



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ  
ТА СПОРТУ УКРАЇНИ

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

**В.А. Лютий**

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Навчальний посібник*

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та  
спорту України як навчальний посібник для студентів  
вищих навчальних закладів*

**Харків 2012**

УДК 624.01(07)

ББК 38.5  
Л 961

*Рекомендовано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту  
України як навчальний посібник для студентів вищих навчальних  
закладів (№ 1/11-3134 від 06.03.12 р.)*

**Рецензенти:**

професори В.П. Кожушко (ХНАДУ),  
Г.Ш. Салія (ХДТУБА)

**Лютий В.А.** Методи випробувань будівельних  
Л 961 конструкцій: Навч. посібник. – Харків: УкрДАЗТ,  
2012. – 183 с., табл. 2, рис. 105.  
ISBN 978-966-2033-78-6

У навчальному посібнику наведені методи та засоби проведення випробування будівельних конструкцій. Розглянуті неруйнівні методи контролю міцності будівельних матеріалів у конструкціях. Описані прийоми проведення оглядів, обстежень, статичних і динамічних випробувань будівельних конструкцій будівель та споруд. У кінці посібника наведені основні визначення несучої здатності тунельних конструкцій у процесі їх експлуатації.

Посібник призначено для студентів, які навчаються за спеціальностями 06010101 “Промислове та цивільне будівництво” та 07010801 „Залізничні споруди та колійне господарство”, а також за спеціалізаціями експлуатаційної спрямованості наведених вище спеціальностей усіх форм навчання.

УДК 624.01(07)  
ББК 38.5

**ISBN 978-966-2033-78-6**

© Українська державна  
академія залізничного  
транспорту, 2012.  
© Лютий В.А. 2012

Навчальний посібник

**Лютий Віталій Анатолійович**

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

Відповідальний за випуск Лютий В.А.

Редактор Еткало О.О.

---

Підписано до друку 27.03.12 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.  
Умовн.-друк.арк. 4,75. Тираж 300. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія  
залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейсрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**В.А. Лютий**

**МЕТОДИ ВИПРОБУВАНЬ  
БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

**Харків 2012**

## ЗМІСТ

Вступ	7
<b>1. Обстеження будівель та споруд</b>	<b>12</b>
1.1. Ознайомлення з документацією	12
1.2. Огляд будівель та споруд	13
1.3. Перевірка геометричних розмірів	13
1.3.1. Перевірка основних геометричних параметрів і конфігурації споруди	13
1.3.2. Контроль перерізів і перевірка обрисів відповідальних елементів	14
1.4. Виявлення та реєстрація осідань і пошкоджень	15
1.4.1. Осідання та зсуви	15
1.4.2. Розвиток тріщин і розкриття швів	17
1.5. Перевірка якості та стану матеріалів і з'єднань	20
1.5.1. Загальні дані	20
1.5.2. Відбір зразків	21
1.5.3. Прилади для вимірювання товщини захисного шару бетону та пошуку арматури	24
1.5.4. Оцінка міцності металу	30
1.5.5. Прилади для неруйнівного методу контролю міцності бетону	32
1.6. Перерахунки та загальні висновки за результатами обстеження	45
1.6.1. Перерахунки на дію експлуатаційних навантажень	45
1.6.2. Перерахунок за методом класифікації	46
1.6.3. Перерахунок на випробне навантаження	46
1.6.4. Висновки за результатами обстеження	46
<b>2. Статичні випробування</b>	<b>48</b>
2.1. Обумовлені характеристики	48
2.2. Завдання випробувань	49
2.3. Вибір елементів для випробування	50
2.4. Вибір схеми завантаження	51
2.5. Навантаження	56
2.5.1. Розподілені навантаження	57

2.5.1.1. Сипучі матеріали	57
2.5.1.2. Дрібні штучні вантажі	57
2.5.1.3. Великі штучні вантажі	60
2.5.1.4. Навантаження водою	61
2.5.1.5. Використання тиску повітря	62
2.5.2. Зосереджене навантаження	63
2.5.2.1. Розподільні пристрої	64
2.5.2.2. Підвішування вантажів	65
2.5.2.3. Натяжні пристрої	67
2.5.2.4. Домкрати	70
2.5.3. Рухоме навантаження	72
2.6. Режими випробування	77
2.6.1. Призначення величини випробувального навантаження	77
2.6.2. Послідовність прикладення та зняття навантаження	79
2.6.3. Витримування навантаження	80
2.7. Вимірювальні прилади та їх застосування	81
2.7.1. Загальні дані	81
2.7.2. Прилади для визначення лінійних переміщень	82
2.7.2.1. Діапазон і необхідна точність вимірювань	82
2.7.2.2. Прогиноміри з дротяним зв'язком	83
2.7.2.3. Індикатори	88
2.7.2.4. Електромеханічні вимірники переміщень	92
2.7.2.5. Геодезичні методи	93
2.7.3. Вимірювання деформацій	95
2.7.3.1. Тензорезистори	95
2.7.3.2. Механічні тензометри	98
2.7.3.3. Динамометри	102
2.8. Проведення випробувань	102
2.8.1. Підготовчі роботи	102
2.8.2. Розміщення приладів	104
2.8.2.1. Розміщення приладів при вимірюванні прогинів	105
2.8.2.2. Розміщення приладів при вимірюванні кутів нахилу	105

