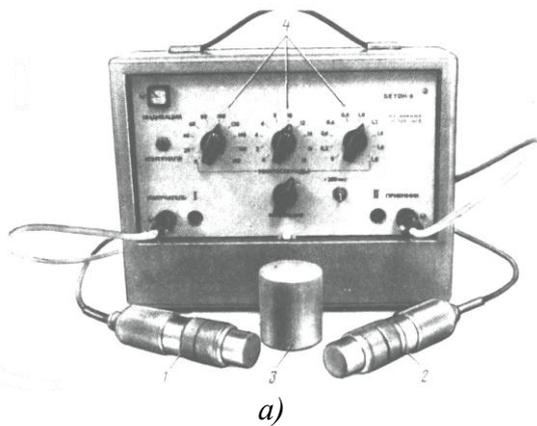
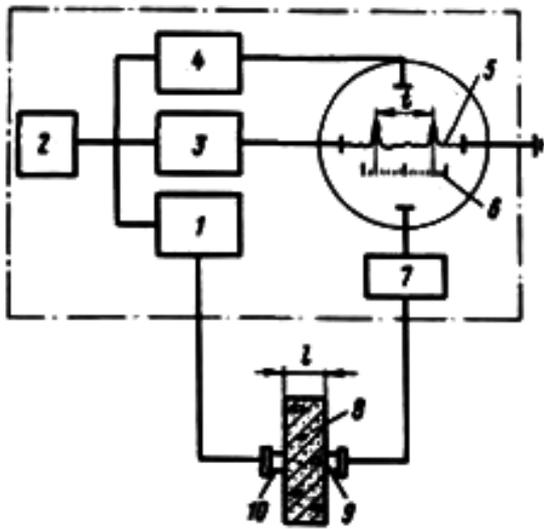


Рис. 10. Зависимость между скоростью ультразвука и прочностью бетона: 1 – заполнитель в бетоне – крупный песок; 2 – то же доломит



а)



б)

Рис. 11.

а) – Ультразвуковой прибор: «Бетон-5»: 1 – излучатель; 2 – приемник; 3 – эталон; 4 – шкалы измерения;  
 б) – блок-схема ультразвукового импульсного прибора: 1 – высоко-частотный генератор импульсов; 2 – задающий генератор; 3 – блок ждущей развертки; 4 – блок масштабных меток времени; 5 – осциллограмма; 6 – шкала времени; 7 – усилитель; 8 – испытуемый элемент; 9 – приемник; 8 – излучатель

Рассмотрим схему ультразвукового импульсного прибора (рис. 11, б). Импульсы тока, возбуждаемые высокочастотным генератором 1, периодически подаются на излучатель 10, в котором они преобразуются в ультразвуковые и посылаются в испытуемый элемент. Одновременно поступает электрический сигнал в блок ждущей

развертки 3, и происходит ее запуск. Пройдя через испытуемый элемент, ультразвуковые импульсы попадают в приемник 9, в котором снова преобразуются в электрические и поступают на усилитель 7, а с него – на электронно-лучевую трубку, вызывая вертикальное отклонение электронного луча.

Моменты посылки ультразвукового импульса в бетон и приема его на экране электроннолучевой трубки отмечаются «всплесками» на осциллограмме 5. Расстояние между ними в определенном масштабе соответствует времени  $t$  прохождения импульса через испытуемый элемент. На экране электроннолучевой трубки при помощи блока 4 наносится шкала времени 6, по которой определяется время  $t$ . По величине  $t$  и толщине исследуемого элемента устанавливается скорость прохождения ультразвука:  $v = l/t$ , а по ней – прочность бетона по тарировочным кривым. Современные ультразвуковые приборы (рис. 11, а) позволяют испытывать бетонные конструкции толщиной 0,1...12 м.

#### 4. Методы выявления скрытых дефектов и повреждений

Внутри элементов мостовых конструкций и их соединений могут быть дефекты или повреждения (трещины, раковины, пустоты, поры, инородные включения и др.), снижающие эксплуатационную надежность. Такие дефекты выявить визуально нельзя. Для обнаружения скрытых дефектов и повреждений широко применяют дефектоскопы, основанные на использовании акустических и магнитных методов, радиоактивных излучений и рентгеновских лучей.

*Акустический метод* основан на использовании упругих волн широкого

частотного диапазона. В зависимости от частоты упругие колебания делятся на инфразвуковые (до 20 Гц), звуковые (от 20 Гц до 20 кГц) и ультразвуковые (от 20 кГц и более). Из этих частот при контроле акустическими методами используют звуковой и ультразвуковой диапазоны. Упругие волны в ультразвуковом диапазоне излучаются в непрерывном или импульсном режиме. Использование ультразвука позволяет осуществлять неразрушающий контроль разных узлов и элементов конструкций, изготовленных из различных материалов. Работа дефектоскопа основана на частичном отражении и рассеянии ультразвуковых волн нарушениями сплошности (трещинами, расслоениями, пустотами и т. п.) или однородности строения материала исследуемой конструкции. Дефектоскоп посылает в контролируемое изделие ультразвуковые волны частотой от 0,5 до 25 МГц и регистрирует параметры волн, прошедших через конструкцию (сквозное прозвучивание) или отраженных от поверхностей, на которых акустические характеристики материала испытывают изменения (эхо-метод).

Для возбуждения упругих колебаний в различных материалах используют пьезоэлектрические или магнитострикционные преобразователи. Ультразвуковые волны вводятся искателем (пьезоэлектрическим преобразователем) в контролируемую конструкцию преимущественно контактным способом со смазкой.

Скрытые дефекты в металлических и железобетонных конструкциях чаще всего определяют эхо-методом с импульсным излучением. В простейшем эхodefектоскопе (рис. 12,а) реализуется свойство преломления, и отражения ультразвуковых волн от границ раздела двух различных сред. Если на пути ультразвукового сигнала окажется дефект (например, трещина, раковина, шлаковое включение), акустическое сопротивление которого отличается от обычного для данного материала, то произойдет преломление и отражение волны и на экране электронно-лучевой трубки появится дополнительный импульс. Определив время, скорость и направление прохождения ультразвука, можно установить место дефекта. На рис. 12,б показан дефектоскоп ДУК-66ПМ, применяемый для обнаружения скрытых дефектов. Для оценки качества бетона его прозвучивают методом, рассмотренным в предыдущем разделе.

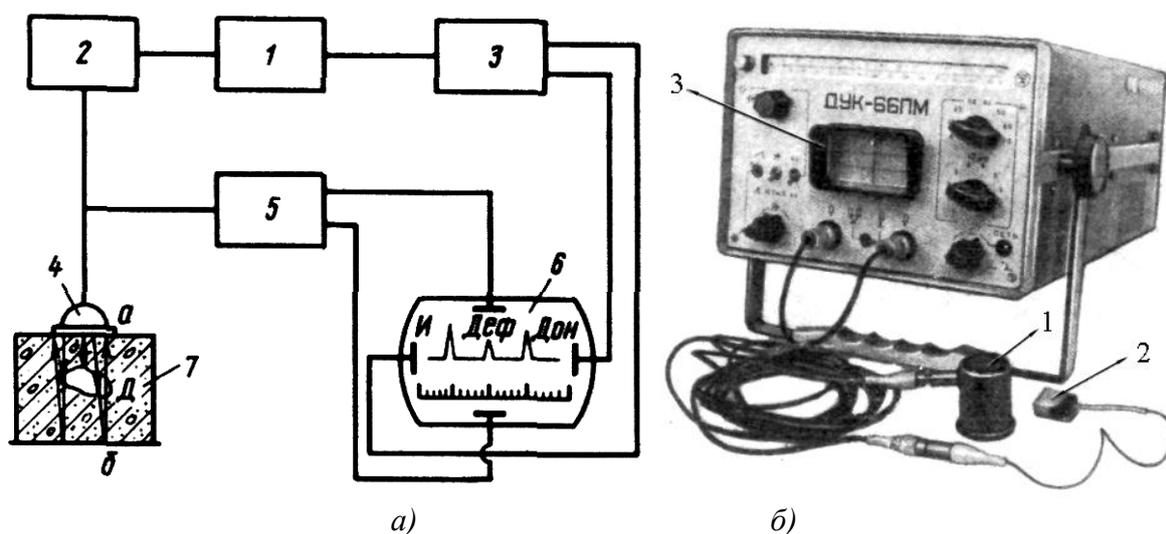


Рис. 12. а) – Блок-схема простейшего эхо-дефектоскопа: а – поверхность ввода ультразвука; б – донная поверхность, Д – дефект; И – изображение на экране ЭЛТ; Н – начальный зондирующий сигнал; Дон – донный эхосигнал; Дефо - эхосигнал от дефекта; 1 – хронизатор; 2 – генератор импульсов; 3 – генератор развертки; 4 – искатель; 5 – приемный тракт; 6 – индикатор (электроннолучевая трубка ЭЛТ); 7 –

контролируемая конструкция; б) – ультразвуковой дефектоскоп ДУК–66ПМ: 1 – излучатель; 2 – искательная головка; 3 – экран визуального наблюдения

По резкому изменению скорости распространения ультразвука в отдельных частях конструкции можно установить снижение плотности бетона, наличие пустот, трещин и т. д.

Наличие дефектов и повреждений в сварных швах устанавливаются при помощи призматических щупов–излучателей с углами наклона ультразвуковой волны 30...60° (рис. 13). Щуп перемещают по волнообразной траектории вдоль шва. При обнаружении дефекта на осциллограмме электроннолучевой трубки появляется импульс («всплеск»). Одновременно подается звуковой или световой сигнал. Для определения границ дефекта щуп перемещают в разные стороны от положения, при котором зарегистрирован импульс, до тех пор, пока его амплитуда  $A$  на экране не уменьшится примерно вдвое. Это положение щупа соответствует границе дефекта. Зная координаты положения щупа, наклона ультразвукового луча, можно определить границы повреждения. Импульсный ультразвуковой метод удобно использовать при длительных наблюдениях за изменением структуры и прочности бетона.

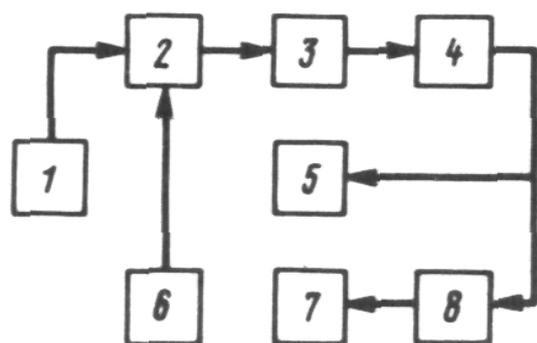


Рис. 13.

Схема определения дефектов в шве:

1 – щуп-излучатель; 2 – траектория движения щупа-излучателя; 3 – характер импульсов на экране электроннолучевой трубки при указанных положениях щупа-излучателя. Справа – блок-схема акустической эмиссионной установки: 1 – искательная головка; 2 – предусилитель; 3 – электронный фильтр; 4 – усилитель; 5 – регулирующий блок, 6 – источник питания; 7 – устройство записи на ленту; 8 – селектор

Метод акустической эмиссии используется для обнаружения повреждений в мостовых конструкциях, получения информации о процессах, протекающих внутри материала, для неразрушающего контроля. Метод основан на регистрации акустических волн, возникающих в твердых телах при пластической деформации и появлении микротрещин. Фиксируя волны эмиссии, можно обнаружить опасные дефекты и прогнозировать работоспособность отдельных элементов конструкций. Сущность метода заключается в следующем. На поверхность исследуемой конструкции устанавливают одну или несколько искательных головок, чувствительных к сдвиговым деформациям или поверхностным волнам, работающим на частоте 1...3 МГц. В процессе работы или испытания в конструкции могут развиваться значительные деформации и появляться трещины. Их появление сопровождается вспышками эмиссии волн напряжений, носящими импульсный характер. Эти волны воспринимаются искательной головкой и по ним определяется дефект. Рассмотрим схему эмиссионной установки (рис. 13 слева). Вспышки эмиссии, достигшие искательной головки 1, преобразуются в электрические сигналы и подаются на предусилитель 2, где происходит усиление сигнала, затем они проходят через электронный фильтр 3, в

котором удаляется низкочастотная информация, и поступают в усилитель 4, после этого – по двум каналам в регулирующий блок 5 и на дискриминатор и селектор 8. С селектора они попадают в устройство 7 для записи на магнитной ленте. Прибор питается от источника 6.

Магнитными методами обнаруживают дефекты и повреждения в ферромагнитных материалах, определяют толщину защитного слоя и расположение арматуры в железобетонных конструкциях, толщину антикоррозийных покрытий стальных конструкций и др. Обнаружение дефектов и повреждений в виде трещин, пор, инородных включений в элементах из ферро-магнитных материалов основано на выявлении образующихся в их зоне полей рассеивания магнитного потока. Для выявления полей рассеивания, а, следовательно, и дефектов в простейшем случае используют магнитный порошок или его смеси с маловязкой жидкостью (например, керосином), нанося их на поверхность исследуемого элемента. При действии магнитного поля эти частицы образуют своеобразный узор в зоне расположения дефекта. Более надежные результаты получают при наложении на исследуемые участки магнитной пленки.

После намагничивания расшифровывают зарегистрированные на пленке поля рассеивания. Другой, более эффективный метод фиксации полей рассеивания основан на использовании магнитных щелевых головок магнитофонного типа, устанавливаемых в плоскости П-образного электромагнита. Магнитная головка представляет собой кольцевой разомкнутый сердечник с щелью шириной 7...20 мкм с обмоткой. Основное магнитное поле создается П-образным магнитом. При установке такого устройства на поверхность элемента над дефектом возникает поле рассеивания, которое наводит э. д. с. в магнитной головке. Наведенное э. д. с. подается на регистрирующий прибор, по которому судят о дефекте в элементе.

Рассмотрим схему прибора индукционного типа (рис. 14) для определения положения арматуры в железобетоне, толщины защитного слоя и диаметра стержней. Индуктивный преобразователь 1 передвигается по поверхности исследуемой железобетонной конструкции или детали. Отдельно от него в корпусе прибора расположен аналогичный преобразователь 2 с ферромагнитным смещаемым элементом 3, предназначенным для изменения индуктивного сопротивления при балансировке схемы. По мере приближения преобразователя 1 к арматурному стержню разбаланс (зависит от толщины защитного слоя, диаметра стержня и ориентировки преобразователя по отношению к его направлению) будет уменьшаться.

Шкала гальванометра проградуирована в миллиметрах защитного слоя для арматурных стержней разного диаметра. Установив расположение стержней, передвигают преобразователь 1 вдоль контролируемого стержня до положения, соответствующего минимальному отсчету, следя за тем, чтобы преобразователь находился между пересечениями арматуры. Записав толщины защитного слоя по шкалам всех диаметров, повторяют отсчет, поместив между бетоном и преобразователем прокладку толщиной 10 мм из диамагнитного материала. Диаметр арматуры будет соответствовать той шкале, по которой разность отсчетов окажется равной 10 мм.

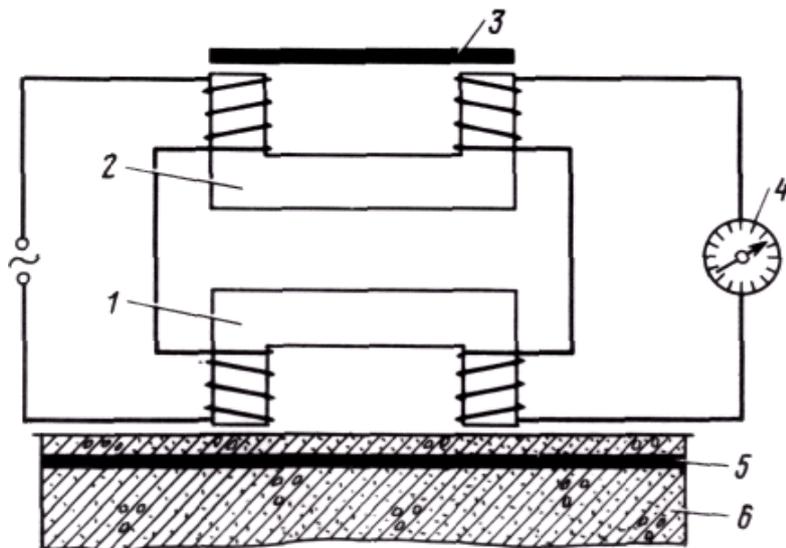


Рис. 14.  
 Индукционный прибор:  
 1 – выносной индуктивный преобразователь;  
 2 – преобразователь в корпусе прибора;  
 3 – стержень для регулирования индуктивного сопротивления;  
 4 – гальванометр;  
 5 – арматурный стержень;  
 6 – железобетонный элемент

**Рентгенографические и гаммаграфические методы** позволяют обнаруживать дефекты и повреждения в металлах, бетоне и железобетоне, полимерах и других материалах. Этими методами можно определять положение арматуры, ее размеры в железобетонных и других армированных конструкциях. Эти методы основаны на использовании рентгеновских,  $\gamma$  – лучей или других для фотографирования скрытых дефектов и повреждений. Исследуемый элемент просвечивают лучами при помощи специальных установок (рис. 15). Проникающая способность этих лучей зависит от плотности материала, толщины элемента и др. В зонах с порами, раковинами, трещинами проникающая способность лучей будет выше. В зависимости от интенсивности прошедшего излучения на фотопленке получают участки с различной затемненностью. По наличию затемненных мест и степени затемнения судят о характере и размерах дефектов и повреждений.

Для регистрации излучения применяют ксерорадиографические пластинки из металлических подложек, покрытых тонким слоем аморфного селена. В темноте селен способен воспринимать и удерживать электрический заряд, утечка которого пропорциональна интенсивности падающего луча. После экспонирования на поверхности пластинки остается часть заряда, интенсивность которого можно выявить напылением мелкого порошка, заряженного электрическим зарядом противоположного знака. По распределению этого порошка на пластинке определяют наличие дефектов и повреждений.

Источниками излучения могут служить рентгеновские трубки, бетатроны или радиоактивные изотопы. Рентгеновские лучи возникают в результате бомбардировки металлической мишени высокоскоростными электронами, ускоренными за счет разности потенциалов между катодом и мишенью.

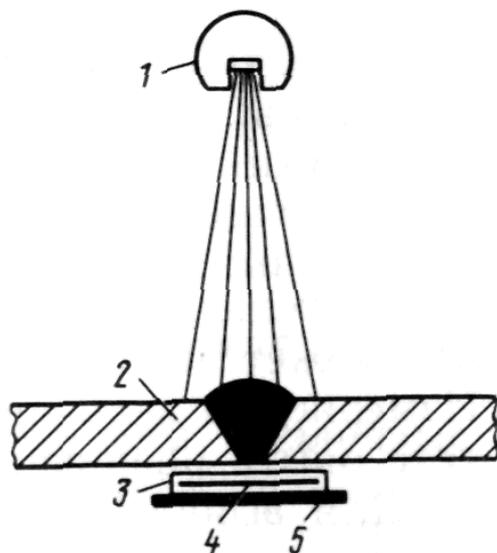


Рис. 15.  
 Схема просвечивания сварного  
 элемента: 1 – источник излучения; 2  
 – сварной элемент; 3 – кассета;  
 4 – фотопленка; 5 – защитная  
 свинцовая пластинка

В бетатронах в отличие от рентгеновских трубок электроны ускоряются под воздействием пульсирующего магнитного поля. Источники  $\gamma$  – лучей – радиоактивные изотопы, по сравнению с рентгеновскими установками более компактны, не требуют источников питания. При использовании  $\gamma$  – лучей нужно иметь надежную радиационную защиту. В качестве радиоактивных изотопов часто применяют кобальт–60 ( $\text{Co}^{60}$ ) с энергией лучей, равной 1,17...1,33 МэВ и цезий–137 ( $\text{Cs}^{137}$ ) с энергией 0,794 МэВ. Метод  $\gamma$  – излучений обладает меньшей чувствительностью, чем рентгенографический. При работе с источниками излучения нужно очень строго соблюдать правила техники безопасности.

*Обработка, оценка и анализ результатов статических и динамических испытаний.* Вероятностно-статистические методы обработки и оценки результатов. Результаты измерений при испытаниях материалов, конструкций и их элементов из-за влияния разнообразных причин (отклонений в аппаратуре, точности снятия отсчетов и др.) носят изменчивый, случайный характер. Случайный характер имеют и испытательные нагрузки. Поэтому любое взятое отдельно измерение не может быть истинным значением определяемой величины. Измеряемая величина является случайной, принимающей в результате опыта различные неизвестные заранее значения. Для выявления значений искомых величин используют вероятностно-статистические методы, основанные на следующем. Результаты измерений в каждом случае называются случайным событием. Оценкой возможности реализации случайного события служит его вероятность. Вероятность определяется отношением числа случаев, при которых повторяются эти события, к числу всех возможных при этом случаев. Оценивается вероятность положительным числом, не превышающим единицы.

Предположим, случайная величина  $X$  может принимать в процессе опыта дискретные значения  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . В результате каждого опыта величина  $X$  примет одно из этих значений. В серии опытов каждое событие может произойти с некоторой вероятностью  $P$ . Сумма вероятностей всех возможных значений случайной величины равна единице, т. е.:

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1.$$

Суммарная вероятность распределяется между отдельными значениями по определенному закону. Среди многих законов распределения случайной величины наиболее широко распространен нормальный закон. Ему хорошо подчиняются механические характеристики металла и других материалов, отклонения измерений различных величин и др. Распределение по нормальному закону (рис. 16,а) имеет симметричную колоколообразную форму с максимальной ординатой. Нормальный закон распределения характеризуется плотностью распределения вероятностей

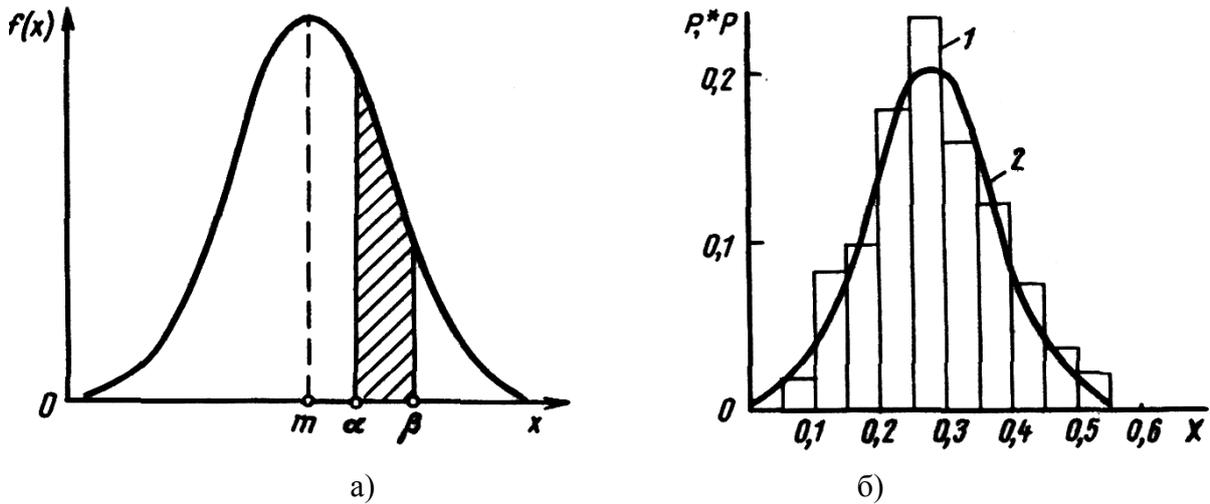


Рис. 16. а) – Распределение по нормальному закону; б) – оформление распределений: 1 – гистограмма; 2 – выравнивающая (теоретическая) кривая распределения

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$

где  $m = M[X]$  – математическое ожидание;  $\sigma$  – среднее квадратичное отклонение (стандарт);  $\sigma^2 = D[X]$  – дисперсия величины  $X$ ;  $e$  – основание натуральных логарифмов ( $e = 2,718$ ).

Величины  $m$  и  $\sigma^2$  называются численными параметрами и (числовыми характеристиками) случайной величины  $X$ . Чем больше стандарт, тем больше разброс случайной величины около ее среднего значения.

Вероятность того, что случайная величина  $X$ , подчиненная нормальному закону распределения, попадает на участок от  $\alpha$  до  $\beta$  (см. рис. 16,а), определяют по формуле

$$P(\alpha < X < \beta) = \Phi^*\left(\frac{\beta - m}{\sigma}\right) - \Phi^*\left(\frac{\alpha - m}{\sigma}\right). \quad (6)$$

здесь  $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int e^{-\frac{t^2}{2}} dt$  – табулированная функция.

Предположим, что в результате опыта получены различные значения случайной величины  $X$  (например, предела прочности стали). Совокупность этих значений

называется простой статистической совокупностью, или простым статистическим рядом, и обычно оформляется в виде таблицы. В первой колонке таблицы указывают номер опыта, а во второй – полученные значения случайной величины. При большом числе наблюдений статистический материал дополнительно обрабатывают – строят статистический ряд. Весь диапазон наблюдений случайной величины  $X$  разбивают на равные участки – разряды (10–20 разрядов) и подсчитывают число наблюдений  $n_i$ , попадающих в каждый  $i$ -й разряд. Частота, соответствующая данному разряду,  $p^* = n_i/n$ , (7) где  $n$  – общее число наблюдений.

Разряды в порядке возрастания  $X$  и соответствующие им частоты записывают в статистический ряд (в таблицу). Для наглядности статистический ряд представляют графически в виде гистограммы (рис. 16,б). Гистограмма соответствует теоретической плотности распределения вероятностей величины  $X$ . Дальнейшая обработка состоит в определении числовых характеристик статистического распределения, которые являются аналогом числовых характеристик случайной величины  $X$ . Так, математическому ожиданию соответствует среднее арифметическое всех полученных значений  $M^*[X]$ , а дисперсии – статистическая дисперсия  $D^*[X]$ . Величины  $M^*[X]$  и  $D^*[X]$  определяют по формулам:

$$m_x^* = M^*[X] = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad (8) \quad D_x^* = D^*[X] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2 \quad (9)$$

при большом числе наблюдений

$$(n > 25) \text{ и } D_x^* = D^*[X] = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x^*)^2 \quad (10)$$

при малом числе наблюдений ( $n < 25$ ).

В формулах (8) – (10)  $x_i$  – значение случайной величины, полученной в  $i$ -м опыте.

Величины  $m_x^*$  и  $D_x^*$  – несмещенные оценки соответственно математического ожидания и дисперсии. Точность и надежность этих величин при использовании их в качестве числовых характеристик исследуемой случайной величины оценивается по доверительным интервалам и доверительным вероятностям. Доверительный интервал показывает границы возможного ожидания численной характеристики случайной величины при заданной вероятности.

При обработке статистического материала важно подобрать теоретическую кривую распределения, отражающую основные закономерности данного статистического распределения. Эта задача – выравнивание статистических рядов – в значительной степени неопределенна. При ее решении часто исходят из физической сущности исследуемого явления, а иногда используют вид статистического распределения. Выбрав кривую распределения, определяют числовое значение параметров, при которых соответствие между теоретическим и статистическим распределением будет наилучшим. Обычно важнейшие числовые характеристики теоретического распределения принимают равными соответствующим числовым

характеристикам статистического распределения. Насколько надежно выбранное теоретическое распределение отражает основные закономерности статистического, проверяют по критерию согласия. Наиболее часто применяют критерии согласия, основанные на использовании  $\chi^2$  –распределения Пирсона или А. Н. Колмогорова. Методика определения и использования этих критериев излагается в курсах математической статистики.