2.8.2.3. Розміщення приладів при вимірюванні деформацій	107
2.9. Обробка результатів статичних випробувань	111
2.9.1. Графічна обробка	111
2.9.2. Обробка результатів вимірювання переміщень	113
2.9.2.1. Підрахунки прогинів при завантаженні простої балки	113
2.9.2.2. Визначення опорних моментів і згинальної твердості балок по вимірюваних прогинах та кутах нахилу	115
2.9.3. Оцінка результатів статичних випробувань	118
<b>3. Динамічні випробування</b>	122
3.1. Основні характеристики динамічної роботи будівельних конструкцій	122
3.1.1. Навантаження	122
3.1.2. Робота конструкцій при динамічних впливах	123
3.2. Динамічні характеристики матеріалу	128
3.2.1. Динамічний модуль пружності	128
3.2.2. Динамічні міцнісні характеристики	128
3.2.3. Внутрішнє тертя	129
3.3. Завдання динамічних випробувань	130
3.3.1. Випробування споруд і окремих конструкцій, що підлягають здачі в експлуатацію	130
3.3.2. Випробування споруд і конструкцій, що знаходяться в експлуатації	130
3.3.3. Випробування будівельних деталей серійного виготовлення	131
3.4. Динамічні навантаження	132
3.4.1. Ударне навантаження	132
3.4.1.1. Вертикальні удари	132
3.4.1.2. Горизонтальні та похилі удари	133
3.4.2. Вібраційне навантаження	134
3.4.2.1. Найпростіші машини з однією неврівноваженою масою	134
3.4.2.2. Вібраційні машини спрямованої дії з неврівноваженими масами, що обертаються	

наколо паралельних осей	135
3.4.2.3. Гідравлічні пульсатори	137
3.5. Вимірювання при динамічних випробуваннях	138
3.5.1. Загальні дані	138
3.5.2. Вимірювання переміщень	138
3.5.2.1. Вібромарки	139
3.5.2.2. Віброметри і їх застосування	140
3.5.2.3. Віброперетворювачі	144
3.5.3. Вимірювання деформацій. Контроль частот	145
3.6. Проведення динамічних випробувань	147
3.6.1. Підготовчі роботи	147
3.6.2. Розміщення приладів і проведення випробувань	147
3.6.3. Випробування ударним навантаженням	149
3.6.4. Випробування вібраційним навантаженням	149
3.6.5. Випробування експлуатаційним навантаженням	152
3.7. Обробка результатів динамічних випробувань	153
3.7.1. Графіки динамічних процесів	154
3.7.2. Визначення параметрів коливальних процесів	157
3.7.2.1. Визначення розмахів і амплітуд коливань	157
3.7.2.2. Вимірювання періодів коливань	158
3.7.2.3. Перехід від переміщень до швидкостей та прискорень і назад	159
3.7.2.4. Визначення коефіцієнта поглинання	160
3.7.3. Визначення інших динамічних характеристик	163
3.7.3.1. Форми коливань	163
3.7.3.2. Інші дані	165
3.8. Оцінка та використання результатів динамічних випробувань	167
<b>4. Основні визначення несучої здатності тунельних конструкцій у процесі їх експлуатації</b>	169
4.1. Визначення теоретичних (проектних) коефіцієнтів запасу міцності конструкцій	169
4.2. Натурне обстеження технічного стану конструкцій	171
4.3. Геофізичне обстеження фактичного стану породного масиву і контакту "оброблення - порода"	175
4.4. Визначення фактичних коефіцієнтів запасу міцності	

тунельних конструкцій в експлуатаційний період	178
<b>Бібліографічний список</b>	180
<b>Предметний покажчик</b>	182
<b>ВСТУП</b>	

Обстеження й випробування споруд як самостійна галузь науки сформувалася порівняно не давно, хоча такі експериментальні дані завжди використовувалися в будівельній діяльності людини. Протягом багатьох століть необхідність уникати аварій і руйнувань диктувала вибір найбільш раціональних конструкцій. Рішення, які не підходять, відкидалися, зберігалися найбільш досконалі конструкції та споруди, часто навіть зараз вражаючи своєю надійністю, інженерною цілеспрямованістю й сміливістю (наприклад, стрілчасті арки готичних соборів, багатоярусні римські акведуки та ін.).

У теперішній час обстеження й випробування споруд є галуззю будівельної науки, спрямованої на виявлення фактичного стану та працездатності знову зведених об'єктів та об'єктів, що експлуатуються, визначення дійсної роботи конструкцій з нових і традиційних будівельних матеріалів, а також для коректування і розроблення обґрунтованих методів розрахунку. Роботи з обстеження, огляду та випробування проводяться з використанням сучасних методик і приладів, що дозволяють максимально автоматизувати процес.