При экспериментальных исследованиях нередко приходится выяснять наличие зависимости между двумя случайными величинами (например, между максимальным напряжением цикла и числом циклов до разрушения и др.). Если величины связаны между собой строго, то такая связь является функциональной. В теории вероятностей и математической статистике рассматривают общие виды зависимостей – вероятностные или статистические. Связь между случайными величинами, когда одной из них соответствуют несколько значений другой, варьирующих около среднего значения, называется корреляционной} Корреляционная связь характеризуется коэффициентом корреляции  $r_{xy}$  случайных величин  $X$  и  $Y$  :

$$r_{xy} = \frac{\frac{1}{n} \sum (x_i - m_x^*)(y_i - m_y^*)}{\sqrt{D_x^* D_y^*}}, \quad (11)$$

где  $x_i, y_i$  – значения случайных величин соответственно  $X$  и  $Y$  в  $i$  - м опыте;  $D_x^*, D_y^*$  – статистическая дисперсия случайных величин  $X$  и  $Y$ ,  $m_x^*, m_y^*$  – средние арифметические значения случайных величин  $X$  и  $Y$ . Коэффициент корреляции может иметь значения от  $+1$  до  $-1$ . Если коэффициент корреляции равен нулю или близок к нему, то исследуемые величины –некоррелируемые, т. е. не связаны определенной зависимостью. Наоборот, в случае приближения коэффициента корреляции к  $+1$  или к  $-1$  между ними существует тесная связь. Вычисления при статистической обработке лучше всего выполнять на ЭВМ.

## 5. Определение напряженного состояния и силовых факторов в элементах мостов

По измеренным деформациям определяют напряжения и силовые факторы, действующие в сечении элемента. Рассмотрим это на примере поперечного сечения исследуемого элемента, в котором измерены фибровые деформации в точках 1, 2, 3 и 4 (рис. 17). Напряжения  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$  определяют по измеренным относительным деформациям  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ . По геометрическим характеристикам сечения ( $F, I_x, I_y, x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2$ ) и зависимостям (согласно рис. 17) составляют систему уравнений:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 E = \sigma_1 &= \frac{N}{F} + \frac{M_x y_1}{I_x} - \frac{M_y x_1}{I_y}; \quad \varepsilon_2 E = \sigma_2 = \frac{N}{F} + \frac{M_x y_1}{I_x} - \frac{M_y x_2}{I_y}; \\ \varepsilon_3 E = \sigma_3 &= \frac{N}{F} + \frac{M_x y_2}{I_x} - \frac{M_y x_3}{I_y}; \quad \varepsilon_4 E = \sigma_4 = \frac{N}{F} + \frac{M_x y_2}{I_x} - \frac{M_y x_4}{I_y}; \end{aligned} \quad (12)$$

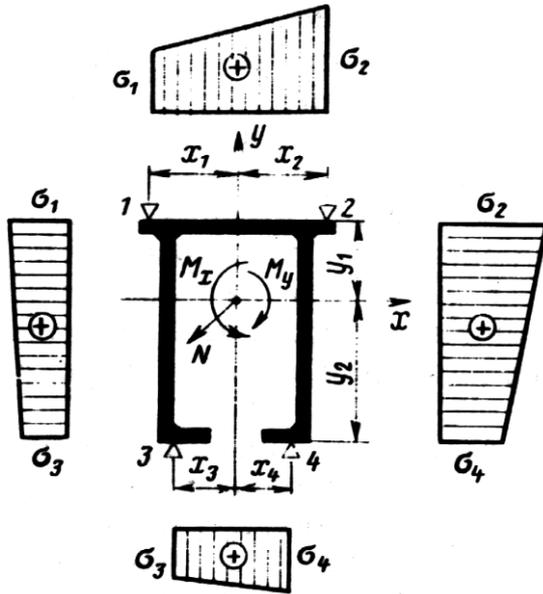


Рис. 17. Нормальные напряжения и силовые факторы в исследуемом сечении элемента

Решая эту систему, получим усилия  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ . Наличие в системе уравнений (12) четырех уравнений для определения трех неизвестных позволяет, кроме того, проверить точность произведенных измерений. Для этого одни и те же усилия определяют решением различных групп уравнений.

Например, решив группу уравнений 1, 2 и 3, получим величины  $N_1$ ,  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$ , а при решении группы уравнений 2, 3 и 4 –  $N_2$ ,  $M_{x2}$ ,  $M_{y2}$ . Разница в величинах  $N_1$ ,  $M_{x1}$ ,  $M_{y1}$  и  $N_2$ ,  $M_{x2}$ ,  $M_{y2}$  позволяет судить о погрешностях, связанных с точностью измерения деформаций и влиянием таких факторов, как местные искривления, концентрация напряжений в зонах измерений деформаций, а также неучет влияния других силовых факторов, например крутящего момента и др. Для оценки погрешностей нужно увеличивать число точек измерения деформаций в сечении по сравнению с числом действующих силовых факторов.

## 6. Определение динамических характеристик конструкций или отдельных ее элементов

Исходным экспериментальным материалом для определения динамических характеристик конструкции служат диаграммы в виде виброграмм (рис. 18,а), осциллограмм изменения напряжений в отдельных элементах при действии динамической нагрузки и прогибограмм (рис. 18,б). Одна из основных динамических характеристик – динамический коэффициент  $(1 + \mu)$ , равный отношению максимальной деформации (напряжения)  $\gamma_{\max}$  при динамическом воздействии нагрузки к максимальной деформации  $\gamma_{\text{ст}}$  при статическом воздействии той же нагрузки:

$$1 + \mu = \frac{\gamma_{\max}}{\gamma_{\text{ст}}} \quad (13)$$

Для получения динамического коэффициента нужно зафиксировать максимально возможную динамическую деформацию, которая соответствует критической скорости прохождения нагрузки. Эту скорость обычно устанавливают экспериментально: испытательную нагрузку по обследуемому пролетному строению пропускают с различными скоростями, одновременно фиксируя динамические деформации. На основании записей выявляют диаграмму с максимальной динамической деформацией, по которой определяют  $\gamma_{\max}$  и  $\gamma_{\text{ст}}$  (см. рис. 18,б). Для определения ординаты деформаций от статического воздействия нагрузки на диаграмме проводят среднюю линию  $L$ . Аналогично, по диаграммам изменения

напряжений определяется динамический коэффициент для различных элементов моста. На рис. 18,а показана также запись отсчетчика времени  $O$  и моментов входа нагрузки на пролетное строение и схода с него  $\Pi$ . К числу других важных динамических характеристик относятся амплитуда, частота и период колебаний.

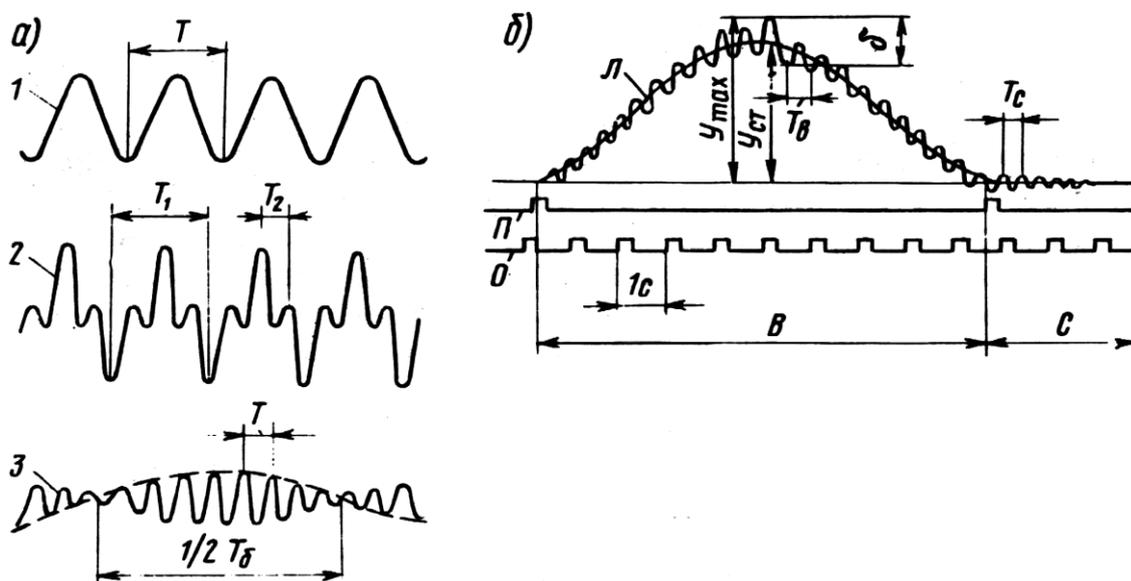


Рис. 18. Виброграммы вынужденных колебаний (а) и прогибограмма (б):  
 1 – однотонные колебания; 2 – двухтонные колебания; 3 – биения,  
 $T, T_1, T_2, T_б$  – периоды колебаний;  $B, C$  – участки вынужденных и собственных колебаний;  $T_в, T_с$  – периоды вынужденных и собственных колебаний

Для определения амплитуды колебаний измеряют расстояние между вершинами соседних полувольт (см. рис. 18,б), которое равно удвоенному значению амплитуды, умноженной на масштаб записи. При определении периода  $T$  и частоты колебаний  $\omega$  на участке диаграммы подсчитывают число колебаний  $n$  (число вершин нижних или верхних полувольт) за промежуток времени  $t$ , принимаемый по записи отсчетчика времени. По  $n$  и  $t$  вычисляют  $T$  и  $\omega$  по формулам:

$$T = \frac{t}{n}; \quad \omega = \frac{n}{t} = \frac{1}{T}; \quad (14)$$

Эти характеристики определяются для вынужденных и собственных колебаний. Для оценки скорости затухания собственных колебаний вычисляют логарифмический декремент затухания  $\psi$ , в известной мере характеризующий необратимые потери энергии колебаний:

$$\psi = \ln \frac{A_n}{A_{n+m}}, \quad (15)$$

где  $A_n$  и  $A_{n+1}$  – амплитуды  $n$ -го и  $n+1$ -го собственных колебаний системы.

Декремент затухания  $\psi$  экспериментально определяют по диаграмме собственных колебаний конструкции или ее элементов. Для этого можно использовать участки на диаграммах (см. рис. 18,б), записанные после схода испытательной нагрузки с конструкции) (рис. 19). При определении логарифмического декремента затухания с целью повышения точности измеряют амплитуды не соседних колебаний, а

расположенных в начале и конце диаграммы. Тогда формула (15) примет вид:

$$\psi = \frac{1}{m} \ln \frac{A_n}{A_{n+m}}, \quad (16)$$

где  $A_n$ ,  $A_{n+m}$  – амплитуды  $n$ -го и  $n + m$ -го собственных колебаний.

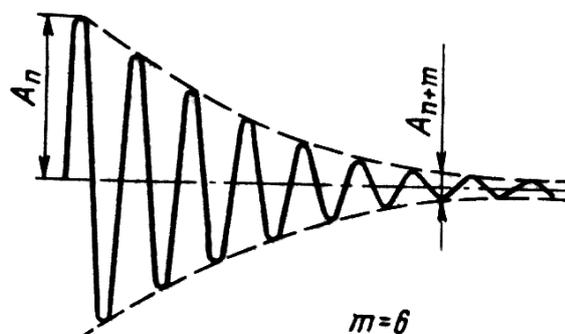


Рис. 19.  
Диаграмма  
собственных  
колебаний

**Анализ результатов испытаний.** Анализ данных испытаний позволяет решить ряд задач: оценить принятый метод расчета конструкций, качество их изготовления, выявить характер воздействия на сооружение определенного вида нагрузки, действительный характер напряженного состояния элементов или соединений, влияния дефектов и повреждений на прочность и надежность конструкции и др.

Для оценки точности метода расчета полученные по нему данные сравнивают с результатами испытаний. При определении расчетных данных желательно, чтобы расчетные нагрузки соответствовали испытательным (по массе и положению их на сооружении), а принятые в расчете геометрические размеры элементов и характеристики материала – действительным. Неучет отдельных факторов в расчетах приводит к тому, что расчетные данные отличаются от действительных. В расчетах различные приближения обычно принимают в сторону запаса. Поэтому расчетные данные, связанные с силовыми воздействиями (напряжения, деформации, различные перемещения), превышают действительные.

Разница между расчетными и экспериментальными данными учитывается введением конструктивной поправки:

$$\eta_k = \chi_3 / \chi_p, \quad (17)$$

где:  $\chi_3$  и  $\chi_p$  – экспериментальная и расчетная величины (данные).

Конструктивные поправки вводят при оценке действительной грузоподъемности конструкции. На основании анализа расчетных и экспериментальных данных разрабатываются предложения по дальнейшему совершенствованию расчетов.

Важными обобщающими характеристиками качества конструкции являются общие и особенно остаточные деформации и перемещения. Наличие остаточных прогибов пролетного строения – признак появления неупругих деформаций в отдельных его элементах и узлах. Например, в клепаных пролетных строениях остаточные прогибы могут быть вызваны сдвигами в заклепочных соединениях, в сварных – релаксацией остаточных напряжений, в деревянных – неплотностями и смятием во врубках. В каждом конкретном случае нужно установить причины остаточных деформаций и оценить их влияние на прочность и долговечность конструкции.

При исследовании эксплуатируемых мостов часто приходится выяснять причины возникновения и развития различных повреждений. Для этого проводят комплексные испытания с целью выявления роли различных факторов в образовании и развитии повреждений. В этом случае анализ результатов испытаний носит комплексный характер: выявляют параметры каждого фактора, взаимодействие различных факторов и их роль в образовании повреждения. Например, при определении причин усталостных разрушений анализируют напряженное состояние в зоне зарождения усталостной трещины и характер его изменения, результаты испытаний материала, интенсивность движения поездов, их виды, режимы нагруженности и др.

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ И ДАВЛЕНИЙ В ГРУНТАХ

##### 1. Измерение напряжений в грунтах

Для исследования грунтов в основаниях необходимо определять *напряжения, деформации, паровое давление, физико-механические и фильтрационные характеристики* грунта в основаниях сооружений в зависимости от внешних воздействий на сооружение. **Напряженное состояние грунта** определяется совокупностью контактных взаимодействий между зернами скелета грунта, внутренних напряжений в зернах скелета и давлением воды в порах грунта. Понятие напряженного состояния в грунте относится к некоторой конечной, но малой зоне. Если в этой зоне известны любые шесть независимых компонентов тензора напряженного состояния (например, шесть значений нормальных напряжений на шести различно ориентированных площадках), то напряженное состояние в зоне считается полностью определенным. Многообразие факторов, определяющих поведение грунтов под воздействием нагрузки, зачастую затрудняет создание достоверной аналитической модели их напряженного состояния. *Действительную картину напряженного состояния* может вскрыть лишь метрологически обеспеченный эксперимент, позволяющий проводить длительные статические или динамические испытания грунта и изучение явлений на контакте сооружения или конструкции с грунтом.

Напряжения в грунте измеряют путем помещения в заданную зону искусственного тела – датчика нормальных напряжений, деформации или изменение объема которого могут быть преобразованы в регистрируемый (чаще всего электрический) сигнал. Датчик должен иметь размеры, позволяющие усреднять все факторы, определяющие неоднородность напряжений в рассматриваемой зоне. Идеальный датчик должен обладать деформативными характеристиками, схожими с деформативными характеристиками грунта, чтобы снизить его влияние как неоднородного включения. Деформативные характеристики грунта также как и его напряженное состояние зависят от ряда факторов, из которых влажность, плотность, история нагружения и характер напряженного состояния являются определяющими. Датчик напряжений в грунте, если его механические характеристики отличаются от характеристик среды, является концентратором напряжений в прилегающей к нему зоне, что является причиной его погрешностей. Если необходимо определить

пространственную картину напряженно-деформированного состояния грунта, то в нем располагают несколько датчиков, нормали к которым ориентированы в разных направлениях. Возможно расположение датчиков по одной оси или их пространственная ориентация.

При изучении работы ответственных сооружений создается проект размещения измерительной аппаратуры с учетом трасс прокладки линий измерительной цепи, коммутаторов, мест расположения регистрирующей аппаратуры. Проект определяет последовательность проведения всех работ и является частью проекта сооружения. Для получения достоверных результатов необходимо, чтобы способы укладки и уплотнения грунта в измерительной зоне и в прилегающих к ней зонах не отличались. Датчики должны устанавливаться одновременно с укладкой грунта в контролируемую зону. В местах установки датчиков следует отобрать пробы грунта с тем, чтобы определить его физико-механические характеристики. Поскольку добиться полного соответствия деформативности датчика и грунта не удастся, выбор параметров измерительных преобразователей (датчиков) должен обеспечить требуемую точность измерения напряжений в грунте.

**Типы датчиков напряжений в грунте.** Экспериментально доказано, что в условиях одноосной деформации датчик должен обладать наибольшей жесткостью и наименьшей толщиной. На рис. 20. приведены наиболее часто применяемые схемы датчиков напряжений в грунтах. Во всех конструкциях внутренняя полость датчика может быть заполнена жидкостью, изменение давления в которой преобразовывается в электрический сигнал при помощи упругого элемента с наклеенными тензорезисторами. Датчики могут выполняться в виде сплошных шайб из пьезокристаллов или из магнитострикционных материалов. При одноосном напряженном состоянии, если ось датчика совпадает с направлением главного напряжения, ошибка результатов не превышает 10...15%. При наличии напряжений, действующих в плоскости датчика, обладающего большой жесткостью, искажения выходного сигнала могут достигать 100%. Для тонкого эластичного датчика (тонкая полость, заполненная жидкостью) эти искажения не превышают 15%. При изменении угла между направлениями нормали к рабочей поверхности жесткого датчика и осью максимального главного напряжения выходной сигнал также претерпевает искажения в пределах 20...25%.

Исследования влияния двух главных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$  действующих в плоскости рабочей поверхности датчика, измерение третьего главного напряжения, действующего по нормали к поверхности датчика, с учетом влияния режима нагружения позволяет установить картину взаимодействия жесткого датчика и грунта. Концентрация напряжений в грунте для **жестких дисковидных датчиков** при наличии значительных деформаций в грунте может изменяться в значительном диапазоне (в песке – плюс 70...100% и минус 30...50%) и зависит от режима нагружения. Повышенную концентрацию напряжений вызывают жесткие грунтовые ядра, возникающие за счет сил трения грунта на поверхности датчика.

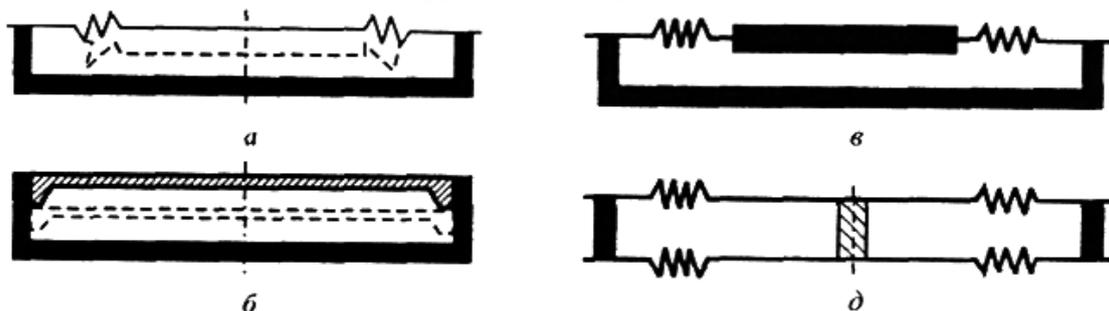


Рис. 20. Конструкции датчиков напряжений в грунтах: *а* – с гибкой мембраной, *б* – мембранный с жесткой шайбой, *в* – поршневой, *г* – типа «грибок»

**Эластичный датчик напряжений в грунте.** Датчик в грунте обладает минимальной сжимаемостью и толщиной, достаточной площадью, позволяющей усреднять напряжения в заданной области. Эластичный датчик представляет собой резиновый тонкий диск, пронизанный сообщающимися полостями, заполненными малосжимаемой жидкостью. Конструкция эластичного датчика (рис. 21) представляет собой прямоугольную тонкую трубку, уложенную двойной спиралью, или два диска, соединенные по контуру во множестве точек по поверхности. Объем жидкости составляет 6...10% объема датчика, а площадь поперечного сечения по жидкости 75...80% от площади датчика. Внутренняя полость соединена со струнным измерителем давления. Напряжения, возникающие в грунте, создают в рабочей жидкости датчика давление, которое измеряется струнным преобразователем. Колебания струны создаются электромагнитом.

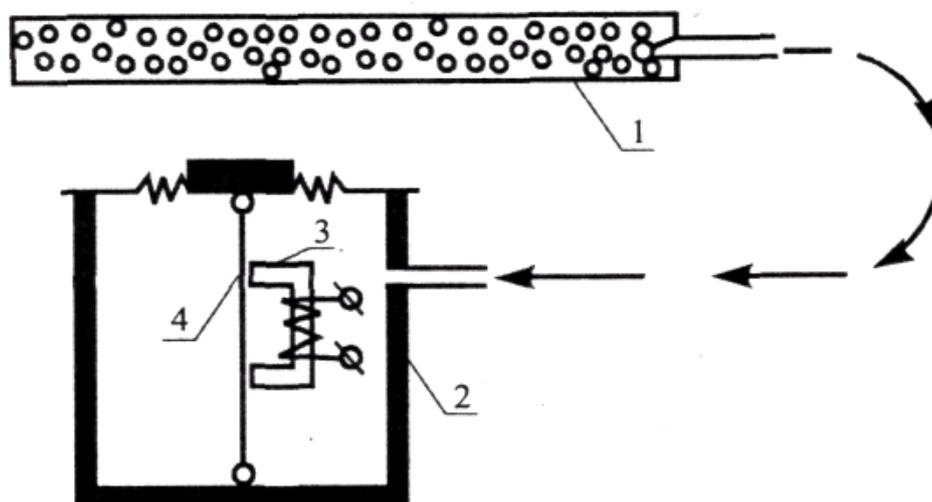


Рис. 21. Эластичный датчик напряжений в грунте: 1 – поверхность датчика; 2 – струнный измеритель давления; 3 – электромагнит; 4 – струнный преобразователь

Теоретические и экспериментальные исследования показали, что при малой толщине диска в однородном поле напряжений погрешность измерения нормальных напряжений не превышает  $\pm 15\%$ . На рис. 22 представлена кривая 1 погрешности измерения  $\sigma_d$  нормальных к плоскости датчика напряжений в зависимости от отношения значений главных напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_z$ , действующих в плоскости датчика. Кривая 2 дает аналогичную зависимость для жесткого датчика при сходных режимах загрузки. Максимальная погрешность для эластичного датчика составляет 15%. Для получения достоверных данных о напряжениях в грунтах необходимо проводить метрологические испытания датчиков напряжения на специальных испытательных установках. В этих установках воспроизводят гидравлическим или пневматическим способом заданные давления на рабочую поверхность датчика. Чувствительность датчиков напряжения к температуре определяют в термостатах, оснащенных термометрами.

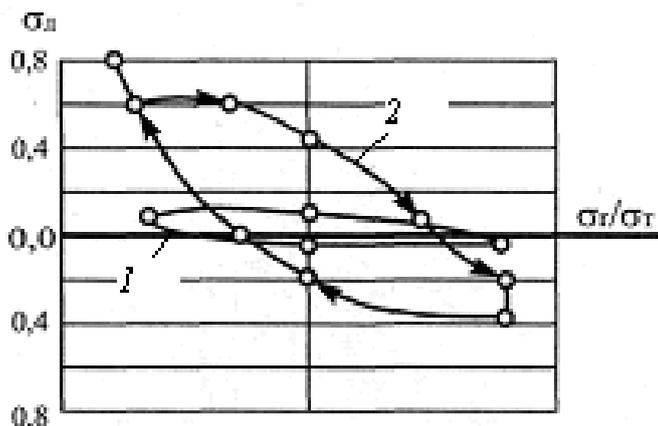


Рис. 22.  
Погрешность эластичного и жесткого датчиков напряжений в грунтах

**Струнные жесткие датчики.** Для изучения взаимодействия датчика и грунта разработан ряд устройств. Все схемы должны обеспечивать создание на границах с грунтом однородного напряженного состояния. Для измерения напряжений на контакте сооружения с грунтом применяют струнные жесткие датчики (рис. 23) с деформативностью, близкой к деформативности бетона. Давление грунта передается с контактной площадки внешней мембраны через гидравлическую полость на рабочую мембрану. Струна крепится к мембране нижним струнодержателем и к защитному кожуху верхним струнодержателем. Колебания струны возбуждаются электромагнитом. Кожух имеет заливное отверстие и резьбу для установки датчика в сооружение. Выходной сигнал измеряется частотомером. Датчики устанавливают в жестко забетонированные в конструкцию закладные гнезда или обоймы так, чтобы рабочая поверхность датчика совпадала с поверхностью конструкции. При изучении взаимодействия монолитных фундаментов с грунтом обоймы предварительно бетонируют в небольших блоках, которые после установки в них датчиков располагают в нужных зонах. Чтобы уменьшить влияние напряжений, возникающих в бетоне при твердении, боковую поверхность датчика защищают материалом с низким модулем упругости.

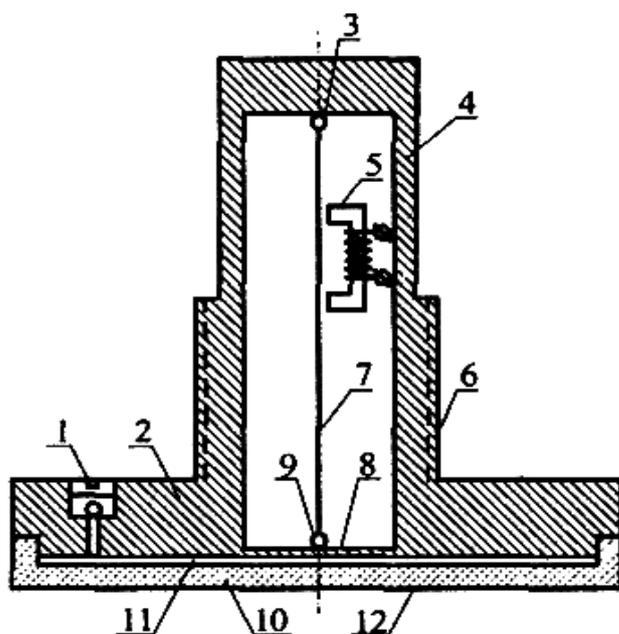


Рис. 23.  
Схема датчика напряжений:  
1 – заливное отверстие;  
2 – кожух;  
3, 9 – струнодержатели;  
4 – защитный кожух;  
5 – электромагнит; 6 – резьба; 7 – струна; 8 – мембрана;  
10 – внешняя мембрана;  
11 – гидравлическая полость; 12 – контактная площадка

В некоторых конструкциях датчиков применяют тензорезисторные

преобразователи, наклеиваемые на упругий элемент. Малогабаритные датчики с тензорезисторными преобразователями находят применение в модельных исследованиях при статических и динамических испытаниях.

**Комбинированный датчик.** Для измерения нормальных и касательных напряжений используется комбинированный датчик, схема которого приведена на рис. 24. При воздействии давления грунта  $N$  по нормали к рабочей диафрагме она деформируется и тензорезистор  $TR$ , наклеенный в центре внутренней поверхности диафрагмы, преобразует деформацию в электрический сигнал, пропорциональный нормальному давлению грунта. Для компенсации температурных воздействий в полости прибора на поверхность пластины, не подвергающуюся силовым воздействиям, наклеен компенсационный тензорезистор  $TR_K$ .

При появлении сдвиговых усилий  $Q$ , действующих в горизонтальном и вертикальном направлениях, силы трения на поверхности диафрагмы деформируют упругий элемент, жестко закрепленный в корпусе прибора. При этом тензорезисторы  $TR_1$  и  $TR_2$  воспринимают вертикальное касательное усилие, а тензорезисторы  $TR_3$  и  $TR_4$  – горизонтальное усилие. Диск диафрагмы, жестко закрепленный на свободном конце упругого элемента, за счет зазора имеет возможность перемещаться относительно корпуса.