До складу заходів, що дозволяють виявити робочий стан конструкцій і споруд, входять огляд, обстеження та випробування.

**Огляд** проводять при необхідності оцінки стану споруд, що знаходяться в експлуатації, для прогнозування їхньої подальшої роботи. При проведенні огляду використовують методи неруйнівного контролю якості, засновані на різних фізичних ефектах (акустичні, магнітні, радіаційні та інші методи).

Звичайний огляд складається з таких етапів: попередній огляд об'єкта; ознайомлення з технічною документацією; детальний огляд в натурі; обмірювання; виявлення та реєстрація дефектів; контроль якості матеріалів, з'єднань, стиків; аналіз результатів.



У процесі огляду виявляють фактичні розміри, фізико-механічні характеристики матеріалів, дефекти та відхилення від проекту. У результаті огляду після перерахунку ухвалюють рішення щодо можливості подальшої експлуатації, необхідності підсилення або про проведення випробувань. Огляд найчастіше проводять при реконструкції споруди.

**Обстеження** являє собою комплекс операцій з виявлення реальної роботи споруд, що експлуатуються при тривалих впливах постійного та тимчасового навантажень і навколишнього середовища. У поняття реальної роботи входять фактичні навантаження та інші впливи (агресивні, температурні та ін.), реальні параметри груп граничних станів (деформативності, тріщиностійкості), вплив споруди на фундамент. Результати обстеження служать для уточнення методів розрахунку споруд.

**Випробування** полягають у вивченні реальної роботи конструкцій і споруд при статичному або динамічному навантаженні. Залежно від мети випробування діляться на приймальні, експлуатованих об'єктів, серійно виготовлених конструкцій і науково-дослідні. Останні можуть бути модельними або натурними. При проектуванні складних для розрахунку унікальних об'єктів (просторові великопрогонові покриття, греблі ГЕС та ін.) випробування на моделях дозволяють із достатньою точністю визначити їхню реальну міцність, деформативність і тріщиностійкість. Випробування можуть проводитися аж до настання граничних станів I групи (до руйнування) або II групи (без руйнування). При їх проведенні велика увага повинна приділятися правилам техніки безпеки, а також охороні навколишнього середовища; при руйнуванні конструкцій їхні складові необхідно утилізувати – дроблений бетон використовувати як великий заповнювач, а сталь – відправляти на переплавлення. Випробування до руйнування варто проводити тільки у виняткових випадках, коли неруйнівний контроль і випробування без руйнування не дозволяють зробити потрібні висновки; потрібно частіше використовувати випробування на моделях.

Після закінчення обстежень і випробувань обробляються їхні результати, дається оцінка та аналіз, робляться висновки та пропозиції з реконструкції.

Економічна ефективність обстежень і випробувань споруд визначається такими факторами: підвищенням надійності, довговічності та бездефектною здачею в експлуатацію; скороченням руйнувань виробів при впровадженні неруйнівного контролю; зниженням витрат матеріалів при заданому рівні якості, своєчасним проведенням ремонтно-відбудовних робіт; впровадженням нових методів розрахунку, нових матеріалів та конструкцій.

Початок розвитку вчення про роботу споруд пов'язаний із загальним розвитком виробництва. Уперше деякі питання будівельної механіки знайшли висвітлення в роботах Леонардо да Вінчі (1452 - 1519). Засновником науки про опір матеріалів був Галілео Галілей (1564 - 1642). Учені XVII - XVIII ст., що вивчали питання міцності (Е. Маріотт, Д. Бернуллі, Л. Ейлер, Ш. Кулон та ін.), досліджували міцність конструкцій тільки в момент руйнування, не цікавлячись проміжними стадіями їхньої роботи.

У 1732 р. французький учений Данізі встановив, що при руйнуванні арка ділиться на чотири частини. Р. Реомюр (1683 - 1757) уперше побудував машину для випробування металів. Професор Лондонського університету П. Мушенбрук (1692 - 1761) створив першу, досить досконалу важільну випробувальну машину. Перші переконливі досліди, які підтвердили наявність стискаючих напруг в елементах, що згинаються, без застосування точних вимірювальних приладів поставив французький учений Анрі Луї Дюамель дю Монсо (1700 - 1782) у 1767 р. У теоретичному відношенні важливу роль мали роботи Анрі Нав'є (1785 - 1836), що розглядав роботу споруд під експлуатаційним навантаженням і запропонував методи розрахунку конструкцій в їхньому робочому стані за припустимими напруженням. Завдяки цьому до 70 рр. XIX ст. будівельна наука спочатку випереджала практику.

Велика роль у розвитку випробувань споруд належить вітчизняним і радянським ученим та інженерам. М.В. Ломоносов (1711-1765) сконструював прилад для визначення міцності

матеріалів методом стирання. Блискучим прикладом випробування споруд є випробування моделі дерев'яного аркового мосту, виконане в Росії механіком-самоучкою І.П. Кулібіним (1735-1818), у процесі якого були перевірені основні передумови проекту. Дослідження моделі дерев'яної ферми оригінальним методом було виконано російським інженером Д.І. Журавським (1821-1891). Вертикальні елементи були виготовлені з тонкого дроту одного діаметра, зусилля в них після завантаження моделі оцінені за допомогою смичка по тону звучання. При цьому було отримано підтвердження припущення, що для розкісної однопрогонової ферми зусилля у вертикальних елементах, що працюють на розтягання, зменшуються від опор до прогону.

З початку ХІХ ст. почали проводитися випробування натурних конструкцій. У 1831 р. залізочугунні конструкції театру в Петербурзі (нині театр ім. Пушкіна) випробовувалися на заводі. У 1842 р. була встановлена горизонтальна розривна машина на Олександрівськом у заводі в Петербурзі. У 1853 р. П.І. Собко організував механічну лабораторію в Петербурзі при інституті шляхів сполучення. Надалі нею керував проф. Белелюбський М.А. (1845-1922). У 1900 р. була створена лабораторія.

Випробування залізобетонних конструкцій у Росії вперше були здійснені в 1886 р. на московських бойнях. Застосуванню залізобетону в Росії сприяли також великі публічні досліди, проведені в 1891 р. у Петербурзі під керівництвом М.А. Белелюбського. У 1900 р. у Тбілісі І.С. Покровський провів випробування залізобетонних резервуарів.

Велику роль у формуванні науки про обстеження й випробування споруд відіграли роботи академіків О.М. Крилова, А.Ф. Йоффе, Є.О. Патона, професорів М.С. Стрілецького, І.М. Рабіновича, Ю.А. Нілендера, Є.Є. Гібшмана та ін. Вітчизняними вченими розроблені теоретичні питання науки та методики, створені конструкції сучасних приладів для обстежень і випробувань, у яких використані численні фізичні явища та ефекти. У теперішній час дослідження в цій галузі науки ведуться більш ніж у 100 науково-дослідних інститутах, у будівельних вузах. Ряд

заводів серійно випускає ефективні прилади та комплекси для проведення обстеження й випробування споруд.

Майбутні обстеження та випробування споруд пов'язані з масовим суцільним контролем якості неруйнівними методами, з повною автоматизацією процесів обстеження й випробування та обробкою їхніх результатів на ПЕОМ.

Метою вивчення курсів «Випробування інженерних споруд» та «Методи випробувань будівельних конструкцій» є підготовка інженерів-будівельників, що вміють визначити дійсний стан конструкцій і споруд при експлуатації, проводити випробування в натурних умовах і на моделях, оцінювати якість конструкцій і з'єднань неруйнівними методами, робити правильні висновки на основі огляду та обробки результатів випробувань про можливість подальшої експлуатації споруд або необхідності їхнього посилення. Особливого значення ці знання набувають у сучасних умовах, коли істотно зросли обсяги реконструкції споруд, що експлуатуються.

Інженер-будівельник повинен уміти правильно обрати методи неруйнівного контролю, вид завантаження, навантаження при випробуваннях, типи та розміщення приладів, обробити результати з використанням обчислювальної техніки та оцінити їх з погляду прогнозу експлуатації споруди. Він повинен знати фізичні методи контролю якості фундаментів, що є найбільш відповідальними частинами споруд.

## 1. ОБСТЕЖЕННЯ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

Обстеження будівель та споруд складається з таких операцій, які виконуються повністю або частково в залежності від поставлених завдань та стану об'єкта, що досліджується:

- 1) ознайомлення з документацією;
- 2) огляд об'єкта в натурі;
- 3) обмірювання - перевірка генеральних розмірів конструкцій (прогонів висот та ін.) і контроль перерізів елементів;
- 4) виявлення, установлення характеру та реєстрація тріщин і пошкоджень;
- 5) перевірка якості матеріалу в споруді та контроль стану стиків і з'єднань.

В окремих випадках, наприклад у попередньо напружених конструкціях, доводиться визначати також зусилля та напруги, що фактично наявні, в елементах, що досліджуються.

У результаті обстеження з урахуванням даних відповідних перерахунків дається загальна оцінка стану споруди, і якщо буде потреба, вирішується питання про проведення статичних та динамічних випробувань.

### 1.1. Ознайомлення з документацією

До вивчення документації доцільніше приступати після попереднього (рекогносцирувального) огляду об'єкта.

При обстеженні споруд, призначених до здачі в експлуатацію, необхідно ознайомитися з проектною та будівельно-монтажною документацією, де варто звернути особливу увагу на *акти прихованих робіт*. При обстеженні об'єктів, що знаходяться в

експлуатації, додатково повинні бути вивчені акти передачі в експлуатацію, паспорт споруди, журнали експлуатації, документи про зроблені ремонти та інші наявні матеріали, що характеризують службу експлуатації.