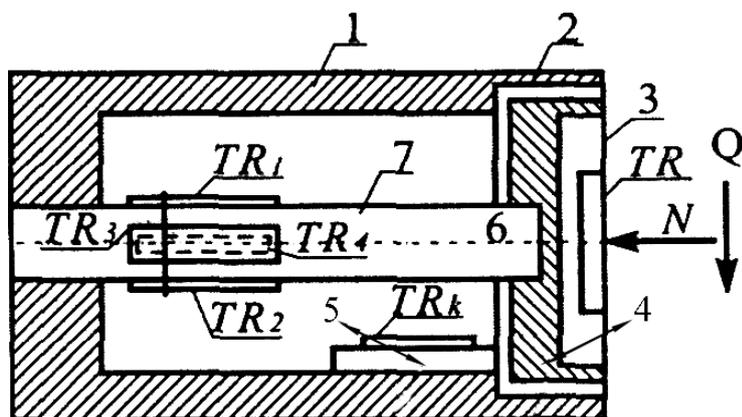


Рис. 24. Схема датчика для измерения нормальных и касательных напряжений:  
 1 – корпус; 2 – зазор;  
 3 – рабочая диафрагма;  
 4 – диафрагмы; 5 – пластина;  
 6 – свободный конец упругого элемента;  
 7 – упругий элемент

**Прибор для измерения напряжений в грунтах.** В приборе, схема которого изображена на рис. 25, нормальное  $P$  и поперечное  $Q$  усилия приложены к рабочей поверхности чувствительного элемента. Действие эксцентрично приложенной нормальной силы деформирует упругие элементы, на внутреннюю поверхность которых наклеены тензорезисторы  $TR_1$  и  $TR_2$ . Касательные усилия вызывают изгиб упругих тонких элементов, на которых установлены тензорезисторы  $TR_3$  и ТКд. Такая система позволяет определять эксцентриситет  $e$ , а также значения  $P$ ,  $Q_y$  и  $Q_z$ .

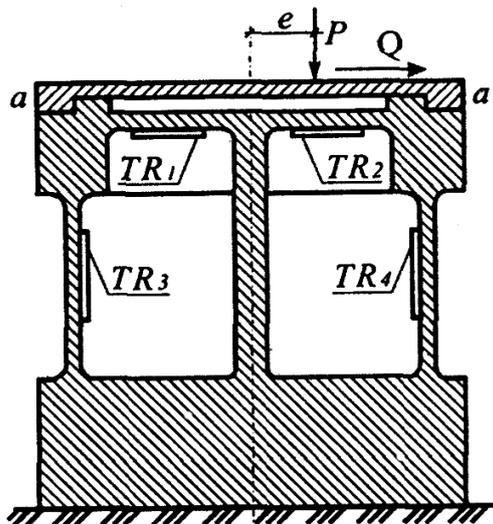


Рис. 25.  
Схема прибора для измерения нормальных и касательных напряжений в грунтах

**Датчик для измерения активного давления.** Датчик предназначен для измерения активного давления и его приращения в грунтовом основании при проведении полевых, лабораторных экспериментальных исследований и эксплуатации оснований и фундаментов зданий и сооружений (рис. 26).

*Технические характеристики датчика*

1. Диапазон измеряемых давлений, МПа	0...0.3
2. Чувствительность, МПа	0,0010
3. Модуль упругости, МПа	80...100
4. Коэффициент тензочувствительности	> 100
5. Геометрические размеры датчика, мм	
диаметр	24,0
высота	4,0
6. Диапазон рабочей температуры, С°	-20...+40

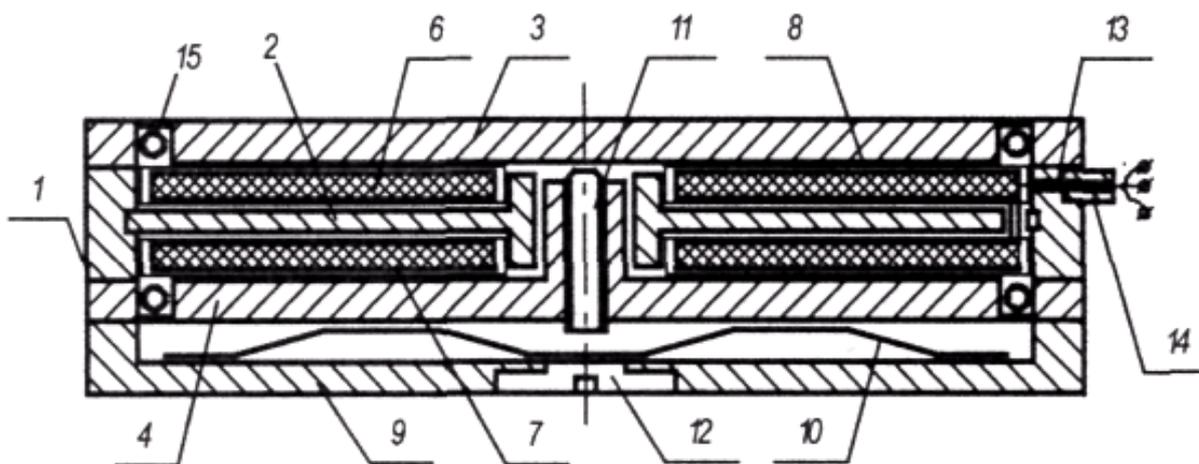


Рис. 26. Датчик для измерения давления в грунте: 1 – корпус; 2 – жесткая перегородка; 3 – рабочий штамп; 4 – вспомогательный штамп; 5 – верхний пьезорезистор; 6 – нижний пьезорезистор; 7 – токосъемные обкладки; 8 – изолирующие прокладки; 9 – нижняя крышка; 10 – плоская пружина; 11 – микровинт; 12 – заглушка; 13 – сальник; 14 – уплотнительный элемент; 15 – наполнитель

Конструкция датчика позволяет без применения специальных дорогостоящих материалов, прецизионной технологии изготовления и дорогостоящих электронных усилителей добиться высокой чувствительности при изменении давления, достаточной точности и эксплуатационной надежности в случае проведения обязательной тарировки рассматриваемых датчиков перед каждым испытанием в условиях, соответствующих запланированному эксперименту. Датчик может иметь размеры соизмеримые с рабочей средой, в частности с зёрнами песчаного грунта, что также может позволить планировать и выполнять эксперименты не только на макро-, но и на микроуровне, который в свою очередь даст возможность принципиально по новому изучить работу грунтового основания под различными зданиями и сооружениями.

## 2. Измерение порового давления в грунтах

Полное напряжение в грунте складывается из напряжений в скелете грунта, а также порового давления в жидкой и газообразной фазах. Значения этих величин зависят от относительного содержания твердой, жидкой и газообразной фаз в единице объема грунта. Измерение порового давления в грунте необходимо для оценки напряженного состояния. Основным инструментом для измерения порового давления являются пьезометрические датчики (пьезометры).

**Электрические пьезометры.** В лабораторных и натуральных дистанционных измерениях все большее применение находят *электрические пьезометры* (рис. 27), основанные на воздействии давления воды в рабочей полости пьезометра на диафрагму 3, перемещение которой пропорционально давлению; оно преобразуется при помощи тензометрического индуктивного или струнного преобразователей 4 и 5 в электрический сигнал. Малая инерционность позволяет использовать их при динамических испытаниях.

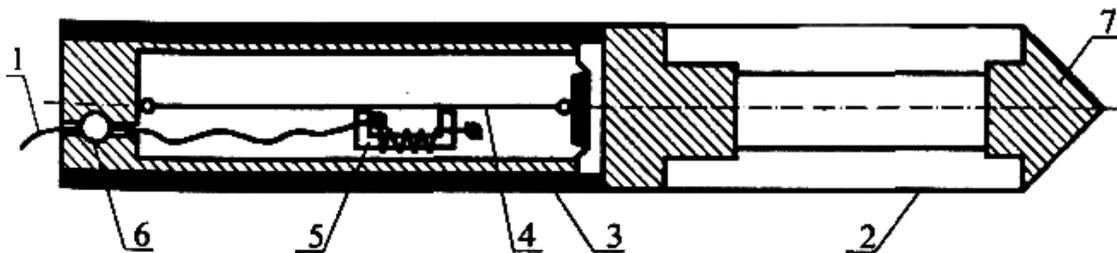


Рис. 27. Электрический струнный пьезометр: 1 – корпус; 2 – фильтр; 3 – диафрагма; 4 и 5 – преобразователи; 6 – изоляция; 7 – провод

**Пьезометры с набивкой.** На рис. 28,а представлен *пьезометр с пористой набивкой* 4. Обсадная труба 3, закрытая деревянной торцевой крышкой 5, опускается в скважину, а свободное пространство заполняется песчаной набивкой 4. Низ трубы перфорирован по длине  $l$ . Сверху имеются бетонная заливка 2 и крышка 1.

Пьезометр с *водонепроницаемой набивкой* (рис. 28,б) имеет аналогичную конструкцию, только ниже и выше перфорированного участка производится набивка водонепроницаемого грунта 6. Жидкость, проникающая через фильтр, создает в полости давление, соответствующее поровому, которое может быть измерено гидростатическим, пневматическим или электрическим преобразователями давления. Пьезометры должны измерять как положительное, так и отрицательное давление, вносить минимальное искажение в структуру и физико-механические свойства грунта в

исследуемой зоне, обладать достаточно быстрой реакцией на изменение порового давления, давать стабильные показания. Основные погрешности измерения порового давления обусловлены инерционностью измерительной схемы. Часто встречающимся источником, приводящим к ошибке измерения порового давления, является накопление воздушных пузырьков в зоне фильтра пьезометра или в подводящих трубках. Предусматривается специальная система воздухоудаления, зачастую достаточно сложная.

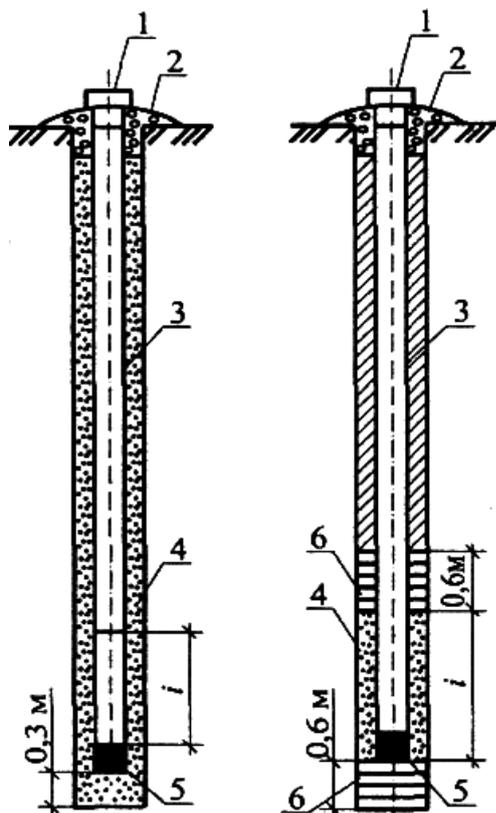


Рис. 28.

Схемы пьезометров с набивкой: 1 – крышка; 2 – заливка; 3 – осадная труба; 4 – песчаная набивка; 5 – деревянная торцевая крышка; 6 – набивка из водонепроницаемого грунта

При измерении порового давления должны быть исключены утечки из системы и влияние температуры (особенно зимой). Кроме того, необходимо обеспечить чистоту фильтров, соответствующий подбор их коэффициентов фильтрации и отсутствие посторонних включений в рабочей жидкости пьезометров. Пьезометры с набивкой и электрические пьезометры малоинерционны, поэтому позволяют проводить динамические измерения.

### 3. Метод индикаторов

Метод индикаторов предназначен для исследования фильтрации в гидротехнических сооружениях и грунтах. Для изучения движения фильтрационных потоков эффективным является **метод радиоактивных индикаторов** – меченых атомов. Метод заключается в определении основных закономерностей движения фильтрационного потока по движению индикатора – радиоактивного химического соединения, введенного в движущийся поток. Радиоактивный индикатор и его концентрация в фильтрационном потоке обнаруживаются по радиоактивному излучению при помощи радиоизотопных измерительных устройств. Радиоактивные индикаторы имеют ряд преимуществ перед такими индикаторами, как соли или красители, так как они обладают:

- способностью при чрезвычайно малых массовых концентрациях индикатора быть обнаруживаемыми в фильтрационном потоке, благодаря чему раствор индикатора не меняет своей плотности;

- легкостью обнаружения и измерения концентрации непосредственно в потоке благодаря наличию проникающего радиоактивного излучения; большим разнообразием радиоактивных соединений с различными физико-химическими свойствами;

– большим количеством короткоживущих радиоактивных изотопов, распадающихся через малые промежутки времени.

Преимущества метода радиоактивных индикаторов проявляются при изучении движения окрашенных, сильно минерализованных потоков, передвигающихся с большими скоростями при неоднородном строении пласта, т. е. тогда, когда применение других методов результата не дает. Оказывается возможным установить направление фильтрационного потока, пути фильтрации, скорость фильтрации и среднюю скорость движения воды в порах грунта, расход воды и коэффициент фильтрации. Параметры фильтрационного потока могут быть определены в береговых сопряжениях, в основании и в самом теле гидротехнических сооружений. При помощи индикаторов можно оценить режим работы дренажных систем и систем водопонижения, установить наличие сосредоточенной фильтрации в железобетонных элементах сооружений, искусственных противофильтрационных завесах, экранах и шпунтовых стенках. Для исследований используется либо куст скважин, либо одна скважина (рис. 29).

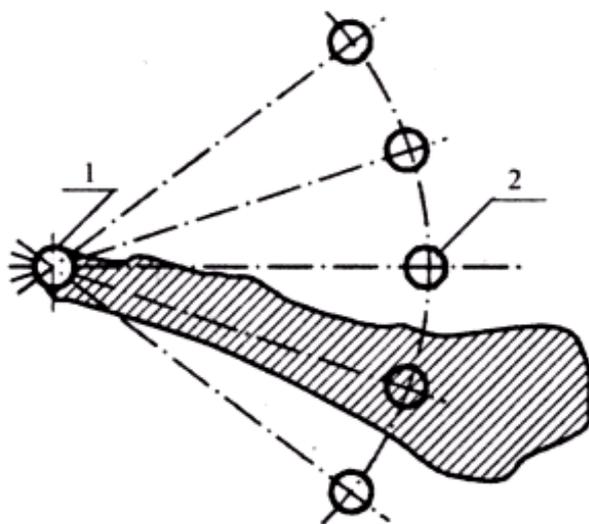


Рис. 29.  
Схема расположения скважин:  
1 – пусковая скважина; 2 –  
наблюдательные скважины

В пусковую скважину погружается индикатор при помощи специального устройства, взрывающего ампулу с индикатором и обеспечивающего мгновенное распространение радиоактивного вещества в рабочей полости скважины. Затем в пусковую или наблюдательные скважины опускают детектор, измеряющий изменение концентрации радиоактивного вещества в различных точках скважины по высоте, что позволяет установить скорости фильтрации в разных частях основания или сооружения и выявить зону распространения вещества. Концентрация радиоактивного индикатора и ее изменение определяются по изменению интенсивности радиоактивного излучения в скважине в отобранной пробе воды (количества импульсов  $N$ , зарегистрированных в единицу времени). Для определения направления потока ведется наблюдение за изменением концентрации индикатора в наблюдательных скважинах. Сложные задачи по определению путей сосредоточенной фильтрации могут решаться, если производить запуск в нескольких пусковых скважинах радиоактивных индикаторов, отличающихся видом или энергией излучения. В этом случае концентрация различных индикаторов в наблюдательных скважинах определяется раздельно для каждого индикатора.

Скорость движения воды в порах грунта определяется по наблюдательным скважинам. Значение действительной *скорости движения потока* определяется по формуле:

$$v = l/t_p, \quad (1)$$

где:  $l$  – расстояние от точки запуска до места обнаружения;  $t_p$  – расчетное время движения индикатора.

Для определения величины  $t_p$  строится кривая изменения концентрации индикатора в наблюдательной скважине по времени. В качестве точки отсчета принимают время, соответствующее максимуму интенсивности концентрации индикатора в пусковой скважине. **Значение скорости фильтрации  $V$**  определяется по формуле:

$$V = 0,785 \xi d / k_d, \quad (2)$$

где:  $\xi = (l/t) \ln(N_t / N_0)$  – коэффициент интенсивности разбавления индикатора;  $t$  – время, в течение которого происходит изменение концентрации индикатора от начального значения  $N_0$  до  $N_t$ ;  $N_0$  и  $N_t$  – интенсивности счета импульсов, пропорциональные концентрации индикатора;  $D$  – диаметр пусковой скважины;  $K_d$  – коэффициент дренирующего влияния скважины; для новых, мало эксплуатировавшихся фильтров  $k_d$  принимают равным 2, а для старых фильтров  $k_d$  принимают равным 1.

**Коэффициент фильтрации  $K$**  для способа пусковых скважин определяется по формуле:

$$K = V/l, \quad (3)$$

а для способа наблюдательных скважин:

$$K = Um/l. \quad (4)$$

где:  $I = \Delta h/\Delta l$  – градиент потока, определяемый по формуле:

$$I = (h_n - h_n) / l, \quad (5)$$

$h_n$ ,  $h_n$  – уровни воды в пусковой и наблюдательной скважинах;  $l$  – расстояние между скважинами.

В качестве индикаторов применяют химические соединения радиоактивного трития, натрия – 24, серы – 35, железа – 59, брома – 82, рубидия – 86 и йода – 131. Следует по возможности выбирать соединения и изотопы, слабо сорбирующиеся на грунтах данного состава, с тем чтобы уменьшить потери индикатора.

Заслуживает особого внимания *методика использования природных радиоактивных индикаторов* для изучения различных форм движения влаги в природе. *Природными индикаторами* являются стабильные изотопы дейтерия и кислорода, а также радиоактивные изотопы, непрерывно образующиеся в верхних слоях атмосферы в результате ядерных реакций частиц космического происхождения с атомами элементов, составляющих атмосферу. Вместе с атмосферной влагой в почве и грунте природные индикаторы образуют радиоактивные метки. Если систематически определять содержание радиоактивных изотопов космического происхождения в выпадающих осадках, а также фиксировать количество выпавших осадков, то дальнейшее движение выпавшей влаги можно наблюдать во времени и пространстве.

*Космогенные индикаторы* (третий, бериллий – 7; бериллий – 10, углерод – 14, натрий – 22, кремний – 32, фосфор – 32, сера – 35, хлор – 36) обладают различными

периодами полураспада. Особенный интерес представляет тритий, который по своим свойствам практически не отличается от водорода. При миграции влаги тритий в результате изотопного обмена с водородом распределяется между различными формами влаги в материале – кристаллической, капиллярной и жидкой. Использование тритиевой метки позволило доказать изотопообменную подвижность связанной воды в пористых материалах и грунтах.

Использование *способа вытеснения водорода* обычной воды тритием позволило изучить формы связи влаги со скелетом грунта (рис. 30). Изотопное равновесие, то есть равное количество уходящих и приходящих атомов трития, наступает сначала в свободной влаге, затем – в механически связанной, а далее в зоне физико-химических связей и, наконец, в скелете *грунта*. Наблюдения за темпом уменьшения концентрации исходного раствора трития, в который помещена проба грунта, позволяют количественно оценить соотношение форм связи влаги со скелетом.

Пробы грунта погружаются в тритиевую воду, затем строятся зависимости изменения концентрации трития во времени в полулогарифмическом масштабе. Характерные участки полученной зависимости (рис. 30) позволяют судить о характере связи со скелетом материала; здесь 1, 2, 3, 4 – интервалы, которые характеризуют изотопный обмен с различными фазами.

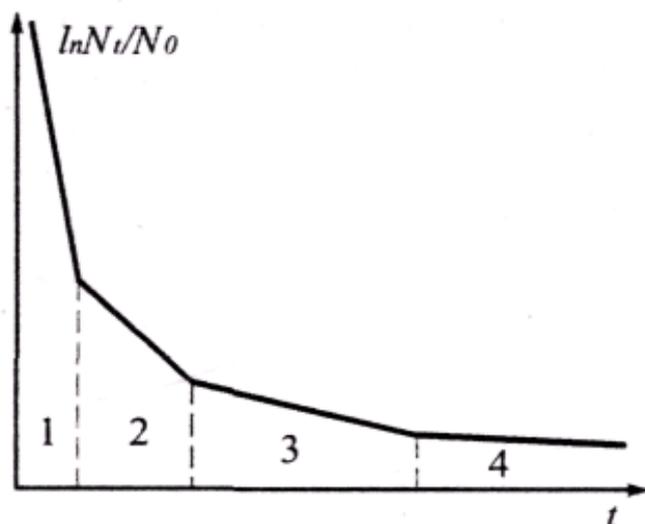


Рис. 30.  
Характер изменения концентрации трития при изучении форм связи влаги со скелетом:  
1 – интервал жидкой фазы;  
2 – интервал капиллярной фазы;  
3 – интервал поверхностной фазы;  
4 – интервал кристаллической фазы

#### 4. Полевые методы определения плотности, влажности и деформативности грунтов

При намыве плотин, постройке дорог, мостовых переходов и гидротехнических сооружений возникает необходимость измерений плотности и влажности грунтов. Преимущества полевых методов перед традиционными заключаются в следующем:

- измерения производятся непосредственно в полевых условиях без отбора контрольных образцов;
- измерения могут производиться многократно и позволяют проследить кинетику изменения плотности и влажности грунтов;
- глубина скважин может достигать 30 метров, что позволяет послойно определять свойства грунта;
- время одного измерения достигает 2...3 мин, при этом быстро можно получить представительную информацию о плотности и влажности для больших площадей и объемов.

а) Определение *влажности* производится *нейтронным методом*, который

основан на замедлении быстрых нейтронов ядрами водорода. Влажность грунта определяется плотностью медленных нейтронов в рассматриваемом объеме, зарегистрированных детектором нейтронов. Определение плотности грунта основывается на эффекте рассеяния гаммаквантов атомами элементов изучаемой среды. Во ВНИИГиМ разработан универсальный влагомер, предназначенный для поверхностных и глубинных (в скважинах) измерений влажности почв и грунтов. В скважинах могут быть установлены обсадные трубы.

б) Для измерения **плотности грунтов** применяются **гамма-плотномеры**, основанные на принципе рассеянного излучения (рис. 31). Рабочий объем грунта, с которого собирается 90% информации, описывается радиусом 8...10 см при плотности 1200 кг/м<sup>3</sup> и радиусом 3...5 см при плотности 1800 кг/м<sup>3</sup>. На схеме (рис. 31,а) показан прибор, который работает по принципу *рассеянного излучения*, а на схеме (рис. 31,б) показан источник, который внедряется в грунт и работает по принципу поглощения широкого пучка гамма-излучения. В качестве источника излучения используется радиоактивный цезий-137. Преобразователь плотномера включает источник излучения в контейнере, свинцовый экран, детектор излучения, соединенный с регистрирующим блоком. При измерении поверхностной плотности, используется короткий штوك, а между поверхностью грунта и преобразователем – пластина. При определении плотности на глубине шток удлиняется и его наконечник снабжается перфоратором.

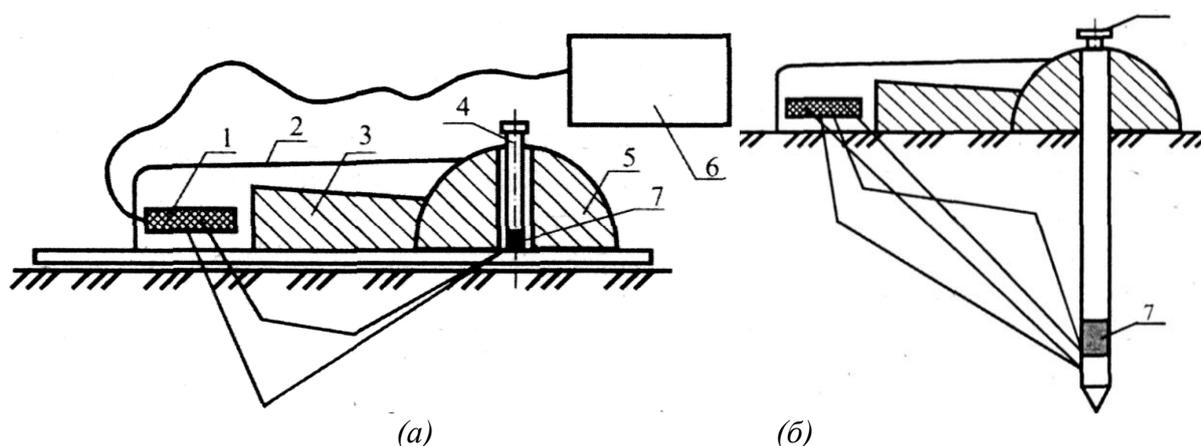


Рис. 31. Универсальный гамма-плотномер для грунтов: а – работа прибора по принципу рассеянного излучения; б – работа источника по принципу поглощения пучка гамма-излучения;

- 1 – детектор излучения;  
 2 – преобразователь плотномера; 3 – свинцовый экран; 4 – короткий шток;  
 5 – контейнер; 6 – регистрирующий блок; 7 – источник излучения

в) Для **определения деформационных характеристик** грунтов в полевых условиях можно использовать установку для испытания грунтов статической нагрузкой (рис. 32). Установка включает штамп, нагрузочное устройство, состоящее из гибкой трансформирующей оболочки из эластичного и водонепроницаемого материала, сообщенной с источником жидкости, платформы с ребрами жесткости и системы предохранительных оттяжек и анкеров, и измерительную систему. Для снижения трудоемкости проведения испытаний и повышения надежности установки она снабжена телескопическими стойками, закрепленными сверху и снизу на платформе. При этом цилиндрическая оболочка закреплена посредством кольцевого элемента по периметру на концах верхних стоек, установленных снаружи оболочки. Стойки снабжены автоматической системой их фиксации в рабочем положении и гибкими

растяжками.

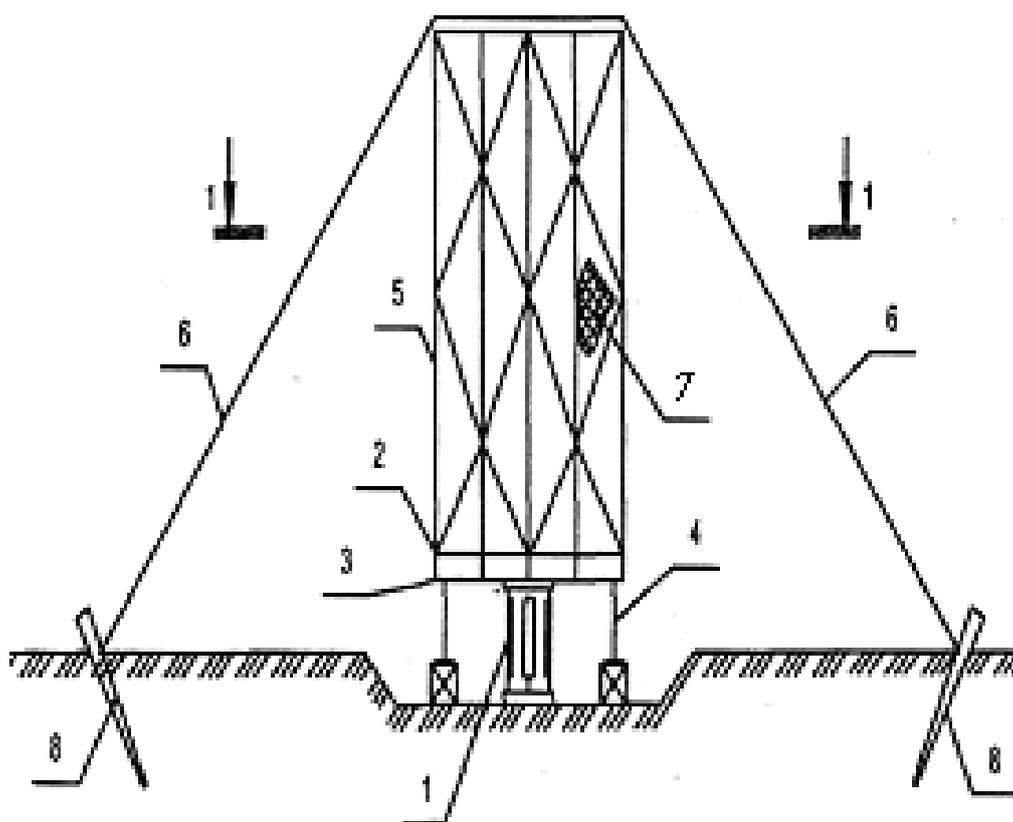


Рис. 32. Установка для испытания грунтов: 1 – штамп; 2 – круглая платформа; 3 – ребра жесткости; 4 – нижние телескопические стойки; 5 – телескопические стойки; 6 – предохранительные оттяжки; 7 – цилиндрическая оболочка; 8 – анкера

После снятия "нулевого" отсчета с системы измерения нагрузочное устройство синхронно с помощью гидросистемы нижних стоек опускается строго симметрично на штамп и снимается следующий отсчет с системы измерения осадок штампа. Затем загрузка штампа и снятие отсчетов с системы измерения осадок штампа может производиться либо плавно с любой наперед заданной скоростью, либо дискретно в виде любых наперед заданных ступеней с помощью жидкости, наливаемой в оболочку с определенной скоростью или определенными наперед заданными ступенями – объемами.

## 5. Методы каротажа скважин

При инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях для обоснования проектов сооружений необходимо иметь данные о физических свойствах грунтов на глубинах до 25 м. Для решения этой задачи эффективными являются **методы радиоактивного каротажа** скважин. Для определения плотности грунта и его влажности осуществляется непосредственное вдавливание измерительного зонда в грунт без предварительной проходки скважины. В этом случае снимаются помехи, связанные с обсадкой скважины, образованием затрубных каверн, зазорами между зондом и стенкой скважины, наличием глинистого раствора. Разработан комплекс «Пенекар», который включает *методы гамма-каротажа, гамма-гаммакаротажа и нейтрон-*

нейтронного каротажа. Последний предусматривает измерения по тепловым нейтронам. Кроме того, в комплексе предусмотрено электротензометрическое устройство, позволяющее получить данные о физико-механических свойствах грунтов путем измерения лобового сопротивления грунта погружению корпуса  $P$  и трения грунта  $T$  по поверхности датчика.

На рис.33 приведена схема *пенетрационно-каротажной* станции для определения физико-механических свойств грунтов. Станция состоит из установки для погружения штанги и комплекса наземной регистрирующей аппаратуры, расположенной в автобусе.

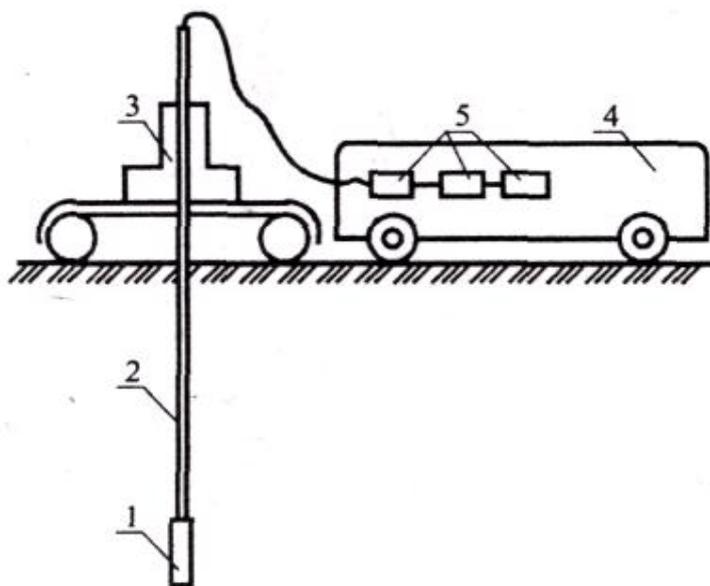
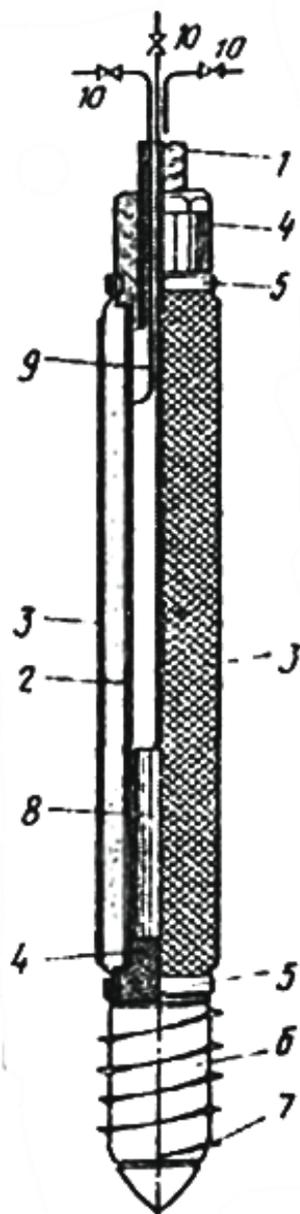


Рис. 33.  
Схема пенетрационно-каротажной станции: 1 – погружаемая аппаратура; 2 – штанга; 3 – установка для погружения штанги; 4 – автобус; 5 – регистрирующая аппаратура

Гидродомкрат развивает усилие до 120 т, что позволяет исследовать рыхлые отложения на глубину до 25...30 м при скорости погружения до 6 м/мин. Радиометрические и тензометрические датчики размещены в двух комбинированных зондах. В *первом зонде* расположены датчики гамма-гаммакаротажа (рассеянного гамма-излучения), лобового сопротивления и трения, во *втором* – датчики нейтронного каротажа и гаммакаротажа. За одно погружение можно одновременно получить количественную информацию от трех датчиков. В качестве источников излучения использованы: цезий-131 – для гаммазонда; плутоний и бериллий – для нейтронного зонда.

## 6. Метод уплотнения и повышения устойчивости грунтов

Для принудительной консолидации, уплотнения и повышения устойчивости грунта и грунтовых сооружений может быть использован грунтовый анкер (рис.34). Грунтовый анкер включает тягу, вокруг которой размещена усиленная в продольном направлении цилиндрическая оболочка, которая прикреплена своими концами к тяге и оснащена трубопроводом для подачи в нее воздуха. Анкер снабжен устройством для образования лидирующей скважины и реверсивным пневмоударником, оснащенными трубопроводом для подачи в них воздуха. При этом тяга выполнена полый, пневмоударник размещен в нижней части тяги и жестко прикреплен к ней. Устройство для образования лидирующей скважины



выполнено со шнековой спиралью, размещено под пневмоударником и жестко соединено с ним. Трубопроводы выполнены гибкими и размещены в полости тяги. Одной из главных положительных особенностей грунтовых анкеров является возможность удаления их из грунта после выполнения всех запланированных работ и повторного многократного использования для различных целей без какого-либо ухудшения их технических параметров. Временное преднапряжение анкера по грунту можно легко снимать простым понижением рабочего давления в оболочке до нуля. Возможность выполнения реверса, то есть изменения направления вращения и удара соответственно у шнековой обкатывающей системы устройства и пневмоударника, позволяет поднять весь анкер на поверхность грунтового основания.

Рис. 34.

Грунтовый анкер 1 – рабочий трос;  
 2 – несущая тяга; 3 – цилиндрическая оболочка;  
 4 – концевые элементы; 5 – хомуты;  
 6 – устройство для образования лидирующей скважины; 7 – шнековая спираль;  
 8 – пневмоударник; 9 – гибкий трубопровод;  
 10 – управляемые каналы

## V. НЕРАЗРУШАЮЩИЕ И ОПТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

### 1. Общие сведения

Неразрушающие методы широко используются для контроля и обеспечения качественного технологического процесса в целом ряде отраслей народного хозяйства: металлургии, машиностроении, химической промышленности и т.п. В строительстве неразрушающие методы применяются главным образом для контроля сварных металлоконструкций, при изготовлении железобетонных деталей и элементов и т. д. и при освидетельствовании сооружений. Они являются также весьма перспективными для контроля качества строительных конструкций на заводах (в первую очередь заводах ЖБИ) не только для выявления уже допущенных дефектов и отступления от требований стандартов, но и, прежде всего, для предупреждения самой возможности таких нарушений. По физическим принципам различают следующие основные методы неразрушающих исследований:

- 1) при помощи проникающих сред (жидких, газообразных и др.)
- 2) механические методы испытаний;
- 3) акустические (ультразвуковые и более низких частот);
- 4) магнитные, электромагнитные и электрические;
- 5) при помощи ионизирующих излучений (рентгеновские, радиоизотопные и др.);
- 6) радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия.

## 2. Методы проникающих сред

В резервуарах, газгольдерах, трубопроводах и других аналогичных конструкциях, требующих обеспечения не только прочности, но и *плотности* соединений, контроль осуществляют с помощью проникающих сред. Кроме применявшихся ранее испытаний водой и керосином, в настоящее время разработаны и другие приемы.

*Испытания водой.* Проверяемые емкости заполняются водой до отметки обычно несколько выше эксплуатационной. В закрытых сосудах давление жидкости повышается дополнительным нагнетанием воды или воздуха. Гидростатическим давлением проверяются как плотность, так и прочность соединений и всего сооружения в целом. Контроль швов и соединений заливкой воды совмещается, таким образом, со *статическим испытанием* исследуемой емкости. Отдельные швы металлоконструкций могут проверяться сильной струей воды из брандспойта, направленной под давлением примерно 1 *атм* нормально к поверхности шва. При наличии дефектов вода просачивается сквозь неплотности проверяемого соединения.

*Проба керосином.* Благодаря своей малой вязкости и незначительному, по сравнению с водой, поверхностному натяжению керосин легко проникает через самые малые поры и выступает на противоположной поверхности. При опробовании поверхность шва с одной стороны обильно смачивается или опрыскивается керосином. Для облегчения наблюдений шов заранее подбеливается водным раствором мела. На этом подсохшем светлом фоне отчетливо выявляются затем ржавые пятна и полосы, возникающие при просачивании керосина.

*Проба сжатым воздухом.* При наиболее простом применении данного метода проверяемые швы обмазываются мыльной водой. С другой стороны шов обдувается сжатым воздухом, подаваемым из шланга под давлением порядка 4 *атм* нормально к исследуемому шву. В замкнутые емкости сжатый воздух подается внутрь их объема. Признаком дефектности шва служит появление мыльных пузырей на обмазке. Более совершенным является применение ультразвуковых "течеискателей", принцип работы которых основан на регистрации ультразвуковых колебаний, возникающих в местах нарушения сплошности, под действием вытекающей здесь под давлением струи газа (воздуха). С помощью теcheискателей можно выявлять неплотности размером до 0,1мм при избыточном давлении порядка 0,4 *атм*. Место нахождения дефекта определяется с точностью до 1,5...2 см.

*Проба вакуумом.* Проверка вакуумом требует доступа к конструкции лишь с одной ее стороны, что является существенным преимуществом данного метода. К шву приставляется металлическая кассета в виде плоской коробки без дна с прозрачным верхом, через который виден проверяемый шов. Вакуум-насосом со шлангом, присоединенным к кассете, в которой создается небольшое разрежение, внешним воздушным давлением стенки кассеты, снабженные по их нижнему периметру мягкой резиновой прокладкой, прижимаются при этом к конструкции. Исследуемый шов предварительно должен быть смочен мыльным раствором. В местах нарушений

плотности шва воздух, проникая сквозь эти неплотности, образует в мыльной пене отчетливо видимые стойкие пузыри. При сварке сосудов высокого давления и других особо ответственных, требующих полной герметичности, конструкций для увеличения надежности контроля применяется проверка плотности соединений химическими реагентами, например, воздушно-аммиачной смесью или другими газообразными соединениями, обладающими высокой проникающей способностью. Химические методы проверки плотности соединений обладают большой чувствительностью и дают возможность очень четко определять места нахождения дефектов, чем и обуславливается в наиболее серьезных случаях целесообразность применения этих более сложных приемов.

### 3. Механические методы испытаний материалов

При испытаниях металла широко применяются так называемые "пробы на твердость". К ним относятся испытания путем вдавливания в поверхность металла стального шарика или алмаза (по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и т.д.), измерения по упругому отскоку падающего шарика (испытания по Шору) и др. Благодаря своей простоте, удобству и возможности быстрой проверки состояния материала в целом ряде точек на поверхности конструкций эти косвенные методы нашли применение и при освидетельствовании сооружений. Полученные при этом данные переводятся в прочностные характеристики исследуемого материала по эмпирическим формулам или с применением соответствующих графиков и таблиц.

Следует при этом иметь в виду, что само понятие "твердость" не является столь же определенным физическим критерием сопротивления материала силовым воздействиям как прочность, деформативность и т.д. В зависимости от вида испытания на твердость выявляются различные факторы: в методе отскока (по Шору) – способность к упругой работе при наличии поглощения части энергии деформирования; при вдавливании шарика по Бринеллю – пластические свойства на уровне предела текучести; при вдавливании алмаза – сопротивление значительному деформированию (на уровне предела прочности) и т. д.

**3.1. Оценка прочности металла.** Из полевых методов оценки прочностных характеристик стали наиболее широко распространен метод вдавливания шарика в испытываемый материал. По этому методу определяют твердость металла, а по ней – предел прочности. Эти характеристики обладают наиболее устойчивой связью между собой. Определение предела текучести по твердости или пределу прочности дает значительные погрешности. Ошибка при определении предела прочности по твердости составляет примерно  $\pm 7\%$ ; при переходе от предела прочности к пределу текучести погрешность достигает  $\pm 30\%$ .

Наибольшее применение в строительной практике для оценки твердости стали, а по ней прочности металла имеет прибор Польди (рис. 35) ударного действия. Прибор состоит из трубки 2, в которую вставляется боек 1, прижимаемый пружиной 6 к эталону 3 квадратного сечения, твердость которого  $HV^{ЭТ}$  должна быть заранее определена. Наконечником прибора является шарик 2 диаметром 10 мм из твердой закаленной стали, дающий при ударе отпечаток одновременно на исследуемом металле 1 и на стальном эталонном бруске 3. Эталон зажимают между бойком и шариком 5. При испытании прибор устанавливают шариком нормально к предварительно зачищенной поверхности и по верхнему торцу стержня 4 наносят удар молотком: получают два отпечатка шарика – один на эталоне, другой на поверхности элемента. Более точные результаты получают в том случае, когда твердость материала эталона и элемента примерно одинаковы. По размерам полученных отпечатков определяют

твердость металла элемента. Твердость  $HB$  исследуемого металла испытываемой конструкции определится из соотношения

$$HB = HB^{ЭГ} \times \frac{D - \sqrt{D^2 - d_{ЭГ}^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}}, \quad (1)$$

где:  $D$  – диаметр стального шарика 2;  $d$  – диаметр отпечатка на поверхности исследуемого материала;  $d_{ЭГ}$  – то же, на эталонном бруске.

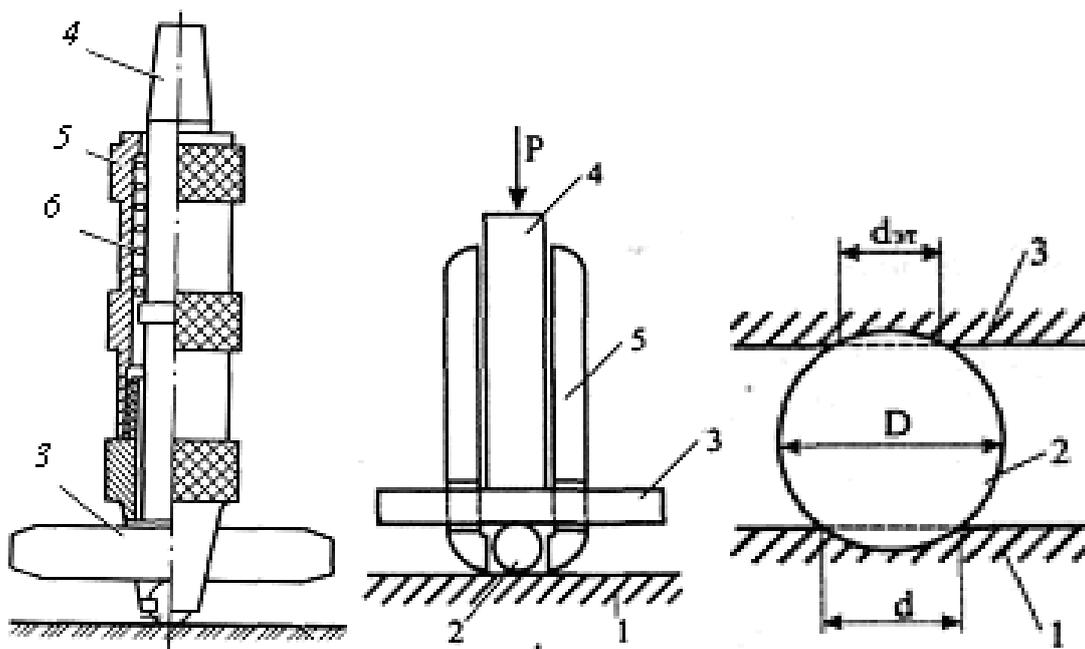


Рис. 35. Общий вид прибора Польди (а), его схема (б) и отпечатки, получаемые с его помощью (в): 1 – испытуемый элемент; 2 – стальной шарик; 3 – эталонный брусок; 4 – ударный стержень; 5 – обойма прибора; 6 – пружина

Нахождение  $HB$  и определение прочности и марки металла производятся с помощью соответствующих таблиц. Предел прочности, МПа, по твердости определяют по эмпирической зависимости

$$\sigma_s = k (HB),$$

где  $k$  – постоянный поправочный коэффициент для данного металла;  $HB$  – твердость металла, МПа.

Для углеродистой стали  $k = 0,36$ . По твердости можно приблизительно определить содержание углерода С в незакаленной углеродистой стали:

Содержание С, %.....	0,05	0,15	0,20	0,30	0,40	0,50
Твердость металла, МПа ...	1100	1200	1350	1560	1650	1800

С помощью прибора Польди можно получать, однако, лишь ориентировочные характеристики. Но и с учетом этого применение прибора практически полезно, в особенности в следующих случаях: для ускоренной проверки однородности материала в различных элементах освидетельствуемых конструкций; при отбраковке (проверке марок металла) поступающих заготовок.

**3.2. Оценка прочности бетона.** При косвенной оценке прочности бетона по твердостным характеристикам его поверхностного слоя приходится *учитывать следующие факторы*, усложняющие эту оценку:

1) большой разброс результатов испытаний на "твердость", обусловленный неоднородностью структуры бетона. Для получения надежных данных необходимо увеличить число проверяемых на поверхности точек и статистически обработать результаты испытаний;

2) возможная карбонизация поверхностного слоя, повышающая показатели твердости, а также увлажнение поверхности, снижающее эти показатели;

3) возможность расхождения прочностных характеристик на поверхности и в глубине массивных блоков. Это может быть проверено, например, контрольным бурением с выемкой образцов с разной глубины, а также применением рассматриваемых далее неразрушающих способов.

Необходимость в простых, доступных для массового применения способов оценки качества бетона настолько настоятельна, что, несмотря на указанные затруднения, для суждения о прочности бетона по механическим характеристикам его поверхностного слоя предложен целый ряд приборов и приспособлений. Краткий обзор практически наиболее оправдавших себя и методически интересных приемов приводится ниже.

**Оценка прочности бетона с помощью эталонного молотка К. П. Кашкарова** схематически показан на рис. 36. Принцип его действия аналогичен рассмотренному выше прибору Польди с той разницей, что удар наносится взмахом самого эталонного молотка. При ударе боек (стальной шарик диаметром 15 мм) оставляет на поверхности исследуемого бетона вмятину диаметром  $d_b$ , а на эталонном стержне (круглого сечения из Ст. 3 диаметром 10 мм) – отпечаток диаметром  $d_{ЭТ}$ .  $d_b / d_{ЭТ}$ ; прочность бетона оценивается по корреляционной зависимости между  $d_b / d_{ЭТ}$  и пределом прочности бетона на сжатие, устанавливаемой экспериментально. При этом должны учитываться конкретные условия изготовления конструкции и твердения бетона, сроки испытаний, шероховатость, влажность и другие особенности состояния поверхности конструкции. Для эксплуатируемых сооружений указанная зависимость должна быть уточнена на образцах, выбуренных из соответствующих элементов. Эталонный молоток рекомендуется для разных операций: оценок отпускной прочности бетонных изделий на заводах железобетонных конструкций, прочности бетона при передаче напряжения от арматуры на бетон в предварительно напряженных железобетонных конструкциях, коэффициента изменчивости прочности бетона в конструкциях (что особенно существенно при обследованиях сооружений) и т. д.

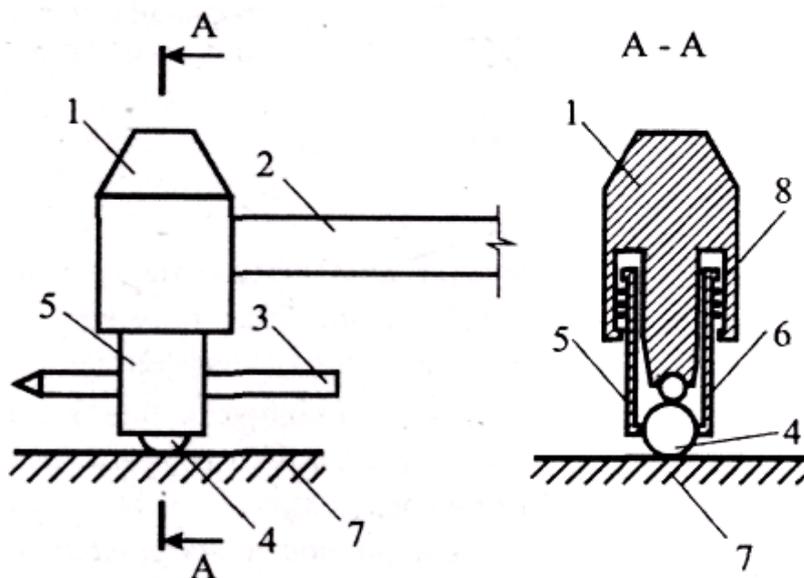


Рис. 36.  
 Схема молотка К. П.  
 Кашкарова:  
 1 – головка;  
 2 – рукоятка;  
 3 – эталонный  
 стержень;  
 4 – стальной арик;  
 5 – стакан; 6 – торец  
 стержня 3;  
 7 – испытуемый  
 материал;  
 8 – пружина

Для десяти ударов, нанесенных по проверяемому элементу с удаленными штукатурными и окрасочными слоями, определяется усредненное отношение. Одним из наиболее простых приспособлений для сравнительной оценки прочности бетона является молоток *И. Л. Физделя*. Ударная часть этого стального молотка весом 250 г заканчивается шариком из твердой стали, легко вращающимся в гнезде. По диаметру отпечатков, полученных при ударе, определяют прочность бетона по эмпирическому графику. Результаты, несмотря на их ориентировочность, все же полезны в производственных условиях. Пользование молотком при некотором навыке не вызывает затруднений. В Германии серийно выпускается и стандартизирован (ДИН-424а) прибор с пружиной, передающей при спуске удар заданной силы на шариковый наконечник, оставляющий отпечаток на бетоне.

**Оценка прочности бетона склерометром.** Приборы этого типа применяются главным образом за рубежом. Из их числа наиболее известен прибор Шмидта (Швейцария). В этих приборах, так же как в ударнике Шора для металла, о характеристиках материала судят по величине отскока стального бойка. Отскок фиксируется указателем на шкале. Удар наносится не непосредственно по исследуемой поверхности бетона, а воспринимается наконечником прибора, прижатого к конструкции. Этот промежуточный стальной элемент необходим, поскольку величина отскока при резкой разнице модулей упругости соударяемых материалов становится трудносопоставимой. Удар осуществляется спуском пружины, а не свободным падением бойка, как у Шора, что позволяет испытывать любым образом ориентированные поверхности. Прибор удобен в работе и дает довольно четкие результаты. Ударники Шмидта применяются почти исключительно в транспортном строительстве при освидетельствовании железобетонных мостов. Применяются также и несколько измененные конструкции прибора.

**Способ стрельбы.** Данный способ является своеобразным вариантом динамических оценок прочности материала. В 1933 г. Б. Г. Скрамтаевым была предложена оценка качества бетона по объему лунки, выбиваемой в нем револьверной пулей. Выстрел из револьвера системы "Наган" производится с расстояния 6...8 м от конструкции перпендикулярно ее поверхности с ограждением стреляющего от осколков и возможного рикошета. Объем образовавшихся лунок определяется измерением или, что более точно, по объему замазки, расходуемой на заполнение выбоин. Разброс получаемых результатов, однако, является значительным.

Дальнейшим развитием метода было предложенное несколько позднее Ф.Ф. Поляковым специально сконструированное ружье с подставкой, приставляемой к поверхности элемента. При выстреле в бетон входил стальной ударник, глубина погружения которого и служила показателем прочности материала. Способ стрельбы нашел практическое применение в испытаниях деревянных конструкций.

**Оценка прочности бетона по отпечатку при статическом воздействии.** Из числа предложений, основанных на статическом принципе, отметим, как наиболее характерное, устройство для вдавливания штампов, разработанное в НИИЖБе Г. К. Хайдуковым, А. И. Годером и Д. М. Рачевским. В зависимости от марки бетона берутся сферы радиусом 24, 14 и 10 см и гидравлическим домкратом создается усилие 2400, 2000 и 2200 кгс соответственно. Конец стального поршня домкрата, служащий штампом, обработан по сферической поверхности заданного диаметра. Для замера отпечатка на бетоне под поршнем укладывают по листу белой и копировальной бумаги. Для крепления всего устройства на исследуемом элементе и создания упора для домкрата имеются стальные захваты в виде массивных скоб. Существенным преимуществом штампов большого диаметра является передача усилия более значительному объему материала, что позволяет судить о совместной работе всех компонентов бетона. Другие же из рассмотренных ранее приборов (с наконечниками небольших размеров) дают в основном представление о характеристиках затвердевшего раствора между крупными включениями. К недостаткам установки следует отнести сравнительно большой ее вес, а также возникающие в отдельных случаях трудности закрепления, ограничивающие ее применение.

**3.3. Оценка прочности древесины. Метод ударных отпечатков** (А. Х. Шевцов). О прочности древесины судят по диаметру отпечатка (вмятины), появляющегося на гладко оструганной поверхности исследуемого элемента при падении стального шарика диаметром 25 мм с высоты 50 см со специальной подставки. Для проб на вертикальных и наклонных гранях применяется спуск горизонтально оттянутого шарика (рис. 37), скрепленного с нитью длиной 50 см. Диаметры отпечатка фиксируются с помощью белой и копировальной бумаг, помещенных на исследуемую поверхность в месте удара. Для перехода от диаметра отпечатка к прочности материала пользуются экспериментальными кривыми, построенными для разных сортов древесины. Для учета влияния влажности вводится поправочный коэффициент.

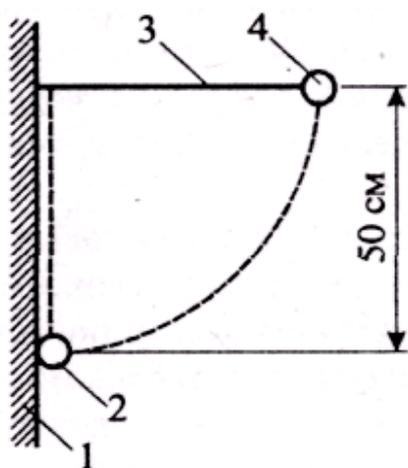


Рис. 37.