## **1.2. Огляд будівель та споруд**

**Огляд будівель та споруд** є найбільш відповідальною частиною обстеження. Його починають з установаження відповідності між наданою документацією та спорудою в натурі. Виявлені розбіжності фіксуються, оцінюються та встановлюються їхні причини. В об'єктах, зданих в експлуатацію, перевіряється усунення недоліків, відзначених в актах приймання.

Далі виконується детальний (по можливості) огляд елементів споруди, починаючи з найбільш відповідальних: оглядаються опорні частини; закладення та з'єднання, перевіряється їхній стан і умови роботи; оглядаються зв'язки, настили та інші елементи, що забезпечують належну просторову роботу споруди, і перевіряється правильність їхнього спирання та кріплення; встановлюється наявність у конструктивних елементах послаблень і надрізів, сколів та інших дефектів; виявляється наявність корозії, гниття та інших пошкоджень матеріалу, що погіршують роботу конструкцій та знижують несучу здатність споруди.

Відзначається (при огляді - візуально) наявність осідань, деформувань та взаємні зсуви елементів.

За результатами оглядів надається *попередня оцінка* стану споруди в цілому, намічається план подальшого проведення обстеження (інструментальних зйомок, перевірки якості матеріалу в споруді та ін.).

## **1.3. Перевірка геометричних розмірів**

### **1.3.1. Перевірка основних геометричних параметрів і конфігурації споруди**

При обстеженні повинні бути перевірені найголовніші розміри конструктивної схеми: довжини прогонів, висоти колон та інші геометричні параметри, від дотримання заданої величини яких залежить напружено-деформований стан елементів конструкцій у процесі їхньої служби. В окремих випадках (якщо це з точки зору експлуатації або при наявності виявлених при огляді відхилень) перевіряється також горизонтальність перекриттів, дотримання заданих ухилів, вертикальність несучих елементів і огорожень та ін.

У спорудах порівняно простого обрису та незначних за розмірами ці контрольні вимірювання не є складними і виконуються за допомогою сталевих рулеток, відвісів, нівелірів та ін.

При огляді великих споруд та об'єктів складної конфігурації застосовують спеціальні інструменти для прискорення процесу зйомки та забезпечення її точності. Так, перевірки вертикалі виконують *інструментами вертикального візування*, що дозволяють «робити виноску точок по висоті на 100 м і більше з похибкою, що не перевищує  $\pm 2$  мм. Для нівелювання в тісних і важкодоступних місцях доцільно застосовувати *гідравлічні нівеліри*, що забезпечують високу точність вимірювань.

При необхідності перевірок великих прогонів (у 100 м і більше), як наприклад відстані між центрами опорних площадок уже зведених мостових опор, застосовуються новітні лазерні далекоміри, що прискорюють процес вимірювання і які забезпечують точність близько  $1/25000$  обумовленої довжини.

### **1.3.2. Контроль перерізів і перевірка обрисів відповідальних елементів**

У тих випадках, коли елементи, що перевіряються, доступні для вимірювань, вимірювання перерізів і перевірка обрисів досить прості і виконуються звичайно середнім технічним персоналом. Для прискорення та полегшення вимірювань останнім часом запропоновано ряд пристосувань, наприклад *шаблони з автоматичною фіксацією відхилень* від заданих розмірів, чим у значній мірі зменшується можливість помилок при проведенні контролю.

Більш складним є завдання визначення товщини в конструкціях, доступних при вимірюваннях лише з одного боку. Найбільш грубим (і порівняно ще до недавна – єдиним) способом вимірювання товщини було просвердлювання або, що гірше, пробивання отворів у відповідних місцях конструкцій, що перевіряються. Спосіб цей трудомісткий і в більшості випадків дуже незручний, навіть за умови наступного закладення отворів, тому що пов'язаний з порушенням суцільності матеріалу та можливістю пошкоджень.

Усі ці труднощі зникають при застосуванні з цією метою «товщинометрії», сучасних *неруйнівних методів контролю*. Зрозуміло, застосування цих методів вимагає наявності відповідної апаратури та підготовленого для роботи з нею персоналу.

## **1.4. Виявлення та реєстрація осідань і пошкоджень**

### **1.4.1. Осідання та зсуви**

Відомості про осідання та взаємні зсуви окремих споруд повинні бути отримані перед їх оглядом від геодезичної служби. Ці дані перевіряються на місці вибірковими контрольними вимірюваннями.

У випадку відсутності або недостатності зазначеної документації та виявлених при огляді ознак осідання та зсувів для їхнього уточнення повинна бути організована геодезична зйомка.

Надійною ознакою, що дозволяє судити про наявність нерівномірних осідань, є розвиток легко відрізнених за їх зовнішнім виглядом *осадових тріщин* у споруді. Значні вертикальні тріщини, які мають велике розкриття внизу та загасаючі вгорі свідчать про нерівномірне осідання опор, про недостатню несучу здатність фундаменту як показано на рис. 1, 2.



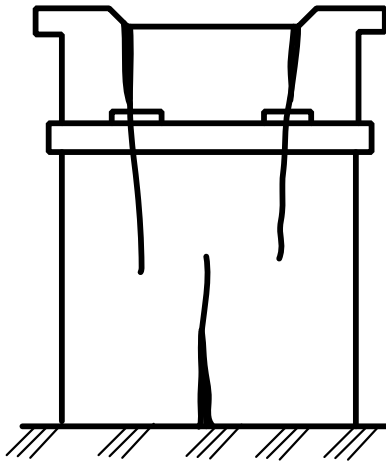


Рис. 1. Тріщини в кладці опори при її осіданні

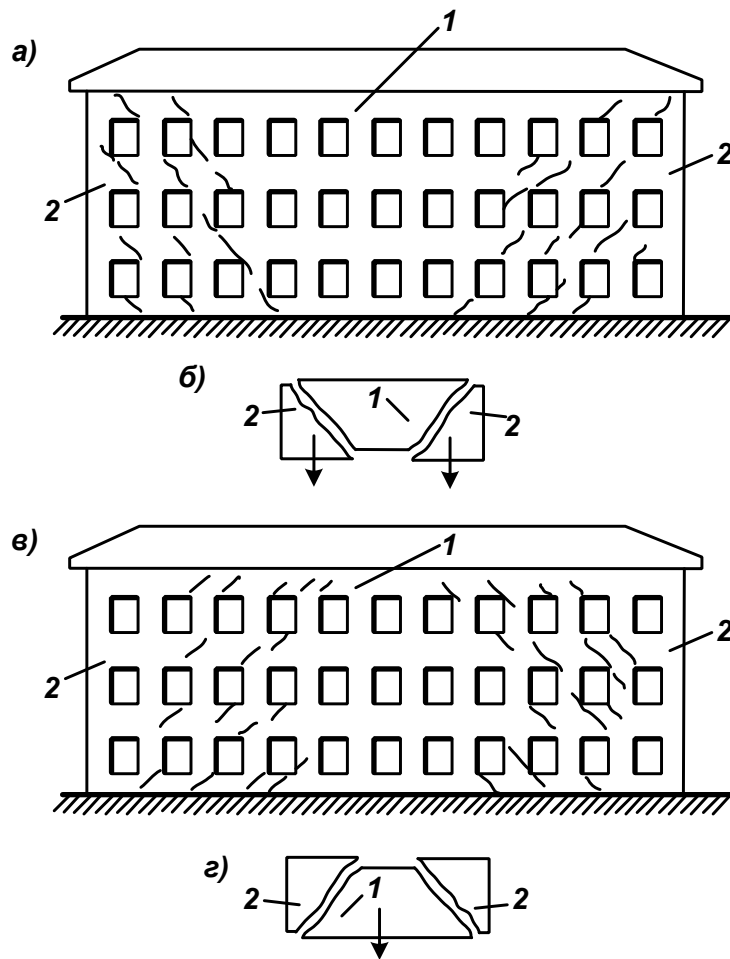


Рис. 2. Тріщини в стінах будинків при осіданні різних його частин:  
 а - при переважних осіданнях країв будинку; в - при осіданні  
 середини фасаду; б і г - схеми переміщень; 1 - середина  
 фасаду; 2 - краї будинку

Показані тріщини (рис. 2), що з'являються в перемичках багатоповерхового кам'яної будівлі при осіданні країв будівлі (рис. 2, а). і при осіданні середини фасаду (рис. 2, в).

Для реєстрації осідань будівель та споруд використовують нівелірні марки (рис. 3) стандартного зразку.

При встановленні наявності осідань і зсувів необхідно виявити причини та вирішити питання про необхідні профілактичні заходи, наприклад, посилення фундаментів, закріплення ґрунтів та ін.