Испытание ударом шарика по вертикальной поверхности деревянного элемента: 1 – испытуемый элемент; 2 – натянутая нить; 3 – стальной шарик; 4 – положение того же шарика в момент удара

**Способ стрельбы** предложен также К. П. Кашкаровым. В испытуемый деревянный элемент стреляют из мелкокалиберной винтовки, закрепленной в легком переносном станке. Расстояние от конца винтовочного ствола до поверхности

древесины принимается равным 10см. Направление простреливания – нормальное к годовым слоям. Глубина погружения пули определяется электрозондом. От среднеарифметического значения глубин погружений при нескольких выстрелах переходят к прочности на сжатие вдоль волокон материала по графикам, построенным экспериментально для соответствующих сортов древесины. Исследования показали, что глубина погружения пули практически не зависит от влажности простреливаемых слоев.

#### 4. Акустические методы

Акустические методы основаны на возбуждении упругих механических колебаний. По параметрам этих колебаний и условиям их распространения судят о физико-механических характеристиках и состоянии исследуемого материала. В зависимости от частоты колебаний акустические методы делятся на ультразвуковые (от 20 тыс. Гц и выше) и методы, основанные на использовании колебаний звуковой (до 20 тыс. Гц) и инфразвуковой (до 20 Гц) частот.

**4.1. Ультразвуковые методы. Возбуждение и прием колебаний.** Для возбуждения ультразвуковых волн на поверхности исследуемого материала устанавливают *преобразователи* переменного электрического тока, создающие колебания. Чаще всего применяются преобразователи, действующие по принципу *пьезоэффекта*. При этом для возбуждения колебаний используется так называемый «обратный», а в преобразователях для приема колебаний – «прямой» пьезоэффекты. Поскольку воздушные прослойки препятствуют передаче и приему ультразвуковых колебаний, между преобразователями и исследуемым материалом наносят *контактирующую среду*. Для металла применяют обычно минеральное масло, для бетона и других материалов с неровной поверхностью необходимы смазки более густой консистенции – солидол, технический вазелин, эпоксидные смолы и т.д.

*Условия прохождения ультразвуковых волн.* Ультразвуковые колебания могут быть введены в исследуемую среду узким направленным пучком – «лучом» с малым углом расхождения. Колебания частиц происходят при этом лишь в локализованном объеме материала, ограниченном контурами пучка, а исследуемый же элемент в целом остается неподвижным. Эта возможность прозвучивания материала в заданных направлениях является весьма существенной при проведении исследований. Ультразвуковые волны, переходя из одной среды в другую, преломляются, а также отражаются от граней, разделяющих эти среды, что используется для определения их распространения при данном методе контроля. В воздушных прослойках ультразвуковые колебания затухают почти полностью, что позволяет выявлять и исследовать скрытые внутренние дефекты: трещины, расслоения, пустоты и т.д. Различают *продольные* и *поперечные* волны. В первом случае частицы материала колеблются по направлению ультразвукового луча, а во втором – перпендикулярно к нему. Используют также *поверхностные* волны, как продольные, так и поперечные, распространяющиеся лишь в поверхностном слое материала и позволяющие, например, в металле, обнаруживать самые мелкие поверхностные повреждения. *Скорость распространения волн* (своя для каждого из указанных видов материалов) является одним из основных показателей при оценке физико-механических характеристик бетона, древесины и др. материалов с переменными плотностью и влажностью.

*Способы прозвучивания.* По направлению ультразвуковых волн различают два основных приема прозвучивания:

а) *сквозное* – когда излучатель, возбуждающий колебания, и приемник, воспринимающий их, расположены с противоположных сторон исследуемого объекта

(рис. 38,а,б). Направление ультразвукового луча по отношению к поверхности материала может при этом быть как нормальным, так и наклонным;

б) с использованием отражения или «эхо-метода», когда излучатель и приемник располагаются на одной и той же стороне (рис. 38,в), что особенно существенно при возможности лишь одностороннего доступа к объекту. Кроме того, эхо-метод удобен при использовании не двух, а одного приемопередающего преобразователя, который последовательно посылает упругие волны и сам же принимает их отражения.

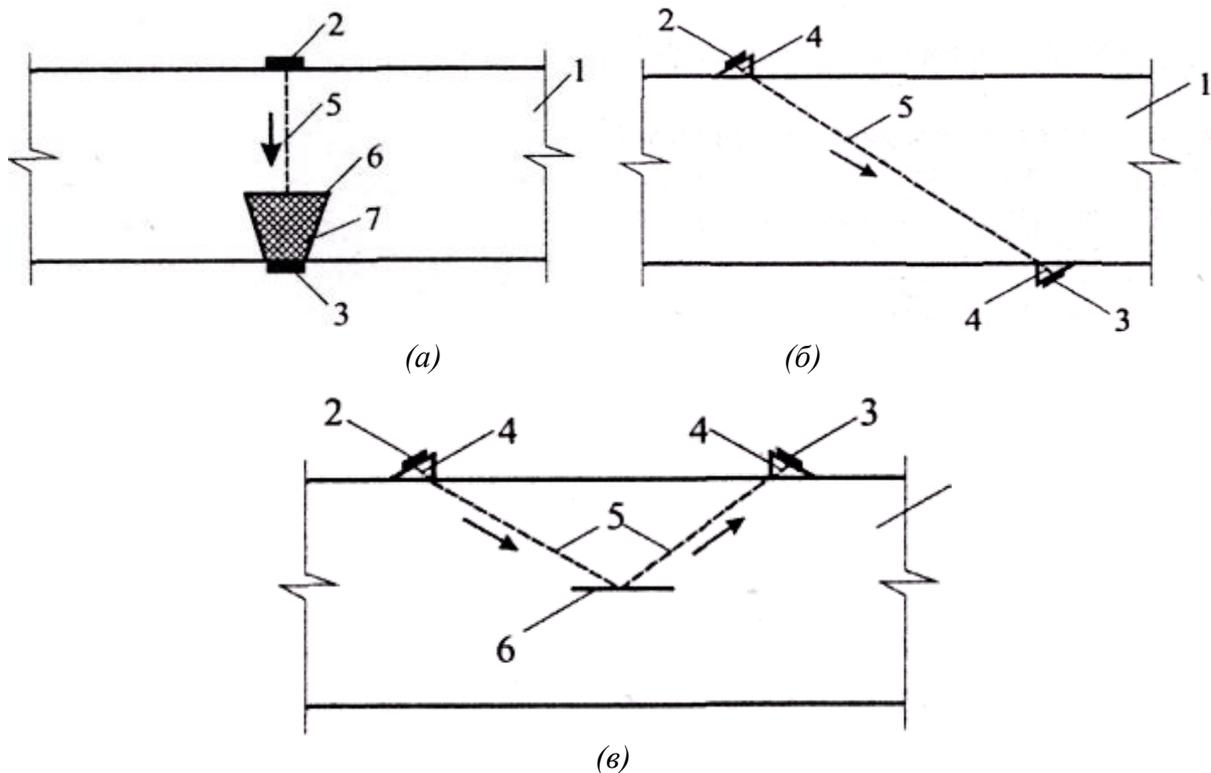


Рис. 38. Способы прозвучивания: а – сквозное прозвучивание нормально к поверхности элемента; б – диагональное прозвучивание; в – эхо-метод; 1 – прозвучиваемый элемент; 2 – излучающая пьезоэлектрическая пластинка; 3 – пьезопластинка, воспринимающая колебания; 4 – призма из оргстекла; 5 – направление прозвучивания; – выявляемый дефект; 7 – теневая зона

**По характеру излучения** необходимо различать:

а) *метод непрерывного* излучения с подачей к излучателю колебаний переменного тока постоянной частоты; по такому принципу были разработаны первые дефектоскопы (С.Я. Соколов, 1928 г.) для выявления дефектов в материале по направлению звуковой тени (рис. 38,в);

б) *импульсный метод*, получивший сейчас самое широкое применение как наиболее эффективный при исследованиях бетона, при дефектоскопии сварных швов металлоконструкций и др. В этом случае к преобразователю через определенные достаточно малые промежутки времени, например, 25 или 50 раз в 1 сек, подаются короткие серии («пакеты») колебаний высокой частоты. Регистрация ультразвуковых колебаний производится с помощью специальной аппаратуры. Наиболее распространенной является передача электрических колебаний от приемного преобразователя через усилитель на экран электроннолучевой трубки катодного осциллографа. С большой точностью при этом могут быть определены скорость

прохождения ультразвуковых колебаний через исследуемый материал, интенсивность их затухания, а также другие показатели, используемые при оценке результатов измерений.

**4.2. Область применения ультразвуковых методов. Определение динамического модуля упругости.** Скорость распространения упругих колебаний  $v$  связана с динамическим модулем упругости  $E_{дин}$  и плотностью  $\rho$  проверяемого материала соотношением

$$v = \sqrt{\frac{E_{дин}}{\rho}} \quad (2)$$

справедливым для случая продольных колебаний в стержне (одномерная задача). Определив экспериментально скорость распространения волны колебаний в элементе, длина которого велика по сравнению с его поперечными размерами, находим,  $E_{дин} = v^2\rho$ , если плотность материала известна. В массивных и плитных конструкциях, т. е. для случаев трехмерной (пространственной) и двухмерной задач, а также для поперечных колебаний зависимость между  $E_{дин}$  и  $v$  определяется более сложными соотношениями, в которые кроме  $\rho$  входит также коэффициент Пуассона  $\mu$  рассматриваемого материала. Для одновременного нахождения всех трех параметров ( $E_{дин}$ ,  $\rho$  и  $\mu$ ) необходимо сопоставление по крайней мере трех экспериментов по определению  $\mu$ , произведенных в разных условиях с применением продольных и поперечных колебаний и в конструкциях разной размерности – пространственных, плитных и стержневых.

**Определение толщины элемента при одностороннем доступе.** В серийно выпускаемых для этой цели *толщиномерах* используется непрерывное излучение продольных ультразвуковых волн регулируемой частоты. На рис. 39 показан график распространения колебаний (условно направленных не вдоль, а поперек направления луча) по толщине стенки. Дойдя до противоположной ее грани, волна отражается и идет в обратном направлении. Если проверяемый размер  $h$  точно равен длине полуволны (или кратен этой величине), а противоположная грань соприкасается с менее плотной средой, то прямые и отраженные волны совпадают. Амплитуды колебаний самой пьезопластинка при этом резко возрастают (явление резонанса), что сопровождается соответствующим увеличением разности потенциалов на ее поверхностях.

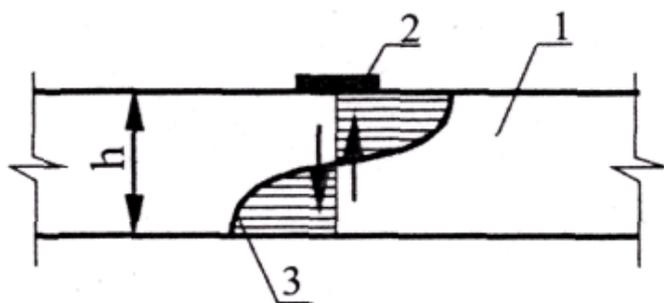


Рис. 39.

Схема измерения толщины резонансным методом:

1 – исследуемая деталь;

2 – пьезоэлемент;

3 – совпадающие амплитуды прямой и обратной «стоячей» волны;

$h$  – толщина детали

Замерив соответствующую резонансную частоту  $f$  и зная скорость распространения волн по длине  $2h$  (суммарный ход прямого и отраженного лучей), находим проверяемую толщину по формуле:

$$h = v / 2f \quad (3.3)$$

Для стали скорость продольных ультразвуковых волн практически постоянна ( $v = 5,7 \times 10^5$  см/сек), что дает возможность, меняя частоту в пределах от 20 до 100 тыс. гц, надежно измерять толщину стенок от долей миллиметра до нескольких сантиметров.

**Определение глубины трещин в бетоне.** Излучающий и приемный преобразователи  $A$  и  $B$  располагаются симметрично относительно краев трещины на расстоянии  $a$  друг от друга (рис. 40). Колебания, возбужденные в точке  $A$ , попадут в точку  $B$  по кратчайшему пути:  $ACB = \sqrt{4h^2 + a^2}$ , где  $a$  – глубина трещины. При скорости  $v$  на это потребуется время  $t_h = \frac{\sqrt{4h^2 + a^2}}{v}$ , определяемое экспериментально.

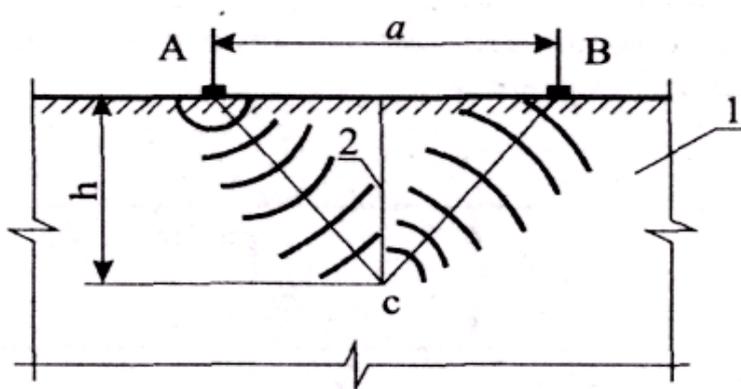


Рис. 40.  
Определение глубины  
поверхностной трещины в  
бетоне: 1 – бетонный  
массив; 2 – трещина;  
 $A$  – излучающий и  
 $B$  – приемный  
преобразователи

Глубину трещины находим из соотношения:

$$h = \frac{v}{2} \sqrt{t_h^2 - \left(\frac{a}{v}\right)^2}, \quad (5)$$

где скорость  $v$  определяется обычно на неповрежденных участках поверхности. По указанному методу могут быть исследованы трещины глубиной до нескольких метров.

Следует, однако, иметь в виду следующее: значения  $v$  на поверхности и в глубине массива могут несколько отличаться; длина пути  $ACB$  немного возрастет в случае неперпендикулярности трещины и, наоборот, может существенно уменьшиться при наличии в трещине воды, являющейся хорошим проводником ультразвуковых волн. В ответственных случаях, возможно, получить данные для глубоких трещин. Отметим также другие практически наиболее важные области применения ультразвуковых методов. В бетонных и железобетонных конструкциях производится:

– *определение прочности бетона* по корреляционным зависимостям между скоростью распространения ультразвуковых волн и прочностью бетона на сжатие, устанавливаемым путем параллельных ультразвуковых и прочностных испытаний образцов бетона заданного состава и режима изготовления (при контроле вновь изготавливаемых конструкций и деталей) или образцов, извлеченных из возведенных сооружений. В случае невозможности отбора образцов из уже эксплуатируемых

конструкций ориентировочное определение прочности бетона возможно по тарировочной зависимости;

– *контроль однородности бетона* в сооружениях;

– *выявление и исследование дефектов в бетоне* сквозным прозвучиванием (возможным и при значительных толщинах бетона – до 10 м и более) и путем измерений на поверхности конструкций. О наличии и характере дефектов и повреждений судят при этом по изменениям скорости прохождения ультразвуковых волн в пределах отдельных участков поверхности (так называемый метод годографа, т. е. графика скоростей);

– *определение толщины верхнего ослабленного слоя бетона*, расположения слоев разной плотности и т. п. Наличие арматуры в железобетонных конструкциях не мешает применению ультразвуковых методов, если направление прозвучивания не пересекает арматурные стержни и не совпадает с ними.

В металлических конструкциях:

– *импульсная дефектоскопия швов* сварных соединений в стальных и алюминиевых конструкциях;

– *дефектоскопия* основного материала;

– *толщинометрия* (определение толщин защитных металлических покрытий; выявление ослабления сечений коррозией).

В деревянных конструкциях и конструкциях с применением пластмасс:

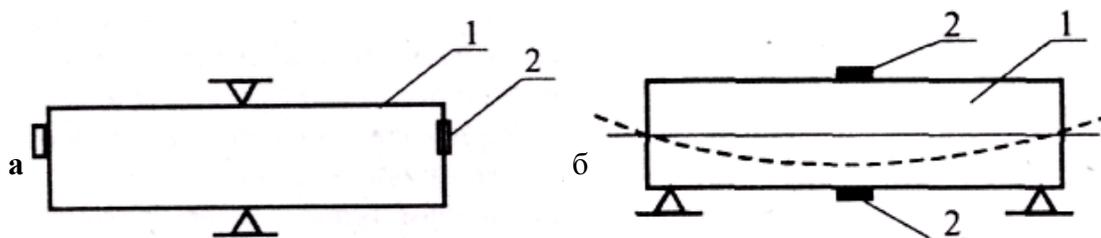
– *проверка физико-механических характеристик*,

– *проверка качества* и дефектоскопия основного материала;

– *дефектоскопия* клеевых соединений и стыков.

**4.3. Импульсные звуковые методы. Метод «ударной волны».** Он основан на изменении скорости распространения *единичных импульсов*, возбуждаемых ударом легкого молотка или специальными приспособлениями, например электрического действия, для нанесения небольших ударов заданной силы. Для приема и регистрации сигналов может быть использована та же аппаратура, что и при ультразвуковом импульсном методе. Этот метод используется для контроля асфальтового и цементного бетонов в дорожных и аэродромных покрытиях и может быть применен также для испытания бетонных и железобетонных элементов длиной до 30 м.

**Вибрационный метод.** Данный метод основан на использовании колебаний звуковой частоты и применяется при испытаниях образцов бетона (рис. 41). Рассматриваемый метод полезен при сооружении дорожных и аэродромных покрытий для получения быстрой и надежной информации о ходе технологического процесса и может также быть положен в основу автоматического управления. При этом о характеристиках материала судят по частотам, соответствующим резкому увеличению измеряемых амплитуд при наступлении явления резонанса (откуда и другое наименование метода – «резонансный»).



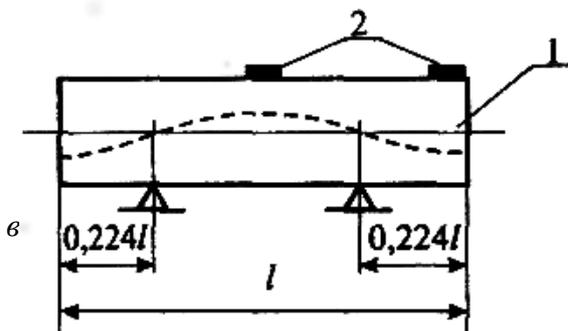


Рис. 41.  
Испытание образцов бетона резонансным методом:  
а – возбуждение продольных;  
б и в – изгибных колебаний;  
1 – испытуемый образец;  
2 – пьезопреобразователи

**Метод «бегущей волны».** При этом оригинальном методе к регистрирующему прибору, помимо сигналов, воспринимаемых приемным преобразователем, подводятся также сигналы генератора, возбуждающего непрерывные колебания. В результате сложения этих сигналов на экране электроннолучевой трубки появляются характерные изображения фигур Лиссажу. Меняя частоту в пределах ультразвукового и звукового диапазонов, а также положение и тип приемных преобразователей, можно наблюдать изображения, соответствующие продольным, поперечным и поверхностным волнам и по ним оценивать характеристики материала на разной глубине его нахождения.

## 5. Магнитные, электрические и электромагнитные методы

**5.1. Дефектоскопия металла.** Сущность метода заключается в том, что магнитный поток, проходящий в металле и пересекающий трещину или иной дефект, встречает большое магнитное сопротивление в виде прослойки воздуха или неферромагнитного включения, а силовые линии, искривляясь, выходят на поверхность, что обуславливает возникновение местных потоков рассеяния. На рис. 42,а показано такое искажение потока, выходящее за контур исследуемого элемента. Рассеивание будет тем значительнее, чем больше вызывающий его дефект. В одинаковых условиях наибольшим является влияние дефекта, расположенного перпендикулярно к направлению силовых линий (рис. 42,б).

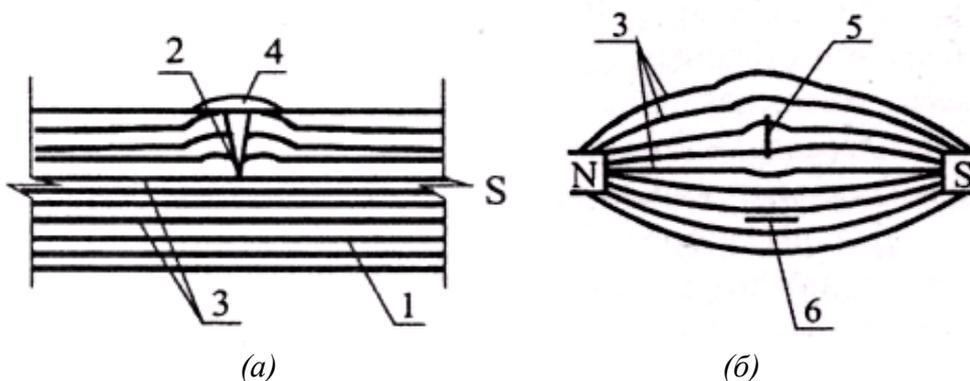


Рис. 42. Выявление дефектов по рассеиванию магнитного потока:  
а – образование местного магнитного потока рассеивания у трещины;  
б – влияние ориентировки дефекта; 1 – исследуемый элемент; 2 – трещина;  
3 – силовые линии магнитного поля; 4 – местный магнитный поток рассеивания; 5 – дефект, ориентированный перпендикулярно магнитным силовым линиям;  
6 – то же, параллельно им

Намагничивание производится с помощью электромагнитов с использованием индукционных токов, циркулярным намагничиванием (т.е. с пропуском тока

непосредственно через исследуемый элемент) и т.д. Необходимость намагничивания в двух взаимно перпендикулярных направлениях для выявления различным образом ориентированных дефектов отпадает при применении комбинированного метода – с одновременным воздействием, как постоянного поля электромагнита, так и циркулярного поля переменного тока, что обуславливает переменное направление намагничивания. Выявление дефектов производится различными методами.

**Порошковый метод** является самым простым и наиболее доступным. В нем применяют мелкоразмолотые ферромагнитные порошки – железный сурик, окалину и т. п., выбирая цвет порошка контрастным по отношению к цвету предварительно зачищенной проверяемой поверхности. Порошок наносится или сухим способом (напылением) либо в виде водной суспензии, что предпочтительнее при контроле строительных конструкций, или керосино-масляной (этот прием целесообразен при контроле смазанных маслом деталей механизмов). Над местами расположения дефектов порошок оседает в виде хорошо заметных скоплений. Четче всего выявляются поверхностные дефекты. Неровности сварных швов не мешают выявлению поверхностных дефектов, но затрудняют исследование расположенных в глубине. Так, например, в швах толщиной 10 мм удовлетворительно в виде прямых линий выявляются непровары, расположенные на расстоянии 2...4 мм от поверхности и идущие вглубь на 3...5 мм.

**Магнитографический метод** широко применяется при контроле сварных швов металлических трубопроводов. Намагничивание производится соленоидами, охватывающими или всю трубу или часть её периметра при больших диаметрах. Витки соленоида располагаются параллельно шву по обеим его сторонам. Для фиксации потоков рассеивания на шов накладывается магнитная лента, аналогичная применяемой в магнитной звукозаписи, но несколько большей ширины. Исползованные ленты размагничиваются и становятся вновь пригодными к употреблению. Для расшифровки записи используют звуковые индикаторы или устройства для визуального наблюдения импульсов на экране электроннолучевой трубки и сопоставления их с импульсами от эталонированных дефектов. Имеются устройства, дающие и видимые изображения выявленных дефектов. Указанным методом может производиться сплошная проверка швов. Для контроля наиболее серьезные из отмеченных дефектов дополнительно просвечиваются ионизирующими излучениями. Такое комбинированное использование разных методов оказывается весьма эффективным.

**Применение магнитоскопов.** В качестве примера на рис. 43 схематически показан принцип действия одного из наиболее известных приборов такого типа – дефектоскопа К. Х. Хренова и С. Т. Назарова. Сигналы о наличии дефекта в производственных условиях преобразуются обычно в звуковые, но могут быть использованы как показывающие так и регистрирующие приборы (измерители тока или напряжения, осциллографы и т.п.).

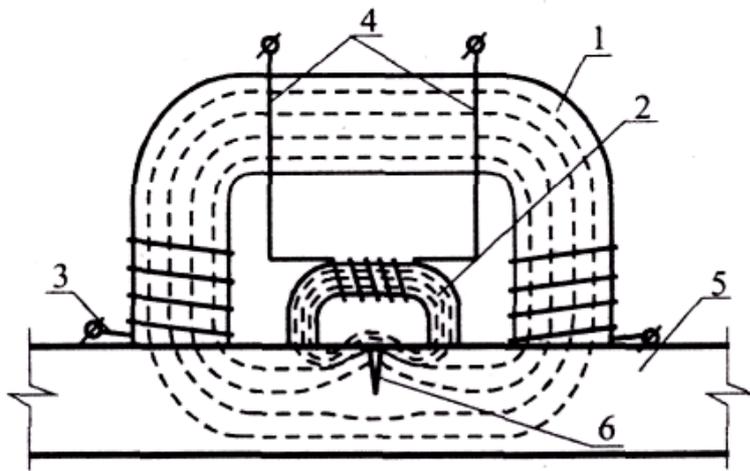


Рис. 43.

Схема дефектоскопа К. Х. Хренова и С. Т. Назарова:

- 1 – электромагнит;
- 2 – электромагнитный датчик;
- 3 – проводка к сети переменного тока;
- 4 – то же, к усилителю;
- 5 – проверяемый элемент;
- 6 – дефект

Основным недостатком приборов рассматриваемого типа является довольно значительная длина базы их чувствительных элементов (в данном случае сердечника 2), что затрудняет уточнение границ и протяженности дефектов, поскольку регистрируются усредненные данные по длине базы искателя. Эти затруднения в значительной степени устраняются при пользовании *феррозондами* в виде малогабаритных линейных сердечников сечением до 1...3 мм с катушками.

**5.2. Магнитные толщиномеры.** С помощью магнитных и электромагнитных приборов толщина элементов из ферромагнитных металлов определяется с точностью до нескольких процентов, требуя доступа лишь с одной стороны. При этом используется существующая зависимость между регистрируемой величиной магнитного потока и толщиной исследуемого материала. Приборы такого типа просты и надежны в работе.

При доступе с двух сторон магнитными и электромагнитными методами могут быть определены толщины и неферромагнитных материалов, что и используется для управления технологическим процессом на поточной линии. В качестве примера на рис. 44 приведена схема магнитного толщиномера, где пара феррозондов 4 смонтирована вместе с постоянным магнитом 3 в "щупе" 2. С другой стороны элемента к нему прижат аналогичный магнит. Положение магнита в щупе регулируется так, чтобы при заданной толщине стенки ток от обоих феррозондов был равен нулю. Шкала измерительного прибора 5 отградуирована на отклонения от заданной толщины. Магнитными и электромагнитными методами с большой точностью могут быть измерены также толщины защитных покрытий на металлических элементах.

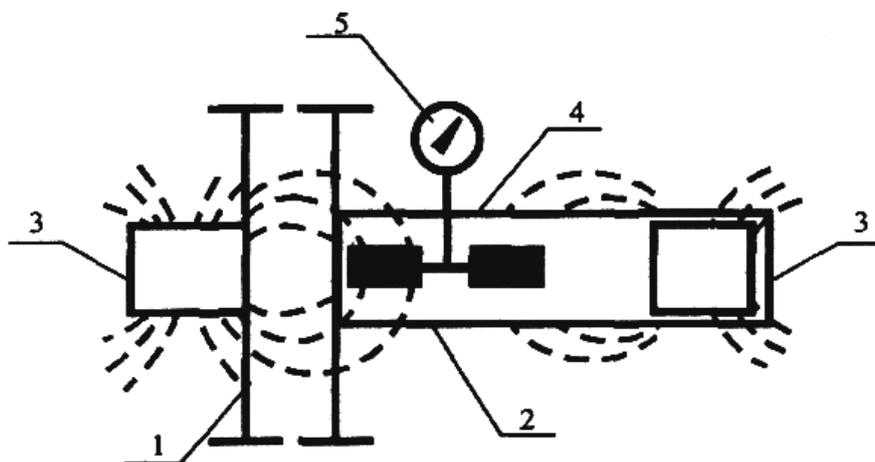


Рис. 44. Схема магнитного толщиномера для немагнитных материалов:  
 1 – проверяемый элемент; 2 – "щуп"; 3 – постоянные магниты; 4 – феррозонды;  
 5 – регистрирующий прибор

**5.3. Определение напряжений с помощью магнитоупругого тестера.** Метод, основанный на возникновении магнитной анизотропии под действием приложенных напряжений. Из числа приборов, работающих по данному принципу, следует отметить прибор конструкции Н. Н. Максимова, схема преобразователя которого (три сердечника с пятью катушками) показана на рис. 45. В центре сердечника расположена питающая катушка 1, а по диагоналям его – две пары измерительных катушек (2 и 3). Магнитный поток из средней катушки, попадая в исследуемый материал, рассредоточивается в основном по четырем направлениям. При одинаковой магнитной проницаемости потоки будут равны, а при наличии же магнитной анизотропии – различны, что и измеряется прибором. Пунктиром со стрелками показано направление магнитных потоков в исследуемом элементе. Измерительная схема построена таким образом, что электродвижущая сила катушек может определяться как в каждой диагонали в отдельности, так и по их разности и сумме. При измерениях «на разность», поворачивая сердечник в плане, по экстремумам отчетов выявляется направление главных напряжений в металле. По повторным измерениям при одинаковом положении сердечника можно судить о постоянстве напряженного состояния в данной точке или об его изменении.

При измерениях «по сумме» можно судить о величине главных напряжений. Необходимо иметь в виду что:

- магнитный поток, проходя в поверхностном слое металла, характеризует напряженное состояние лишь у поверхности элемента;
- на результаты измерений оказывает значительное влияние начальная магнитная анизотропия металла;
- при последовательных нагрузках и разгрузках появляются петли магнитного гистерезиса, не связанные с механическими напряжениями.

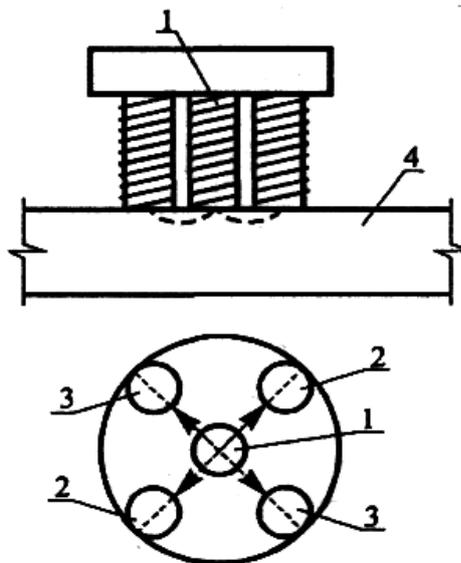


Рис. 45.  
 Схема чувствительного элемента прибора  
 Н. Н. Максимова для определения остаточных  
 напряжений: 1 – питающая катушка; 2 и 3 –  
 измерительные катушки;  
 4 – исследуемый элемент

Другим перспективным направлением оценки напряженного состояния металла по его магнитным характеристикам является метод «магнитных меток». Сущность его заключается в наведении внешним магнитным полем остаточной намагниченности в отдельных локализованных зонах исследуемого металла.

При изменении напряженного состояния последнего меняется и намагниченность этих "меток", являющихся таким образом своеобразными индикаторами механических напряжений. Наведение и индикация намагниченности меток производится с помощью

специальных переносных приборов. Рассматриваемый метод предложен для контроля натяжения арматуры в железобетонных конструкциях. Как наведение, так и индикация состояния гранитных меток, могут осуществляться на оголенной арматуре до ее бетонирования и в уже забетонированных деталях и конструкциях – через защитный слой бетона. Необходимо подчеркнуть следующее:

- данным методом выявляется лишь *изменение* напряженного состояния по сравнению с имевшим место при нанесении меток;
- переход от измерения остаточной намагниченности меток к механическому напряжению в арматуре может быть произведен лишь при наличии экспериментально установленной зависимости для *данной* арматуры, поскольку для разных меток металла эта зависимость не является стабильной;
- чередование нагрузок и разгрузок сопровождается появлением петель магнитного гистерезиса. Для исключения их влияния" требуется повторное нанесение меток перед переменной знака изменения напряжений.

Возможны и другие методы оценки напряженного состояния металла, например, по изменению электрического сопротивления (проводимости) и токовых вихревой, успешно разрабатываемые в настоящее время. Приборы рассматриваемого типа надежны и удобны.

**5.4. Приборы магнитно-индукционного типа.** Для выявления *положения и глубины залегания арматуры* предложены магнитометрические приборы, состоящие из *двух* постоянных магнитов, в центральной части магнитного поля, который расположен на оси небольшой магнит, соединенный со стрелкой–указателем. При приближении к арматуре напряженность магнитного поля в средней точке изменяется, что обуславливает возникновение магнитного момента, поворачивающего магнитик со стрелкой. Экстремум отклонения указателя соответствует расположению прибора на поверхности контролируемого изделия над осями арматурных стержней, а отклонение стрелки указывает на толщину защитного слоя бетона.

Принцип действия одного из наиболее распространенных приборов *индукционного типа* схематически показан на рис. 46. Индуктивный преобразователь *1* передвигается по поверхности исследуемой железобетонной конструкции или детали. Отдельно от него в корпусе прибора помещен аналогичный преобразователь с ферромагнитным смещаемым элементом *3*, предназначенным для изменения индуктивного сопротивления при балансировке схемы. По мере приближения преобразователя *1* к арматурному стержню разбаланс, зависящий от толщины защитного слоя, диаметра стержня и ориентировки преобразователя по отношению к его направлению, будет уменьшаться. Шкала отсчетного устройства прибора проградуирована в миллиметрах защитного слоя для арматурных стержней разного диаметра.

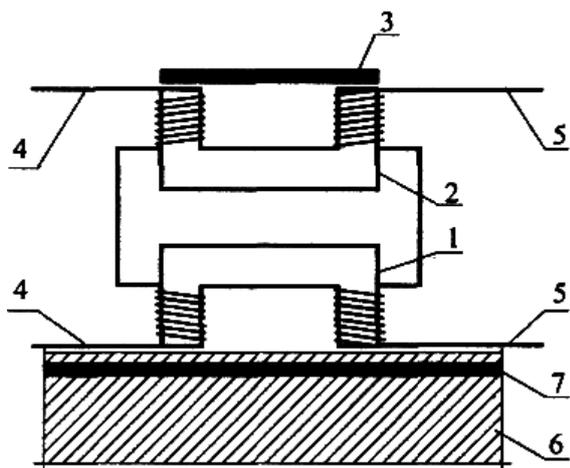


Рис. 46.

Индукционный прибор для проверки положения и диаметра арматуры и толщины защитного слоя:  
 1 – выносной индуктивный преобразователь; 2 – преобразователь в корпусе прибора; 3 – стержень для регулирования индуктивного сопротивления; 4 – проводка к источнику переменного тока; 5 – проводка к отсчетному устройству; 6 – железобетонный элемент; 7 – арматурный стержень

Установив расположение стержней, передвигают преобразователь вдоль контролируемого стержня до положения, соответствующего минимальному отсчету, следя за тем, чтобы преобразователь находился между пересечениями арматуры. Записав толщины защитного слоя по шкалам всех диаметров, повторяют отсчет, поместив между бетоном и преобразователем прокладку, толщиной, например, 10 мм из оргстекла, дерева или другого диамагнетика. Диаметр арматуры будет соответствовать той из шкал, разность отсчетов по которой окажется равной именно 10 мм.

**5.5. Определение влажности древесины.** По замеренному электрическому сопротивлению можно судить о состоянии материала в конструкции, пользуясь соответствующими зависимостями между электропроводимостью и влажностью для данного сорта дерева. Измерения производятся с помощью игольчатых электродов, заглубляемых в древесину на 5–10 мм, что характеризует электросопротивление ее поверхностного слоя. Для элементов, эксплуатируемых в течение длительного времени при постоянном температурно-влажностном режиме (например, для внутренних несущих конструкций в сооружениях), по этим данным можно судить о влажности по всей толщине сечений элементов.

## 6. Методы, основанные на использовании ионизирующего излучения

Неразрушающий контроль с помощью ионизирующих излучений эффективно используют во всех областях народного хозяйства. В настоящее время в строительстве широко применяют контроль рентгеновскими и гамма-излучениями для оценки физико-механических характеристик материалов и качества конструкций. При определении влажности материала оказывается целесообразным использование потока нейтронов. Преимуществом применения ионизирующих излучений является возможность быстрого и четкого получения определяемых характеристик. Работа с соответствующей аппаратурой хотя и не сложна, но требует наличия подготовленного для этой цели персонала. Необходимо также тщательное соблюдение требований техники безопасности во избежание вредного влияния ионизирующих излучений на организм человека.

**6.1 Область применения рентгеновского и гамма-излучений.** Наиболее важные направления для исследования дефектов в металлических конструкциях:

**1. Дефектоскопия сварных соединений.** На рис. 47 схематически показано просвечивание сварного шва. Наличие и положение дефекта выявляется на получаемом фотоснимке по более затемненному участку, воспроизводящему очертания

отмечаемого дефекта. О величине его в направлении просвечивания судят сравнивая интенсивность вызванного им затемнения с затемнением, соответствующим пропилам разной глубины на *эталоне чувствительности* (рис. 47,б) из аналогичного материала, проецируемым на тот же снимок. Глубина расположения дефекта выявляется смещением источника излучения параллельно фотопластинке. Схема определения положения дефекта незначительной толщины показана на рис. 48. При этом расстояние  $x$  от дефекта до поверхности снимка определяется из соотношения

$$x = \frac{cF}{c + c'}$$

где  $c$ ,  $c'$  и  $F$  – размеры, показанные на рис. 48.

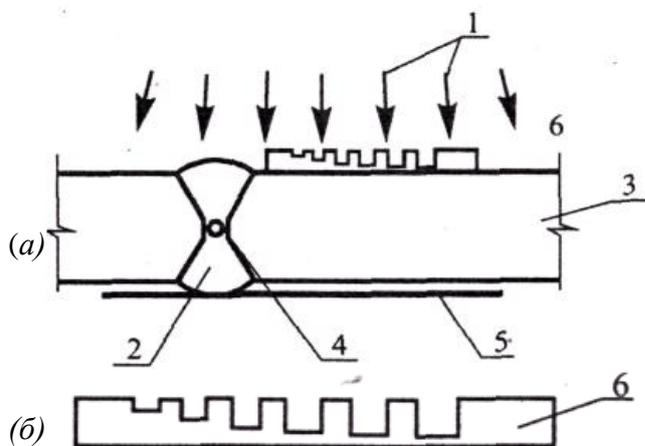


Рис. 47. Выявление дефекта в сварном шве: *a* – схема просвечивания; *б* – эталон чувствительности (дефектометр); 1 – ионизирующий поток; 2 – наваренный металл шва; 3 – основной металл; 4 – дефект; 5 – фотопленка; 6 – эталон чувствительности

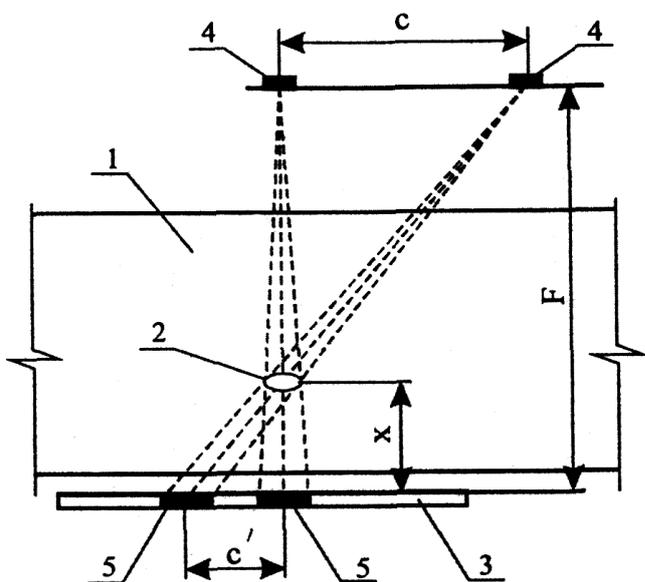


Рис. 48. Определение глубины расположения дефекта: 1 – просвечиваемый элемент; 2 – дефект; 3 – фотопленка; 4 и 4' – источник излучения в двух позициях; 5 и 5' – затемненные участки фотопленки;  $c$  – смещение источника излучения;  $c'$  – смещение центра заснятого изображения;  $F$  – фокусное расстояние;  $x$  – расстояние от фотопленки до горизонтальной оси дефекта

Дефекты незначительной толщины могут при этом остаться и не обнаруженными. Отсюда следует важный вывод, что при применении ионизирующих излучений могут быть пропущены серьезные дефекты, но с малым раскрытием в направлении просвечивания (например, расслоение металла). Во избежание этого просвечивание следует производить по двум несовпадающим направлениям. В то же

время именно перпендикулярные к заданному направлению дефекты наиболее четко устанавливаются ультразвуковыми методами, поскольку даже самые незначительные воздушные прослойки почти полностью гасят волны ультразвуковых колебаний. Оба метода контроля – ультразвуковой и с помощью ионизирующих излучений – таким образом, дополняют друг друга.

При дефектах одинакового размера и формы интенсивность потемнения будет наибольшей при совпадении направления дефекта с направлением просвечивания (рис. 49, поз. 2). При расположении дефекта под некоторым углом (рис. 49, поз. 2') излучения будут пересекать его по меньшему протяжению. Минимальная длина до пересечения, а следовательно, и наименьшая интенсивность потемнения, соответствует ориентировке дефекта перпендикулярно направлению просвечивания (рис. 49, поз. 2'').

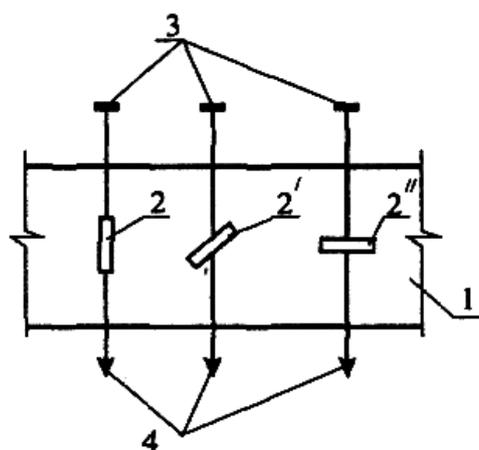


Рис. 49.  
К влиянию ориентации  
дефекта:  
1 – просвечиваемый  
элемент;  
2, 2', 2'' – различные  
ориентации дефекта;  
3 – источники излучения;  
4 – направления  
просвечивания

**2. Определение напряженного состояния металла.** Зная длину волны монохроматического рентгеновского излучения и угол падения его лучей на поверхность проверяемой детали, можно на основании замеров на соответствующих рентгенограммах вычислить основной параметр кристаллической структуры исследуемого материала – расстояние между центрами атомов в его кристаллической решетке. Сопоставляя полученное значение с величиной того же параметра в ненапряженном состоянии, можно определить упругую деформацию материала. Таким образом, может быть выделена (что без нарушения сплошности неосуществимо другими методами) *упругая* составляющая деформированного состояния металла: в сварных швах после их остывания, в зонах резких перепадов напряжений, в деталях, обработанных давлением, например гнутых профилях, и т. д. Измерения при этом производятся (что также очень существенно) на весьма малых участках поверхности (порядка десятых долей мм). Однако рассматриваемый метод требует применения сложной аппаратуры и большой тщательности всех измерений. В то же время напряжения могут быть оценены лишь со сравнительно незначительной точностью (для стали – порядка 100...200 кгс/см<sup>2</sup>). Дальнейшие разработки по усовершенствованию рентгеноскопического метода определения напряжений продолжаются. В бетоне и железобетоне производятся:

1) *определение объемной массы (плотности)* как уплотненной бетонной смеси, так и бетона в изделиях и конструкциях путем измерения ослабления или рассеивания потока гамма-излучений в бетоне. На рис. 50 схематически показано проведение соответствующих измерений. В *бетонную смесь* погружают зонды различной формы, при помощи которых получают значения плотности или послойно (рис. 50,а), или усредненно для всей высоты контролируемого слоя (рис. 50,б). Возможно также применение преобразователя поверхностного типа, регистрирующего рассеянное

излучение и не требующего погружения в толщу бетонной смеси. Контроль бетона в *готовых изделиях и конструкциях* толщиной до 500 мм, имеющих параллельные грани, осуществляется просвечиванием с применением П-образной скобы (рис. 50,б). При толщине более 500 мм, а также при одностороннем доступе к конструкции используется метод регистрации рассеянного излучения. В массивных конструкциях возможно также применение зондов, опускаемых в специально пробуренные отверстия. Измерения должны проводиться на расстоянии не менее 100 мм от края конструкции или формы (для бетонной смеси) и от арматуры диаметром от 8 мм. Значения плотности берутся по шкале регистрирующего прибора, проградуированной в единицах плотности;

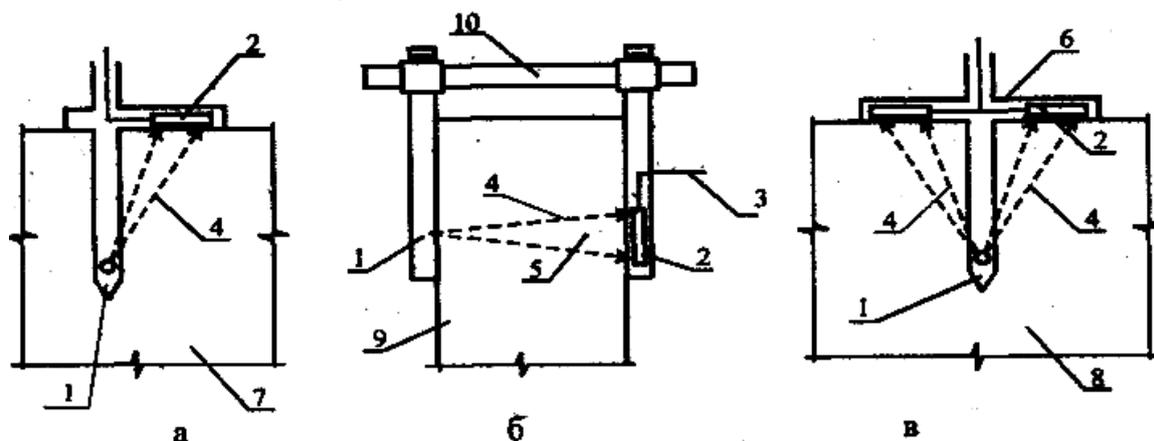


Рис. 50. Определение плотности бетона и бетонной смеси: *а* – Г-образный зонд; *б* – П-образная скоба; *в* – Т-образный зонд; 1 – источник излучения;

2 – приемник излучения; 3 – проводка к регистрирующему прибору; 4 – пучок излучений; 5 – рассеивание излучения; 6 – защитный экран; 7 – бетонная смесь; 8 – бетонная смесь или бетон (в изделиях и конструкциях); 9 – бетонный элемент; 10 – металлическая скоба

2) *контроль однородности и дефектоскопию* бетона производят сопоставлением результатов просвечивания в различных участках и точках конструкции. Отдельные дефектные участки целесообразно фиксировать на снимках. Для отчетливого выявления трещин просвечивание следует вести под углом не более  $5^\circ$  к их направлению;

3) *определение положения и диаметра арматуры, а также толщины защитного слоя бетона.* Схема просвечивания показана на рис. 51. Диаметр арматуры  $d$  и толщина защитного слоя бетона  $b$  определяются из выражений:

$$d = d' \frac{c}{c + c'}, \text{ где размеры } c, c', d' \text{ и } F \text{ показаны на рис. 51.}$$

Перспективным является применение легких переносных бетатронов, обладающих высокой чувствительностью и большой проникающей способностью излучения.

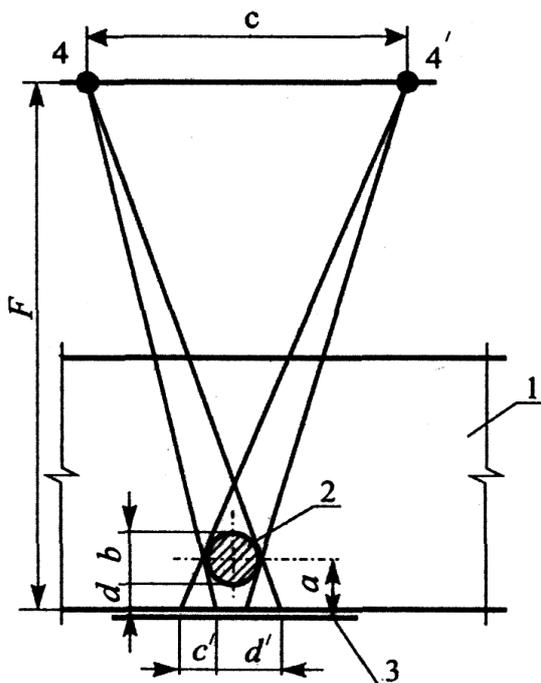


Рис. 51.

Определение диаметра арматуры и толщины защитного слоя бетона:  
 1 – просвечиваемый бетонный элемент;  
 2 – арматурный стержень; 3 – фотопленка, приложенная к нижней поверхности элемента;  
 4 и 4' – положения источника излучения;  $a$  – расстояние от центра стержня до нижней грани элемента;  $b$  – толщина защитного слоя;  
 $c$  – перемещение источника излучения;  
 $c'$  – сдвиг края проекции при перемещении источника излучения из 4 в 4';  $d$  – диаметр стержня;  $d'$  – проекция стержня на фотопленку;  $F$  – фокусное расстояние

**6.2. Область применения нейтронного излучения.** Для просвечивания деталей и конструкций применяют переносные источники нейтронных излучений. Поскольку нейтроны, как электрически нейтральные частицы, непосредственно на фотопленку не действуют, пользуются следующими приемами:

- 1) при «прямом» методе рядом с фотопленкой помещают нейтрон-активизируемый металлоэкран. Проходя через последний, нейтроны возбуждают в нем поток гамма-излучений, фиксируемый на пленке;
- 2) при «косвенном» методе облучению нейтронами подвергается металлический экран, который тотчас переносится в фотокассету, где наведенное гамма-излучение облучает пленку. Этот способ дает более четкие изображения. Применяются также и другие методы регистрации.

Особенностью нейтронного потока является то, что как замедление скорости нейтронов, так и их рассеивание тем значительнее, чем легче атомы просвечиваемого материала, и они оказываются наиболее эффективным, поэтому применение нейтронов для определения *влажности материалов* – бетона, древесины и др. (различаются при этом атомы водорода как свободной, так и химически связанной воды); выявления в бетоне *пор, заполненных водой*, которые почти совершенно не обнаруживаются другими методами; просвечивания *пластмасс*, в том числе расположенных за металлическими оболочками и т. д.

В сварных швах металлоконструкций нейтронными излучениями выявляются *ликвации* (неоднородности химического состава сплавов, возникающие при кристаллизации), не обнаруживаемые рентгеновскими и гамма-методами.

## 7. Радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия

Радиодефектоскопия (*радиоволновой метод*) основана на проникающих свойствах радиоволн сантиметрового и миллиметрового диапазонов. С помощью этого метода выявляются как прошедшие через материал электромагнитные колебания («теневого» метод), так и отраженные и рассеянные излучения путем изменения резонанса системы, образованной излучателем и исследуемым элементом (резонансный

метод), обнаруживаются поверхностные дефекты в неметаллических материалах типа пластмасс, древесины (в том числе и в клееных конструкциях), бетона, железобетона. Радиоволновой метод дает возможность исследовать как начальную стадию зарождения очагов нарушения сплошности, так и ход дальнейшего развития дефектов. Принцип использования метода следующий. От генератора, работающего в непрерывном или импульсном режиме, радиоволны проникают в конструкцию и с помощью усилителя регистрируются приемным устройством. С помощью радиоволнового метода представляется возможность определения влажности материалов.

В *тепловых методах* (инфракрасная дефектоскопия) регистрируются: 1) инфракрасное излучение от внешнего источника, отраженное от исследуемой конструкции или прошедшее сквозь него и 2) местные отклонения собственных инфракрасных излучений поверхности проверяемого элемента, нагретого, например, пропуском тока через электропроводящие материалы. Местные нарушения картины температурного поля являются чувствительными показателями наличия дефектов, в том числе и скрытых, не выявляемых при применении других методов контроля.

Инфракрасное излучение является электромагнитным излучением, занимающим спектральную область между красным концом видимого спектра с длиной волны  $\lambda = 0,74$  мкм и коротковолновым радиоизлучением с длинами волн  $\lambda = 1...2$  мм. Инфракрасное излучение используется для обнаружения непрозрачных для видимого света включений. Инфракрасное изображение дефекта можно получать в проходящем, отраженном и собственном излучении исследуемого объекта. Нагретые твердые тела испускают непрерывный инфракрасный спектр. При низких температурах (ниже  $600^{\circ}\text{C}$ ) излучение нагретого твердого тела почти целиком расположено в инфракрасной области. При повышении температуры доля излучения в видимой области увеличивается, и тело вначале кажется темно-красным, затем красным, затем желтым и, наконец, при высоких температурах – белым. Многие вещества, прозрачные в видимой области, оказываются непрозрачными в некоторых областях инфракрасного излучения и наоборот. Так, слой воды в несколько сантиметров непрозрачен для инфракрасного излучения; пластинки германия и кремния, непрозрачные в видимой области, прозрачны в инфракрасной. У большинства материалов отражательная способность для инфракрасного излучения значительно больше, чем для видимого света. Мощным источником инфракрасного излучения является солнце, около 50% излучения которого лежит в инфракрасной области. Значительная доля (от 70 до 80%) энергии излучения ламп накаливания с вольфрамовой нитью приходится на инфракрасное излучение.

Приемники инфракрасного излучения основаны на преобразовании энергии инфракрасного излучения в другие виды энергии, которые могут быть измерены обычными методами. В тепловых приемниках инфракрасного излучения регистрируется повышение температуры термочувствительного элемента. В фотоэлектрических приемниках поглощенное инфракрасное излучение приводит к появлению или изменению электрического тока или напряжения. Фотоэлектрические приемники обладают селективными свойствами, т. е. являются чувствительными лишь в определенной области спектра. На специальных фотопленках и пластинках в инфракрасном излучении могут быть получены фотографии. Отмеченное свойство позволяет оперативно дистанционно анализировать качество ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Для преобразования инфракрасного излучения в видимое используются так называемые *тепловизоры*. В этих приборах воспроизводится разность температур на поверхности предмета визуально. Прибор производит развертку поля зрения и передает

инфракрасные излучения на детектор, который преобразует инфракрасный сигнал в электрический. После усиления этого сигнал регулирует интенсивность пучка в трубке телевизионного устройства. Пучок развертывается на экране и дает изображение, наблюдаемое с помощью прибора. На экране возникает тепловая картина: более светлые участки соответствуют поверхностям предмета с более высокими температурами. Тепловизоры позволяют оценить качество заделки швов.