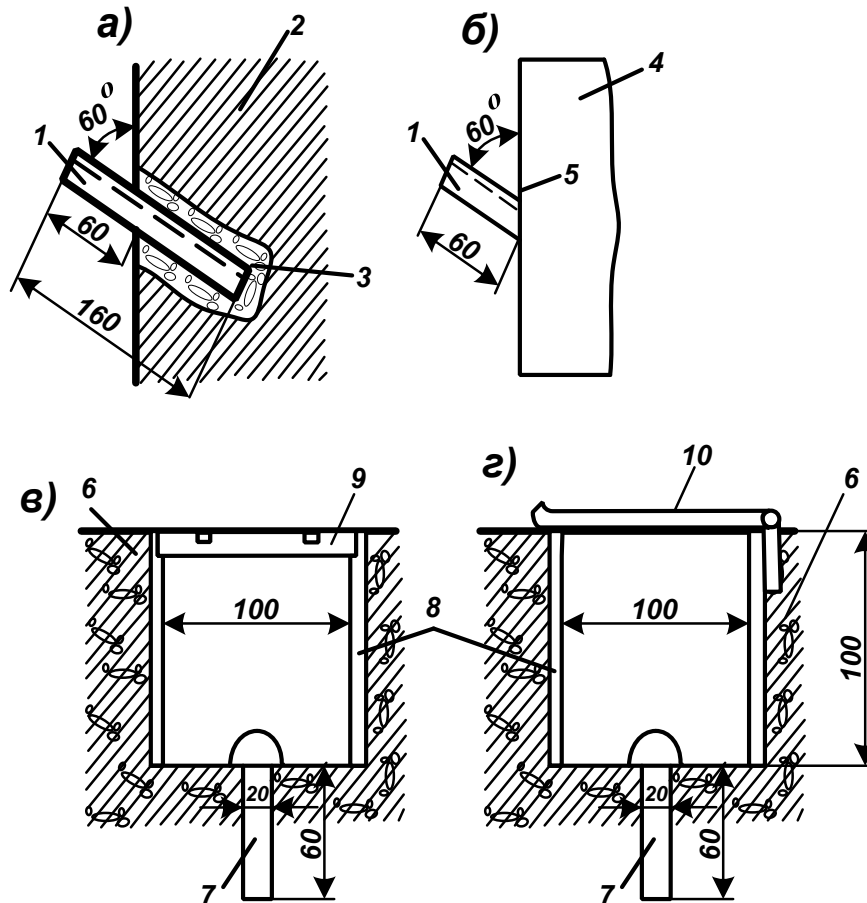


Рис. 3. Нівелірні марки для стін та фундаментних плит:  
 а - у кам'яних стінах; б - на сталевих колонах; в - з кришкою, що угвинчується; г - з відкидною кришкою; 1 - сталеві кутики 30×5; 2 - кам'яна стіна; 3 - цементний розчин; 4 - сталева колона; 5 - зварений шов; 6 - бетонна плита; 7 - сталева заклепка; 8 - патрубок; 9 - кришка, що угвинчується 10 - кришка на петлі

### 1.4.2. Розвиток тріщин і розкриття швів

Виявлені при огляді тріщини, відколи, розкриття швів та інші аналогічні пошкодження, які не підлягають негайному усуненню, повинні бути ретельно обміряні та позначені як на самому об'єкті, так і на відповідних схемах. Усі ці дані передаються потім експлуатаційникам для подальших спостережень за станом споруди.

У будівельній практиці найпоширенішим (але недосконалим) способом спостереження за тріщинами було перекриття їх *гіпсовими маяками* (рис. 4). При тривалому розширенні тріщини маяк лопається, і за шириною щілини, що утворилася в ньому, можна судити про інтенсивність розкриття тріщини під маяком; однак зменшення тріщини може бути виявлене з великими труднощами. Належне збереження самого маяка важко гарантувати, і спосіб цей у теперішній час не може бути рекомендований.



Рис. 4. Перекриття тріщини гіпсовим маяком

Для фіксації як розкриття, так і зменшення ширини тріщин і швів, а також зрушень уздовж них, використовують ряд прийомів. Найпростішим є спостереження за зміною взаємного положення пари міток, нанесених на поверхню об'єкта по обидва боки спостережуваної тріщини або шва. Для тривалих вимірювань користуються різними приладами, що перекривають тріщину або шов, - *щілиномірами* (у тому числі й електричного принципу дії) як поверхневими (накладними), так і глибинними.

Для визначення глибини тріщин, що виходять на поверхню, будівельники застосовують гнучкі металеві щупи різної товщини. Однак вони не можуть дати вичерпного уявлення про дійсну глибину тріщин, які поступово, як правило, звужуються. Точні вимірювання виконуються шляхом застосування новітніх фізичних методів дослідження, як наприклад, з використанням ультразвукових випромінювань.

У масивних бетонних блоках при дослідженні глибоких тріщин користуються *методом підсікання* (рис. 5). Під кутом 45-60° до площини поширення тріщини пробурюють ряд шпар. Отвори їх перекривають тампонами, у шпари нагнітають повітря або воду під тиском у кілька атмосфер, переходячи послідовно від однієї шпари до іншої. Про глибину проникнення тріщини судять при цьому за виходом з неї повітря або появою на поверхні (біля її країв) мокрих плям.

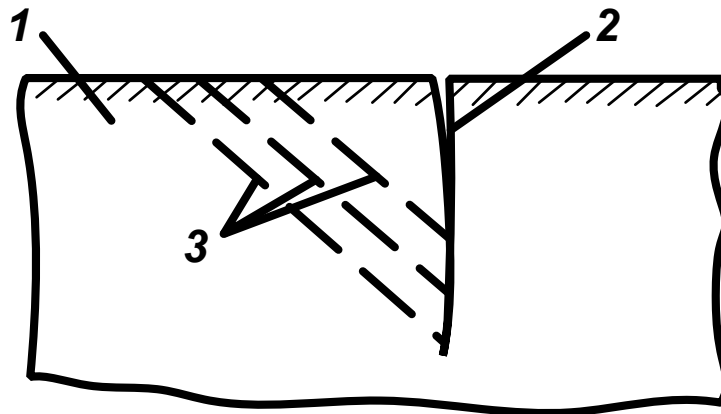


Рис.5. Визначення глибини поширення тріщини методом підсікань:

1 – бетонний масив; 2 – тріщина; 3 – свердловини

Слід зазначити, що поведження тріщин, швів, розладу з'єднань і т.п. є важливими показниками стану споруди. Уважне спостереження за ними при правильній оцінці отриманих даних дозволяє вчасно поставити «діагноз» про сховані небажані явища, що відбуваються в споруді, і вжити необхідних профілактичних заходів, не чекаючи серйозних порушень її працездатності.