## 8. Приборы неразрушающего контроля нового поколения

В последние годы в странах СНГ (особенно в России) создан целый комплекс малогабаритных электронных приборов неразрушающего контроля и неразрушающей дефектоскопии, которые позволяют:

- *определять* влажность, температуру и коэффициент теплопроводности различных материалов, из которых изготовлены строительные конструкции;
- *выявлять* наличие микротрещин, выходящих на поверхность металлоконструкций, ферромагнитных деталей и сварных швов;
- косвенно *контролировать* прочность бетона, толщину защитного слоя и диаметр арматуры в железобетонных конструкциях.

В России разработкой и производством электронных приборов нового поколения успешно занимается НПО "Карат", СКВ "Стройприбор, ООО НПП Интерприбор и др. Все выпускаемые приборы сертифицированы Госстандартом России и широко используются как внутри страны, так и за рубежом. Созданные приборы обладают большим набором сервисных функций и универсальностью, имеют легкие и удобные датчики нестандартной конструкции. Они оснащены автономной 9-клавишной клавиатурой и графическим дисплеем с подсветкой, обеспечивают высокий уровень информативности, легко адаптируются к условиям пользователя. *Высокая достоверность* измерений обеспечивается специальной интеллектуальной обработкой собранной информации с учетом ряда технических, эргономических и технологических факторов. Все приборы имеют автономный высокоскоростной процессор и электронную записную книжку для хранения информации, собранной в полевых условиях. Одновременно созданные приборы оснащены интерфейсами и имеют инфракрасную связь с компьютером, позволяющую сбрасывать всю информацию, накопленную в полевых условиях, в память персонального компьютера. Разработанные приборы оснащены специальными компьютерными программами для считывания памяти приборов, хранения и документирования полученных результатов измерений.

Технические параметры и область применения некоторых из указанных приборов более детально представлены ниже.

**8.1. Прибор ВИСТ-2.4 для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры.** Предназначен для измерения среднеквадратического значения виброскорости, амплитуды и частоты колебаний виброустановок, используемых для уплотнения бетонной смеси при изготовлении железобетонных изделий, а также для измерения параметров вибрации других объектов (машин, механизмов, фундаментов). Применим для балансировки вентиляторов.

Прибор фиксирует 600 результатов измерений (виброскорость, виброперемещение, коэффициент гармоник, частоту), дату и время измерений, имеет возможность выбора объекта контроля (виброплощадка, фундамент, вентилятор, двигатель), режима индикации измерений и программно переключаемый диапазон измерений. Вибродатчик имеет магнитное основание для крепления на рабочей поверхности. Кроме того, датчик предусматривает винтовое крепление и съём показаний при помощи малогабаритного съёмного щупа. Для этого в центре основания датчика выполнено резьбовое отверстие.



**Технические характеристики:**

Диапазон измерения виброскорости, мм/с	0.1...500
Диапазон измерения амплитуды виброколебаний, мм	0.01...10
Диапазон измерения частоты, Гц	2...500
Пределы основной относительной погрешности измерения амплитуды и виброскорости, %	± 6.0
Пределы основной относительной погрешности измерения частоты, %	± 0.2
Габаритные размеры электронного блока, мм:	150x80x32
Масса электронного блока и датчика, кг:	0.3

**8.2. Прибор ОНИКС – 2.5 для контроля прочности, плотности и однородности материалов.** Прибор предназначен для контроля прочности бетона на сжатие неразрушающим ударно-импульсным методом (ГОСТ 22690–88) при технологическом контроле качества, обследовании зданий, сооружений и конструкций. Применяется для контроля прочности кирпича, прочности и однородности композиционных материалов, растворных швов, штукатурки и т.п.



**Технические характеристики:**

Диапазоны измерения прочности, МПа:	1–30 / 5–100
Основная относительная погрешность измерения прочности, %	±8,0
Габаритные размеры электронного	

блока, мм:	150 x 80 x 32
Масса электронного блока и датчика, кг:	0.3

В приборе реализован двухпараметрический метод измерения (ударный импульс + отскок), повышающий достоверность результатов, есть режим хранения и просмотра массива единичных результатов для дополнительной компьютерной обработки, графическая форма отображения результатов, возможность пользователю ввести собственные градуировочные зависимости, и с помощью компьютера задать в приборе собственные названия материалов. В памяти регистрируются номер серии измерений, результаты, коэффициент вариации, вид материала, время и дата измерений. Диапазон измерения выбирается пользователем через меню. Оригинальная конструкция датчика–склерометра дает возможность пользователю работать одной рукой и выполнять измерения в труднодоступных местах конструкций с высокой интенсивностью и точностью нанесения ударов. Современный материал корпуса датчика обеспечивает надежную и комфортную работу при низких температурах.

**8.3. Прибор ОНИКС – для контроля прочности, плотности и однородности материалов.**  
Предназначен для определения прочности бетона методом отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690–88.



**Технические характеристики:**

Диапазон измерения прочности, МПа	5...100
Усилие вырыва анкера, кН	0...50
Основная относительная погрешность измерения нагрузки, %	±2,0
Габаритные размеры, мм	
Пресса	300x80x162
Электронного блока	150x80x32
Масса прибора, кг	3.7

Применяется в особо ответственных случаях при обследовании ж/б конструкций и сооружений, а также для корректировки калибровочных коэффициентов ударно-импульсных (ОНИКС–2.5) и ультразвуковых (ПУЛЬСАР–1.1) приборов. Прибор с дополнительными приспособлениями может использоваться для испытания растворных образцов, цементных балочек, кусковых проб пород, для определения адгезии плитки и покрытий.

В отличие от аналогов выполнен в виде облегченного портативного гидравлического пресса с кольцевым креплением анкера в шпуре, исключающим проскальзывание, что позволило существенно улучшить метрологические и эксплуатационные характеристики. Микропроцессорное устройство обеспечивает полный контроль процессов нагружения и измерения: индикацию рекомендуемой и фактической скоростей нагружения, прикладываемого усилия с фиксацией вырыва,

вычисление прочности и регистрацию результатов с привязкой ко времени и дате. Предусмотрен выбор по виду и возраста бетона, способа твердения и типоразмеру анкера. Прибор предназначен для работы при температуре окружающей среды от  $-10$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , максимальной влажности 90% при  $25^{\circ}\text{C}$  и ниже без конденсации влаги и атмосферном давлении 86...106 кПа.

Базовый комплект поставки: электронный блок, гидравлический пресс, расточное приспособление, набор анкеров, аккумуляторы типа АА (2 шт.), зарядное устройство, приборный чехол и руководство по эксплуатации.

**8.4. Прибор ПУЛЬСАР-1.0/1.1 для контроля прочности, плотности и однородности материалов.** Предназначен для измерения времени и скорости распространения УЗ колебаний в твердых материалах при сквозном и поверхностном прозвучивании. Прибор позволяет определять прочность бетона (ГОСТ 17624) и кирпича (ГОСТ 24332), выявлять дефекты (трещины, пустоты), оценивать несущую способность железобетонных конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.



бетонных конструкций, пористость и трещиноватость горных пород, степень анизотропии и текстуру композитных материалов.

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения времени, мкс	10...9999
Пределы основной относительной погрешности измерения времени, не более, %	$\pm 1,0$
Рабочая частота колебаний, кГц	60...100
Габаритные размеры, мм:	160x120x30
Масса электронного блока и датчика ("Пульсар-1.1"), кг:	0.86

Прибор вычисляет прочность, плотность, модуль упругости и звуковой индекс абразивных материалов по предварительно установленным градуировочным зависимостям, позволяет определить глубину трещин при поверхностном прозвучивании (русский и английский варианты). Имеется возможность визуализации принимаемого сигнала на экране осциллографа. Конструкция датчиков обеспечивает работу прибора с сухим контактом (титановые наконечники) на фиксированной базе 120 мм, с сухим контактом (титановые наконечники или полиуретановые протекторы) при сквозном, поверхностном и угловом прозвучивании на произвольной базе. По сравнению с "Пульсар-1.0" прибор "Пульсар-1.1" имеет дополнительный набор сервисных функций (определение глубины трещин, оценка прочности бетонов неизвестного состава), большой графический дисплей (160\*160 точек), используемый в "Пульсаре-1.1", позволил реализовать более удобное меню с системой подсказок пользователю, кроме того "Пульсар-1.1" имеет меньшие габариты и массу. В новом приборе имеется возможность программирования названия материалов в меню прибора при помощи компьютера и специальной программы.

**8.5. Прибор ВИБРАН–2.0 для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры.**

Малогабаритный прибор, предназначенный для вибродиагностики конструкций, фундаментов, оснований, мостовых сооружений, строительных изделий, абразивов, вибрационного оборудования, двигателей, турбин, вентиляторов, в частности, для анализа реакции конструкций на ударное воздействие.



**Технические характеристики:**

Диапазон частот, Гц	0.5...100, 1...200
Диапазон амплитуд виброперемещения, 0.01...5.0	
Диапазон виброскорости, мм/с	0.1...500
Основная относительная погрешность, не более, %	±5.0
Габаритные размеры, мм:	150x80x32
Масса электронного блока и датчика, кг:	0.25

Применяется для поиска различных дефектов структуры методом сопоставления реакций объектов с эталонным спектром, в том числе при разбраковке различных изделий. Позволяет выполнять анализ периодических и непериодических процессов колебаний по одной выбранной пространственной координате, а также: производить запись виброколебаний (в задаваемых временных рамках с автоматическим запуском по выбранному пороговому уровню) и получать их разложение по 200 линиям спектра; осуществлять запись гармонических процессов с автоматическими масштабированием и выделением низшей гармоники в сигнале, получать 7 гармоник разложения в ряд Фурье; просматривать на дисплее форму сигналов и их спектр; сохранять до 160 выборок виброколебаний и их спектральный состав; производить пересылку через USB-порт и дополнительную компьютерную обработку записанных реализаций процессов виброколебаний, осуществлять октавный и 1/3 октавный анализ; выполнять усреднение спектров; получать результаты измерений по виброскорости, виброперемещению и виброускорению в виде среднеквадратических и амплитудных значений.

**8.6. Прибор ВИБРАН–3.0 для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры.**

Предназначен для многоканальной вибродиагностики конструкций, фундаментов, оснований, мостовых сооружений, строительных изделий, вибрационного оборудования,



компрессорных станций, двигателей, турбин, и т.п., а также для анализа реакции конструкций на ударное воздействие. Применяется для поиска дефектов структуры

различных объектов методом сопоставления их реакций с эталонным спектром, в частности при разбраковке керамических и абразивных изделий.

**Технические характеристики:**

Количество каналов измерений	4
Диапазон частот, Гц	0.5...100,
Диапазон виброскорости, мм/с	0.1...500
Количество линий в спектре	200
Предел погрешности, %	±5.0
Время записи колебаний, с	0,2...2; 2...20
Габаритные размеры электронного блока, мм:1	60x120x30
Масса электронного блока, кг	0,26

ВИБРАН–3.0 позволяет выполнять анализ виброколебаний по четырём каналам, а также: производить запись виброколебаний (в задаваемых временных рамках с автоматическим запуском по задаваемому пороговому уровню или по сигналу внешней синхронизации) и получать их разложение по 200 линиям спектра; просматривать на дисплее форму сигналов и их спектр; выполнять анализ временных характеристик сигналов (режим осциллографа); сохранять до 80 выборок виброколебаний и их спектральный состав; производить пересылку на компьютер по USB интерфейсу и дополнительную компьютерную обработку записанных реализаций процессов виброколебаний, осуществлять октавный и 1/3 октавный анализ; получать до 2000 линий спектра, оценивать выбросы и общий уровень вибраций; выполнять усреднение спектров; получать результаты измерений по виброскорости и виброперемещению (амплитудные значения).

**8.7. Прибор ВИСТ–2.4 для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры.**

Предназначен для измерения среднеквадратического значения виброскорости, амплитуды и частоты колебаний виброустановок, используемых для уплотнения бетонной смеси при изготовлении железобетонных изделий, а также для измерения параметров вибрации других объектов (машин, механизмов, фундаментов). Прибор фиксирует 600 результатов измерений (виброскорость, виброперемещение, коэффициент гармоник, частоту), дату и время измерений, имеет возможность выбора объекта контроля



(виброплощадка, фундамент, вентилятор, двигатель), режима индикации измерений и программно переключаемый диапазон измерений. Вибродатчик имеет магнитное основание для крепления на рабочей поверхности. Кроме того, датчик предусматривает винтовое крепление и съём показаний при помощи малогабаритного съёмного щупа. Для этого в центре основания датчика выполнено резьбовое отверстие.

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения виброскорости, мм/с	0.1...500
Диапазон измерения амплитуды виброколебаний, мм	0.01...10

Диапазон измерения частоты, Гц	2...500
Пределы основной относительной погрешности измерения амплитуды и виброскорости, %	±6.0
Пределы основной относительной погрешности измерения частоты, %	0.2
Габаритные размеры электронного блока, мм:	150x80x32
Масса, кг:	0.3

**8.8. Прибор ИНК–2.4 / 2.4К для измерения параметров виброколебаний и натяжения арматуры.** Назначение прибора – измерение частотным методом (ГОСТ 22362–77) механических напряжений в элементах стержневой, проволочной и прядевой арматуры железобетонных изделий и конструкций, а также параметров виброколебаний (частота, виброскорость и виброперемещение) различных объектов.



**Технические характеристики:**

Диапазоны измерения:

– частоты, Гц	5...200
– механических напряжений, МПа	50...2000
– амплитуды виброколебаний, мм	0.01...10
– виброскорости, мм/с	0.1...500

Пределы основной относительной погрешности измерения:

– частоты, %	±0.2
– механических напряжений, %	±4.0
– амплитуды колебаний и виброскорости, %	±6.0

Питание от 2 аккумуляторных батарей типоразмера АА, В 2.5±0.5

Габаритные размеры электронного блока, мм: 150x80x32

Масса, кг: 0.28

Приборы индицируют: а) в режиме измерения напряжений – величину напряжения в МПа и его отклонение от проектного значения в %, поправку на длину реза арматурного стержня, б) в режиме виброметра – виброскорость, виброперемещение и частоту. Предусмотрена регистрация 1200 результатов измерений и вида объекта контроля (600 результатов в режиме измерения напряжений и 600 результатов в режиме виброметра).

**8.9. Прибор ВИМС – 2.2 для контроля влажности материалов.** Серия измерителей влажности материалов ВИМС–2 предназначена для измерения влажности широкой номенклатуры строительных материалов по ГОСТ 21718 (песка, бетона, кирпича) и древесины по ГОСТ 16588 (сосны, ели, лиственницы, березы, дуба, бука, осины, липы и др.), в том

числе в изделиях и конструкциях. Основной областью применения приборов являются различные виды строительного производства и технологий, в которых влажность материалов регламентируется нормативно-технической или технологической документацией. Влагомеры легко программируются потребителем под любые виды твёрдых материалов путем установки индивидуальных коэффициентов преобразования и могут



использоваться для контроля влажности широкой номенклатуры твёрдых и сыпучих материалов: кожа, ткани, композиты, глина, грунт и др. Приборы индуцируют: влажность и вид контролируемого материала, номер, время и дату измерения

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения влажности, % :

- древесины 5...30
- твердых строительных материалов 0.5...20
- песка 1...12

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения влажности, %: ±3

Размеры измерительного блока, мм: 150x70x31  
 Масса, кг, не более: 0.32

Пользователь имеет возможность самостоятельно провести испытания и ввести в прибор более 20 индивидуальных градуировочных зависимостей для нужных ему материалов. Изготовителем по спецзаказу производится определение коэффициентов настройки на индивидуальные материалы заказчика. Для уменьшения влияния качества поверхности, неоднородности (для твёрдых) и степени уплотнения (для сыпучих) контролируемых материалов в приборах предусмотрена обработка серии измерений. Влагомеры могут комплектоваться датчиками типов:

- объёмно-планарный для контроля влажности сыпучих и твёрдых материалов;
- зондовый для контроля влажности в скважинах твердых материалов, на глубине пластичных и сыпучих материалов.

**8.10. Прибор ВИМС–2.1 для контроля влажности материалов.** Серия измерителей ВИМС–2.1 предназначена для измерения влажности широкой номенклатуры твёрдых материалов: бетона, древесины (16 различных пород: берёза, бук, дуб, ель, кедр, клён, липа, лиственница, ольха, орех, осина, пихта, сосна, тополь, яблоня, ясень), цементной стяжки

и других материалов (9 свободно программируемых материалов).

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения влажности, % :

- древесины 5...30
- твердых строительных материалов 0.5...20

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности измерения влажности, %:

- для древесины ±3
- для твердых строительных материалов ±2

Габаритные размеры, мм, не более: 150x70x31

Масса, кг, не более: 0.66



ВИМС–2.1 имеет встроенный в электронный блок измерительный датчик. Прибор индицирует: влажность, вид материала, номер, время и дату измерения. Выпускается с базовой настройкой, однако для повышения точности рекомендуется дополнительная калибровка прибора на образцах потребителя. Пользователь имеет возможность самостоятельно провести испытания и ввести в прибор 9 индивидуальных градуировочных зависимостей для нужных ему материалов. Изготовителем по спецзаказу производится определение коэффициентов настройки на индивидуальные материалы заказчика. Варианты исполнения прибора:

– ВИМС–2.10 – предназначен для измерения влажности древесины, комплектуется встроенным в измерительный блок датчиком. Упрощенная версия: пользователь не имеет возможности корректировать градуировочные коэффициенты, нет связи с компьютером и фиксации времени и даты измерений;

– ВИМС–2.11 – предназначен для измерения влажности древесины, комплектуется встроенным в измерительный блок датчиком. Полная версия: возможность корректировать имеющиеся градуировочные коэффициенты и введение новых зависимостей для материалов пользователя (8 материалов), связь с компьютером с фиксацией времени и даты измерений;

– ВИМС–2.12 – предназначен для измерения влажности древесины, твердых и сыпучих строительных материалов. Комплектуется датчиком, встроенным в измерительный блок (измерение влажности древесины и твердых строительных материалов) и по заказу зондовым датчиком для измерения влажности твердых (в скважинах) и сыпучих строительных материалов.

**8.11. Приборы ИТС – 1: измерители теплопроводности материалов.**

Измеритель теплопроводности ИТС–1 предназначен для измерения теплопроводности и термического сопротивления широкого спектра строительных и тепло-изоляционных материалов



стационарным методом в соответствии с ГОСТ 7076–99.

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения теплопроводности, Вт/(м*К)	0.02...1.5
Относительная погрешность измерения теплопроводности, %	±5,0
Время измерения, час.	0,5...2,5
Напряжение питания, В	~220
Габаритные размеры, мм	265x190x120
Масса, кг	6,5
Память результатов, количество измерений	200

**Прибор ПОИСК–2.4.** Применение новых технических решений и алгоритмов математической обработки информации позволило существенно повысить достоверность измерений. Условия измерений выбираются пользователем с помощью экранных меню. Основные функции: автоматический цикл измерений; автоматическая регистрация результатов и условий измерений; диалоговый режим работы пользователя с прибором через систему меню; полноценное отображение результатов на графическом дисплее с подсветкой; язык текстовых сообщений – русский, английский.



#### **Технические характеристики:**

Диапазоны измерений толщины защитного слоя бетона, мм

- для диаметров арматуры 3...12 мм 2...100
- для диаметров арматуры 14...30 мм 3...120
- для диаметров арматуры 32...50 мм 10...130

Межарматурное расстояние, мм, не менее:

- для диаметров арматуры 3...11 мм 100
- для диаметров арматуры 12...50 мм 200

Порог чувствительности нахождения арматуры, мм 250

Абсолютная погрешность измерения толщины защитного слоя, мм  $\pm(0.03h+0.5)$

Габаритные размеры электронного блока, мм: 150x80x32

Масса электронного блока и датчика, кг: 0.54

**8.12. Прибор ТЕМП-3: Термометры – Гигрометры – Регистраторы.** Семейство приборов ТЕМП-3 разработано для измерения и регистрации влажности неагрессивных воздушных сред и температуры жидких, газообразных сред, сыпучих материалов, битума, поверхностей твердых материалов и других применений. Выпускаются в нескольких модификациях с различным исполнением датчиков, в зависимости от назначения, конструкции, условий эксплуатации, инерционности и температурного диапазона. Варианты используемых термопреобразователей: термомпары ХА и ХК, термометры



сопротивления Pt. Варианты конструктивного исполнения термодатчиков: а) датчики погружного типа для контроля жидких, газообразных и пластичных (напр. битум) сред, б) датчики для контактного измерения температуры поверхности твердых материалов. Прибор предназначен для работы при температуре окружающей среды от  $-10$  до  $+50$  °С, максимальной влажности 90% при 25 °С и ниже без конденсации влаги и атмосферном давлении 86...106кПа.

**Технические характеристики:**

Диапазон измерения температуры, °С  $-50...+200...+1000$

Дискретность измерения температуры, °С 0.1

Класс точности измерения температуры 0.5; 1.0;

Диапазон измерения относительной влажности, % 0...100

Предел основной абсолютной погрешности измерения влажности, %  $\pm 2.0$

Период регистрации 2 с...24 час

Память результатов до 3600

Питание от 2 аккумуляторных батарей типоразмера АА, В  $2.5 \pm 0.5$

Габаритные размеры прибора, мм: 150 x 80 x 32

Масса прибора, кг 0.14

**8.13. Прибор ИПС-МГ4.01 для измерения прочности бетона (метод ударного импульса по ГОСТ 22690).** Прибор ИПС-МГ4.01 предназначен для оперативного неразрушающего контроля прочности и однородности бетона и раствора методом ударного импульса по ГОСТ 22690.

Область применения прибора – определение прочности бетона, раствора на предприятиях стройиндустрии и объектах строительства, а также при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений.



#### Технические характеристики ИПС–МГ4.01:

Диапазон измерения прочности, МПа	3...100
Предел погрешности измерения, %	10
Объем архивируемой информации, значений	500
Количество индивидуальных градуировочных зависимостей, шт.	9
Количество базовых градуировочных зависимостей, шт.	1
Связь с компьютером:	Интерфейс RS–232
Габаритные размеры, мм:	
– электронного блока	175x90x30
– склерометра	155x90x50
Масса, не более, кг.	0,85

Приборы могут применяться для контроля прочности кирпича и строительной керамики. В отличие от аналогов, прибор снабжен: устройством ввода коэффициента совпадения  $K_c$  для оперативного уточнения базовых градуировочных характеристик в соответствии с Приложением № 9 ГОСТ 22690; устройством маркировки измерений типом контролируемого изделия (балка, плита, ферма и т.д.); функцией вычисления класса бетона В с возможностью выбора коэффициента вариации; функцией исключения ошибочного промежуточного значения. Измерение прочности бетона заключается в нанесении на контролируемом участке изделия серии до 15 ударов, электронный блок по параметрам ударного импульса, поступающим от склерометра, оценивает твердость и упругопластические свойства испытываемого материала, преобразует параметр импульса в прочность и вычисляет соответствующий класс бетона. Алгоритм обработки результатов измерений включает: усреднение промежуточных значений; сравнение каждого промежуточного значения со средним, с последующей отбраковкой аномальных результатов; усреднение оставшихся после отбраковки промежуточных значений; индикацию и запись в память конечного значения прочности и класса бетона.

**8.14. Приборы ПОС–30МГ4 и ПОС–50МГ4 для измерения прочности бетона (метод отрыва со скалыванием по ГОСТ 22690).** Приборы предназначены для неразрушающего контроля прочности бетона методом отрыва со скалыванием. Область применения приборов – определение прочности бетона на объектах строительства, при обследовании зданий и сооружений, а также для уточнения градуировочных характеристик ударно – импульсных и ультразвуковых приборов, в соответствии с Приложением №9 ГОСТ 22690. Отличительной особенностью приборов



является электронный силоизмеритель, обеспечивающий индикацию текущего значения приложенной нагрузки с фиксацией максимального значения, а также индикацию скорости нагружения в процессе испытаний. С целью повышения точности и удобства эксплуатации в приборах предусмотрена возможность установки следующих параметров: вида бетона (тяжелый/легкий), вида твердения (нормальное / ТВО), предполагаемой прочности бетона (< 50МПа / > 50МПа), типоразмера анкера. Занесенные в память приборов результаты измерения маркируются типом контролируемого изделия, датой и временем измерения. Индикация цифровая в кН и МПа.

**Технические характеристики:**

Наименование характеристик	ПОС–30МГ4	ПОС–50МГ4
Диапазон измерения прочности, МПа		5...100
Усилие вырыва анкера, кН	29,4	49
Основная относительная погрешность измерения силы, не более, %		± 2
Питание автономное (элемент типа "Корунд" 6LR61), Вольт		6...9
Габаритные размеры, мм:	175x90x30(70x75x45)	
Масса прибора не более, кг	4,2	5,0

**8.15. Микроскоп измерительный МПБ – 3М (для определения ширины раскрытия трещин на поверхности бетона).** Микроскоп предназначен для рассмотрения с увеличением 25 крат и 50 крат различных предметов и измерения их линейных размеров в отраженном и проходящем свете. Микроскоп может быть использован в различных областях промышленности, науки и образования с целью: испытаний материалов (твердость, износ); контроля печатных плат; проведения экспертиз; изучения и измерения микрообъектов бесконтактным способом; определения ширины раскрытия трещин на поверхности бетона при обследовании зданий и сооружений.



**Технические характеристики:**

Наименование характеристик	С объективом 4X	С объективом 2X
Диапазон измерений, мм	0...3,5 включительно	0...7 включительно
Поле зрения, не менее, мм	4,5	9
Видимое увеличение, крат	50 ± 2,5	25 ± 1,2
Масса прибора, не более, кг	0,5	

**8.16. Прибор ЭИН–МГ4 для измерения напряжений в арматуре частотным методом.**

Прибор ЭИН–МГ4 предназначен для оперативного производственного контроля предварительных напряжений в стержневой, проволочной и канатной арматуре железобетонных конструкций частотным методом по ГОСТ 22362. В отличие от аналогов прибор ЭИН–МГ4 имеет функции автоматического выполнения технологических расчетов: заданного удлинения АРМа-туры, длины арматурной заготовки, корректировки расстояния между анкерными головками. Для пользователей, производящих несколько типов предварительно-напряженных предусмо-



трена возможность установки и запоминания пяти комбинаций исходных данных (расстояние между упорами форм, диаметр и класс арматуры, проектное напряжение в арматуре). Прибор снабжен энергонезависимой памятью результатов измерений и эффективным двухкаскадным цифровым фильтром, обеспечивающим подавление электромагнитных помех и помех гармонического состава колебаний арматуры. В процессе измерений прибор автоматически производит несколько замеров частоты

колебаний арматуры, сравнивая их между собой, отбирает достоверную величину и преобразует ее в механическое напряжение в соответствии с алгоритмом вычислений. Индикация результата измерения – цифровая, в МПа. Прибор имеет режим тест-контроля.

**Технические характеристики:**

Наименование характеристик	ЭИН–МГ4
Диапазон измеряемых напряжений, МПа	100...1800
Диапазон контролируемых диаметров арматуры, мм	3...32
Диапазон контролируемых длин арматуры, м	3...18
Основная погрешность измерения частоты, не более, %	±0,4
Основная погрешность измерения напряжений, не более, %	±3
Время одного цикла измерения, сек	2...5
Питание от батареи типа "Корунд" (6LR61), В	6...9
Габаритные размеры, мм	175x90x30
Масса с датчиком, не более, кг	0,5

**8.17. Прибор ИПА–МГ4 для измерения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.** Прибор ИПА–МГ4 предназначен для оперативного контроля толщины защитного слоя бетона и расположения стержневой арматуры в железобетонных изделиях и конструкциях магнитным методом по ГОСТ 22904. Область применения прибора – определение параметров армирования железобетонных конструкций и сооружений на предприятиях стройиндустрии, стройках и при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений. Прибор ИПА–МГ4 имеет три основных режима работы: определение оси арматурного стержня; определение защитного



слоя при известном диаметре; определение диаметра арматурного стержня при известном защитном слое. Поиск оси арматурных стержней осуществляется по изменению тональности звукового сигнала и по показаниям цифрового дисплея.

Предусмотрена возможность выбора класса контролируемой арматуры и режим юстировки преобразователя. Прибор имеет энергонезависимую память 127 результатов измерений.

**Технические характеристики:**

Наименование характеристик	ИПА–МГ4
Контролируемые диаметры арматуры, мм	3...40
Диапазон измерения толщины защитного слоя бетона, мм:	
– при диаметре стержней арматуры 3...10мм	3...40
– при диаметре стержней арматуры 12...40мм	5...100

Диапазон определения расположения арматурных стержней, мм:	
– диаметрами от 3 до 10мм при толщине защитного слоя бетона	до 40
– диаметрами от 12 до 40мм при толщине защитного слоя бетона	до 100
Погрешность измерения толщины защитного слоя бетона в основном режиме, не более, мм	$\pm (0,05h_{зс} + 0,5\text{мм})$ , где $h_{зс}$ – толщина защитного слоя бетона
Погрешность определения оси арматурного стержня от действительного расположения для всех диаметров стержней при максимальной глубине их залегания, мм	$\pm 5$
Габаритные размеры электронного блока, мм:	175x90x30
Масса с датчиком, кг	0,9

## 9. Методы оптических испытаний

**Поляризационно-оптический метод.** Среди экспериментальных методов исследования сложного напряженного состояния поляризационно-оптический метод является основным.

Этот метод основан на свойстве большинства прозрачных изотропных материалов (стекло, целлулоид, материалы, полученные на основе эпоксидных смол, и др.) приобретать под действием напряжений (деформаций) способность двойного лучепреломления, величину которого измеряют оптическими приборами при просвечивании модели поляризованным светом. Свойство поляризации и свойство двойного лучепреломления – оптические явления, лежащие в основе поляризационно-оптического метода.

Для исследования напряженного состояния из оптически активного материала изготавливают модель узла или детали конструкции, которую просвечивают в специальной установке – полярископе (рис. 52). Просвечивают пучком плоскополяризованного света, в котором световые колебания, в отличие от пучка естественного света, происходят в одной плоскости. Для поляризации естественный луч света (рис. 52) пропускают через поляризатор, например призму Николя, изготовленную из кристаллов исландского шпата, или специальные поляроиды. Кроме поляризатора, в полярископе есть анализатор, аналогичный по конструкции поляризатору. В зависимости от взаимного расположения плоскостей поляризации поляризатора  $П—П$  и анализатора  $А—А$  освещенность экрана, расположенного за анализатором, будет меняться: при их совпадении—освещенность максимальная; при взаимно перпендикулярном расположении прошедший сквозь поляризатор луч будет полностью погашен анализатором. Такое явление наблюдается в том случае, если между поляризатором и анализатором нет модели или она есть, но не нагружена.

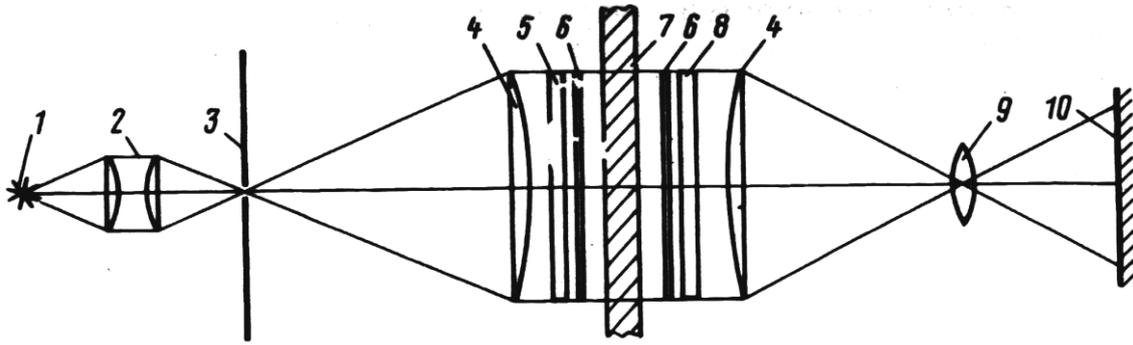


Рис. 52. Схема полярископа: 1 – источник света, 2 – конденсор; 3 – диафрагма; 4 – линзы; 5 – поляризатор; 6 – слюдяные пластинки; 7 – исследуемая модель; 8 – анализатор; 9 – линза камеры; 10 – экран

Если модель нагрузить в ее плоскости, то плоскополяризованный луч, проходя сквозь нее, из-за двойного преломления разложится на два луча, плоскости колебания у которых взаимно перпендикулярны и совпадают с направлением главных напряжений (рис. 53). Оптические свойства материала зависят от значений главных напряжений, поэтому скорости лучей и время прохождения их через модель различны. Экспериментально установлено: разность скоростей лучей пропорциональна разности главных напряжений. Закон фотоупругости в количественном отношении выражается уравнением

$$\delta = C_{\lambda} h (\sigma_1 - \sigma_2), \quad (1)$$

где:  $\delta$  – разность хода лучей;  $C_{\lambda}$  – оптическая постоянная, зависящая от длины волны монохроматического луча от источника света и от оптических свойств материала модели;  $h$  – толщина модели.

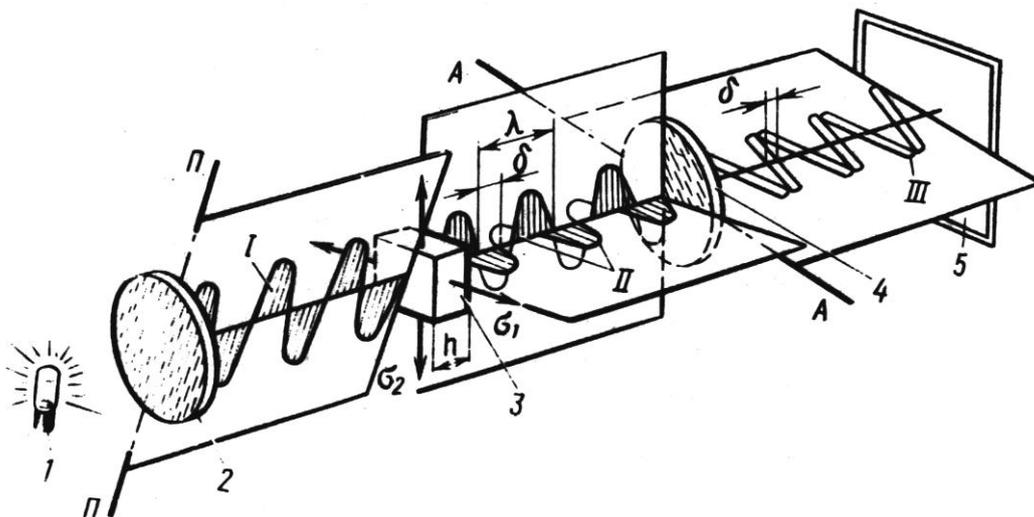


Рис. 53. Схема прохождения луча света в полярископе: 1 – источник света; 2 – поляризатор; 3 – модель; 4 – анализатор; 5 – экран; I – плоскополяризованный луч; II – плоскополяризованные лучи в плоскостях действия главных напряжений; III – плоскополяризованный луч, выходящий из анализатора

Выходящие из модели два луча с разностью хода  $\delta$  не могут интерферировать (складываться в соответствующие им колебания). Проходя через анализатор, они

поляризуются и интерферируются. При этом амплитуда суммарных колебаний зависит от разности хода. Интенсивность луча пропорциональна квадрату амплитуды. Интенсивность луча, вышедшего из анализатора,

$$I = I_0 \sin^2 2\alpha \sin^2 \frac{\pi\delta}{\lambda}, \quad (2)$$

где;  $I_0$  – интенсивность луча, падающего на модель;  $\alpha$  – угол поворота плоскостей поляризации анализатора  $A - A$  и поляризатора  $\Pi - \Pi$ , которые взаимно перпендикулярны относительно направлений главных напряжений (рис. 54);  $l$  – длина волны.

Из уравнения (2) видно, что при совпадении направлений главных напряжений в данной точке с плоскостями поляризации анализатора и поляризатора, т.е. когда  $\alpha = 0, \pi/2, \pi, \dots$ , интенсивность луча, падающего на экран, равна нулю и рассматриваемая точка на экране будет темной.

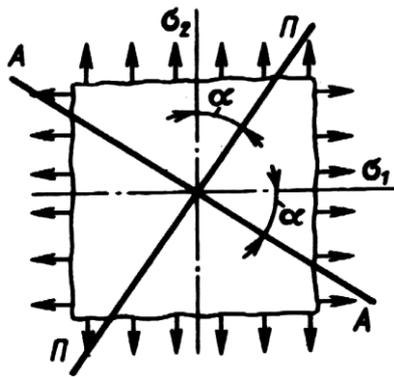


Рис 54.  
Схема взаимного расположения плоскостей поляризации и направлений главных напряжений

Совокупности этих точек на экране образуют темные полосы, называемые изоклинами. Таким образом, изоклина – это геометрическое место точек, в которых наклон направлений главных напряжений одинаков. Поворачивая одновременно поляризатор и анализатор на определенный угол (например, 5 или 10°), можно получить на экране и зарисовать или сфотографировать семейства изоклин. Из формул (1) и (2) следует, что при разностях главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2$ , соответствующих разностям хода лучей  $\delta$ , кратным  $\lambda$  ( $\delta = \lambda, 2\lambda, \dots, m\lambda$ ), интенсивность луча, падающего на экран, равна нулю. Это состояние на экране будет отмечено черными точками, сливающимися в темные полосы. Условие затухания  $\lambda = m\lambda$ , не может быть выполнено сразу для всех составляющих белого цвета, поэтому полосы получаются цветными. Каждой полосе будет соответствовать свое целое число  $m$  – *порядок полосы*. Эти полосы называются *изохромами*. Изохромы фотографируют или зарисовывают с экрана. Каждая полоса соответствует постоянному значению  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Разность главных напряжений  $\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_0$ , вызывающая разность хода лучей, равную длине волны, называется *ценой полосы*.

Значение  $\sigma_0$  определяют по формуле (IV. 10), приняв  $\delta = \lambda$ :

$$\sigma_0 = \lambda C_\lambda h \quad (3)$$

Разность главных напряжений для полосы порядка  $m$ :

$$\sigma_1 - \sigma_2 = m\sigma_0, \quad (4)$$

Цену полосы  $\sigma_0$  определяют экспериментально. Для этого в моделях создаются

напряжения известных значений и ведутся наблюдения за вызванной ими *картиной полос*. Показана фотография изохром, полученная при загрузке сосредоточенной силой модели пролетного строения коробчатого сечения (рис. 55). Для отделения на экране изохром от изоклин за поляризатором и анализатором ставят скрещенные слюдяные пластинки в «четверть волны».

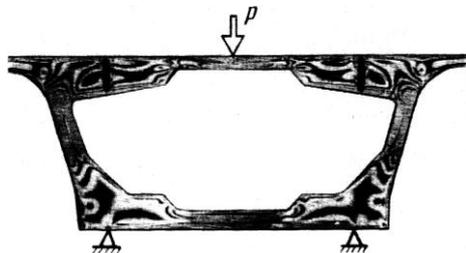


Рис. 55.  
Изохромы в модели  
коробчатого пролетного  
строения при загрузке  
сосредоточенной силой  $P$

Плоскости поляризации пластинок располагают под углом  $45^\circ$  к плоскостям поляризации анализатора и поляризатора, а толщину пластинок подбирают так, чтобы плоскополяризованный луч с длиной волны  $\lambda$ , раскладываясь пластинкой на два луча с разностью хода  $\lambda/4$ . Тогда возникает так называемая круговая поляризация, вызывающая быструю смену изображений изоклин, практически незаметных на экране. Следовательно, оптическим методом можно непосредственно получать направления главных напряжений и значение их разности  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Зная эти данные, в любой точке модели можно определить касательные напряжения для различных площадок:

$$\tau_0 = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin 2\alpha \quad (5)$$

При линейно напряженном состоянии задача по определению напряжений решается просто. В этом случае ( $\sigma_2 = 0$  и, следовательно, разность  $\sigma_1 - \sigma_2$  равна самому напряжению  $\sigma_1$ , значение которого находится непосредственно из опыта по формуле (4). Для определения напряжений при плоском напряженном состоянии существуют различные методы. Например, один из экспериментальных методов основан на измерении изменения толщины модели при ее нагружении. На основании обобщенного закона Гука относительная поперечная деформация:

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h} = -\frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (6)$$

откуда:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{\Delta h E}{h \mu} \quad (7)$$

где:  $E$  – модуль упругости;  $\mu$  – коэффициент Пуассона материала модели;  $\Delta h$  – изменение толщины модели.

Изменение толщины модели в интересующих точках можно измерить различными приборами, например, индикаторами. Зная сумму и разность главных напряжений, определяют каждое из них. Из числа вычислительных методов определения главных напряжений наиболее удобны методы численного интегрирования вдоль траектории главного направления или вдоль прямых, проведенных параллельно координатным осям. Важным моментом является переход от

модели к элементу. Из теории упругости известно, что распределение напряжений в элементе, находящемся в плоском напряженном состоянии, не зависит от модуля упругости и коэффициента Пуассона. Поэтому в геометрически подобных моделях и элементах, выполненных из разных материалов и имеющих подобие в нагрузке, закон распределения деформаций и напряжений будет одинаков. Формула перехода, от напряжений в модели  $\sigma_M$  к напряжениям в элементе имеет вид;

$$\sigma = \frac{h_m}{h_э} \frac{S_b}{S_э} \frac{P_э}{P_m} \sigma_M \quad (8)$$

где:  $\frac{h_m}{h_э}, \frac{S_b}{S_э}, \frac{P_э}{P_m}$  – отношения: толщин модели и элемента, линейных размеров

контура модели и элемента, нагрузок на элемент и модель.

Формула (8) для пластин с отверстиями приближенна, но дает незначительную погрешность.

Поляризационно-оптический метод широко применяется при исследовании объемно-напряженных деталей. При этом используют «замораживание» или составные модели. «Замораживание» основано на свойствах некоторых материалов (синтетических смол и др.) сохранять оптическую анизотропию, вызванную деформацией, благодаря специальной термической обработке («замораживанию»). Процесс исследования заключается в следующем. Загружают нагретую объемную модель из оптически активного материала, затем, не снимая нагрузки, охлаждают в термостате при определенном режиме. После этого модель разрезают алмазными фрезами на тонкие пластинки и строго фиксируют их положение в модели. Обычно пластинки из одной зоны вырезают таким образом, чтобы они располагались в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Эти пластинки исследуют в полярископе изложенным ранее способом. Получив данные о напряженном состоянии в пластинках, определяют компоненты напряжений в пространственной модели и затем переходят к элементу. При переходе от модели к элементу возникают трудности, связанные с тем, что материалы модели и элемента имеют разные коэффициенты Пуассона. Опыт показал, что по этой причине погрешность в оценке значений главных напряжений может составлять до 15 %.

**Метод фотоупругих покрытий.** Поляризационно-оптический метод начали применять для исследования напряженного состояния в поверхностных слоях деталей и элементов, изготовленных из обычных материалов – металла, бетона и др. Исследуемый участок элемента покрывают тонким слоем оптически активного материала – фотоупругим покрытием. Покрытие, изготовленное на основе эпоксидных смол, воспроизводит деформации верхнего слоя элемента при его нагружении. При облучении покрытия поляризованным пучком света, который отражается от поверхности элемента, получается картина полос, как при просвечивании прозрачных моделей. Этим методом можно исследовать напряженное состояние натуральных элементов конструкций в лаборатории и непосредственно в сооружениях. Покрытия сохраняются длительное время, что дает возможность наблюдать за изменениями в работе конструкций.

**Метод муаровых полос.** Этим методом получают картину определения перемещений и деформаций сразу на всей поверхности модели или элемента конструкции. Суть метода: на поверхность конструкции до ее нагружения наносят сетку линий с частотой в 5...100 линий на 1 мм. После нагружения конструкции внешней нагрузкой сетка деформируется. Совмещая изображения сетки до и после

деформации, получают картину деформаций, деформированную сетку наблюдают через эталонную или проектируют на экран, где образуется так называемый *муаровый эффект*. Анализируя картину муаровых полос, можно получить качественную и количественную характеристики распределения смещений и деформаций. Преимущество метода муаровых полос – этот метод можно применять при значительных деформациях, независимо от того, носят они упругий или упругопластический характер.

**Голографический метод.** Голография (от греческого *holos* – весь, полный и *grapho* – пишу) – метод получения изображения объекта, основанный на интерференции волн, позволяет исследовать форму, деформации и перемещения пространственных объектов. На фотопластинку одновременно с «сигнальной» волной, рассеянной объектом, направляют «опорную» волну от того же источника света – возникает *голограмма*, т. е. зафиксированная на фотопластинке интерференционная картина. Если голограмму облучить лучом лазера в той же оптической системе, то возникает пространственное изображение предмета. Совмещение голограмм объекта исследований до и после загрузки порождает картину полос, по которой можно судить о деформированном состоянии объекта. В настоящее время этот метод интенсивно развивается.

**Фотометрические методы.** Фотометрические методы условно подразделяются на классическую фотограмметрическую и стереофотограмметрическую съемки с последующей специальной камеральной обработкой полученных снимков. В настоящее время эти съемки все шире используются как в натуральных испытаниях сооружений, так и при испытаниях, выполняемых в лабораторных условиях, в том числе и при испытаниях строительных моделей. Пространственная схема прохождения световых лучей при фотограмметрической съемке представлена на рис. 56. На практике при фотограмметрической съемке (рис. 57) на выбранном расстоянии  $Y$  от объекта устанавливается фототеодолит и выполняется съемка до и после деформации обследуемого объекта. В результате координаты точки  $N$  по оси  $X$  и  $Z$  можно определить путем обработки полученных фотоснимков с использованием следующих формул:

$$X = (Y/f) x; Z = (Y/f) z,$$

где:  $X$  и  $Z$  – соответственно координаты точки  $N$  на объекте;  $Y$  – расстояние до фототеодолита;  $f$  – фокусное расстояние фототеодолита;  $x$  и  $z$  – координаты точки  $N$  на фотоснимке.

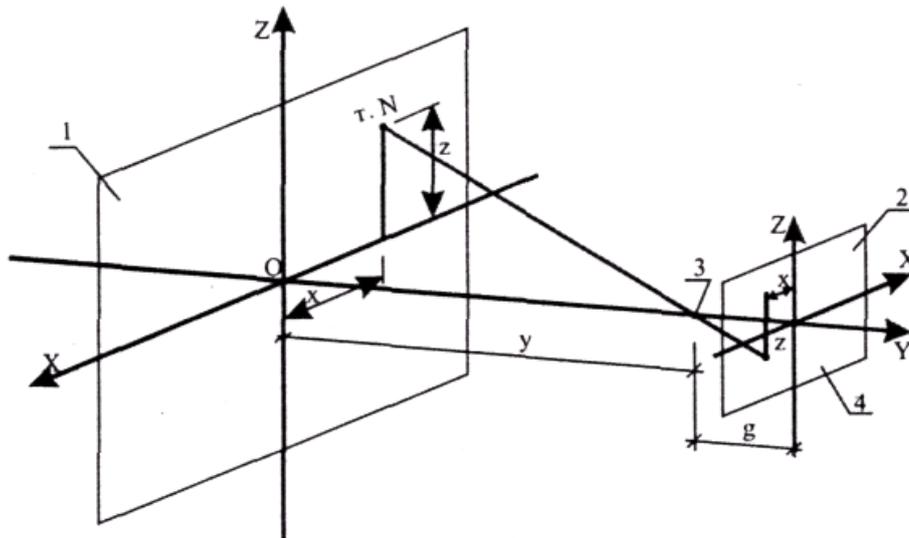


Рис. 56. Схема прохождения световых лучей при фотометрической съемке: 1 – исследуемый объект; 2 – фототеодолит или фотокамера; 3 – оптический центр фотокамеры; 4 – фотопленка

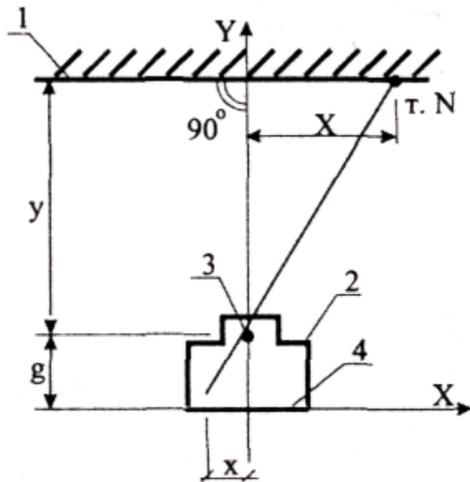


Рис. 57. Горизонтальная проекция рабочей схемы фотограмметрической съемки

Для решения пространственной задачи с помощью стереофотограмметрической съемки возможно дополнительное определение по выполненным фотоснимкам значения координаты  $Y$ , т.е. удаления рассматриваемой точки  $N$  от фототеодолита. Для решения данной проблемы необходима съемка обследуемого объекта с двух точек согласно рис. 58.

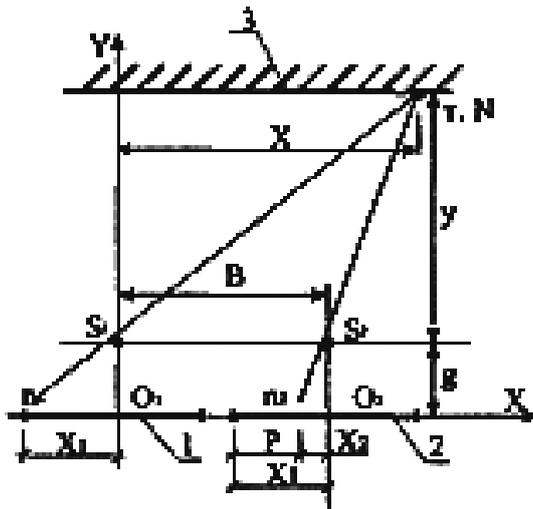


Рис. 58.  
Схема стереофотограмметрической съемки с двух позиций: 1 – левый снимок; 2 – правый снимок; 3 – объект;  $S_1, S_2$  – местонахождения фокуса фото-теодолита;  $B$  – база съемки

При этом в ходе обработки полученных двух снимков с двух позиций необходимо определить разность абсцисс  $X_1$  и  $X_2$ , на указанных фотоснимках, используя следующую формулу:  $p = X_1 - X_2$ , где:  $p$  – горизонтальный параллакс фототеодолита. Зная значения  $f, p, B$ , можно определить значение  $Y$  до и после деформирования обследуемого объекта по формуле:  $Y = B(f/p)$ , где:  $f$  – фокусное расстояние фототеодолита;  $p$  – горизонтальный параллакс;  $B$  – база съемки.

Обработка полученных фотоснимков на практике и нахождение параллаксов исследуемых точек производится с помощью специально предназначенного для этой цели оптического прибора – *стереокомпаратора*. Предложенные методы имеют следующие *преимущества*.

1. Одновременность фиксирования всех точек сооружения, отраженных на снимке.
2. Возможность определения перемещений в неограниченно большом числе точек, выделенных на снимке.
3. Комфортность обработки снимка, производимой в спокойных лабораторных условиях с возможностью неоднократной проверки полученных данных. Сами же фотографии одновременно являются надежным документом, отражающим фактическое состояние обследуемого объекта в момент съемки. Одновременно данный метод имеет и *недостатки*.
  1. На практике требуется применение специальной аппаратуры.
  2. Обслуживающий персонал должен иметь требуемую квалификацию и подготовку.
  3. Сама съемка ограничена пределами прямой видимости.
  4. До начала работы необходимо выполнить специальные подготовительные работы.
  5. Большое сооружение необходимо снимать с нескольких позиций, что нарушает одновременность съемки и усложняет контрольную обработку полученных снимков.

Проведенная экспериментальная проверка показывает, что при удалении объекта от фототеодолита на 10 метров погрешность в определении перемещений в плоскости сооружения не превышает  $\pm 1$  мм, а погрешность в определении перемещений из плоскости сооружения достигает  $\pm 3$  мм. При более близких расстояниях точность результатов измерения повышается.

Для наблюдения за перемещениями в высотных сооружениях и подземных штольнях гидротехнических сооружений эффективно используют лазерные приборы, а

также современные высокоточные радио- и светодальномеры.

### Литература

1. Брик А. Л., Давыдов В. Г., Савельев В. Н. Эксплуатация искусственных сооружений на железных дорогах. М.: Транспорт, 1990. 232 с.
2. Инструкция по обследованиям и испытаниям мостов и труб. ВСН 122–65. М.: Оргтрансстрой, 1966. 36 с.
3. Инструкция по определению грузоподъемности железобетонных балочных пролетных строений автодорожных мостов. ВСН 32–78. М.: Транспорт, 1979. 142 с.
4. КМК 3.06.07–96. Мосты и трубы. «Правила обследований и испытаний», Ташкент, 1999 г.
5. Обследование и испытание сооружений. Под ред. О. В. Лужина. – М.: Стройиздат, 1987.
6. Осипов В. О., Козьмин Ю. Г., Анциперовский В. С., Кирста А. А. Содержание и реконструкция железнодорожных мостов. М., «Транспорт», 1986. – 327 с.
7. Руководство по определению грузоподъемности железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов, 1989 г.
8. Руководство по определению грузоподъемности металлических пролетных строений железнодорожных мостов, 1989 г.
9. Мосты и тоннели на железных дорогах. Под ред. В. О. Осипова – М.: Транспорт, 1988. – 367 с.

### Содержание

Наименование разделов	Стр.
<b>III. Динамические испытания конструкций сооружений</b>	
1. Цели и задачи испытаний конструкций динамической нагрузкой	3
2. Испытания конструкций и сооружений искусственно создаваемой вибрационной нагрузкой	10
3. Методика испытания мостов статической и динамической нагрузками	20
4. Методы выявления скрытых дефектов и повреждений	31
5. Определение напряженного состояния и силовых факторов в элементах мостов	40
6. Определение динамических характеристик конструкций или отдельных ее элементов	41
<b>IV. Экспериментальные методы исследования напряжений и давлений в грунтах.</b>	
1. Измерение напряжений в грунтах	45
2. Измерение порового давления в грунтах	51
3. Метод индикаторов	53
4. Полевые методы определения плотности, влажности и деформативности грунтов	57
5. Методы каротажа скважин	59
6. Метод уплотнения и повышения устойчивости грунтов	60
<b>V. Неразрушающие и оптические методы испытаний</b>	
1. Общие сведения	62
2. Методы проникающих сред	62
3. Механические методы испытаний материалов	63
4. Акустические методы	69

5. Магнитные, электрические и электромагнитные методы	76
6. Методы, основанные на использовании ионизирующего излучения	82
7. Радиодефектоскопия и инфракрасная дефектоскопия	87
8. Приборы неразрушающего контроля нового поколения	89
9. Методы оптических испытаний	105
Рекомендуемая литература	114

**АШРАБОВ А. А.,**  
**доктор технических наук, профессор;**  
**РАУПОВ Ч.С.,**  
**кандидат технических наук, доцент**

**Экспериментальные методы и средства проведения инженерных  
испытаний**

Редактор: **Т.И.Умурзакова**

Разрешено в печать \_\_\_\_\_ Объем печ. л. 6,75.

Формат бумаги 60x84. Заказ № \_\_\_\_ Тираж 10 экз.

Тиражировано в типографии ТашИИТа.

г. Ташкент, ул. Адылходжаева, 1.