## **1.5. Перевірка якості та стану матеріалів і з'єднань**

### **1.5.1. Загальні дані**

Перевірці підлягають найголовніші параметри, які характеризують рід матеріалу та з'єднань і умови їх роботи. Операції, які при цьому виконуються, розподіляються на такі групи:

1) **визначення фізико-механічних характеристик** - міцності, деформативності (зокрема значення модуля пружності), однорідності, середньої щільності, вологості;

2) **дефектоскопія матеріалів і з'єднань** - порушення суцільності (тріщини, відколи, розшарування, порожнечі та ін.), сторонні включення, ураження корозією, гниттям і т.п.;

3) **товщинометрія** — в основному, для конструкцій, доступних при вимірюваннях лише з одного боку (коли без улаштування отворів не можуть бути виконані звичайні геометричні вимірювання);

4) в окремих випадках доводиться, крім того, перевіряти **хімічний склад і структуру** матеріалів, які застосовуються.

У результаті зроблених вимірювань встановлюється «марка» матеріалу, тобто оцінюються *фактичні* фізико-механічні характеристики матеріалу в даній споруді, перевіряється стан матеріалу та з'єднань і відповідність їх вимогам експлуатації.

При приймальних оглядах основним завданням є зіставлення проектних вимог з дійсними характеристиками застосованих

матеріалів. При повторних оглядах (якщо вони бувають) виявляються зміни цих характеристик в умовах експлуатації.

За способом проведення необхідних досліджень і вимірювань застосовані методи можуть бути віднесені до таких основних груп:

1) способи, пов'язані з *відбором зразків*. Характерним для цієї групи способів є *порушення цілісності матеріалу*, неминуче при вийманні зразків навіть щонайменшого розміру;

2) *неруйнівні методи*, коли всі вимірювання виконуються безпосередньо на об'єкті, без пошкодження його елементів;

3) до проміжної групи належать методи, що не вимагають виймання яких-небудь зразків, але все-таки, більшою або меншою мірою залишають на об'єкті сліди зроблених операцій (наприклад вм'ятини на поверхні).

### **1.5.2. Відбір зразків**

Відбір будь-якого зразка пов'язаний з ослабленням елемента, що досліджується. Однак для масивних бетонних блоків відбір зразків практично невідчутний, тому що порожнечі, що утворилися, можуть бути надійно заповнені бетоном. У металевих конструкціях вирізання навіть невеликих шматків металу з відповідальних елементів досить небажане та вимагає потім ретельної роботи з відтворення повної працездатності ослаблених перерізів.

Для одержання вичерпного уявлення про роботу всієї споруди в цілому, для судження про однотипність матеріалу недостатньо одиничних зразків, потрібна велика кількість проб, узятих з десятків, а для великих споруд із сотень точок. Тим часом, відбирання такої кількості проб є трудомістким завданням, виконання якого не завжди може бути забезпечене в необхідні, звичайно стислі, терміни.

У той же час результати випробувань зразків можуть в окремих випадках дати не цілком правильне уявлення про стан матеріалу безпосередньо в споруді. Розбіжності можуть бути викликані пошкодженням матеріалу зразка в процесі його

відбирання, а також зміною характеристик матеріалу зразка від моменту його відбирання до моменту випробування.

**Відбір зразків в металевих конструкціях.** Заготовки для зразків беруться звичайно шляхом вогневого різання. При розмітці зразків для їх наступного механічного вирізання варто відступати не менш ніж на 10 мм від грані заготовки для виключення зони, що утворилася при вогневому різанні, термічного впливу зі зміненою структурою матеріалу. Досить перспективним є застосування електроерозійного різання, що забезпечує можливість відбору зразків будь-якого обрису без наступної обробки крайок.

Для зменшення ослаблення перерізів зразки звичайно беруться мінімальних розмірів, передбачених стандартами. Вирізки в елементах конструкції повинні бути потім заповнені вварюванням відповідних вставок з підсиленням їх, якщо буде потреба, додатковими накладками. Дуже важливо, щоб залишкові напруги зварювання у швах, які знову наносяться, не погіршували умов роботи елементів і не створювали б можливості появи в них крихких тріщин.

**Відбір зразків бетону.** На відміну від металу, для бетону як матеріалу неоднорідного, із заповнювачами різної фракції, утруднена можливість випробування на малих зразках.

Основним утрудненням при відборі бетонних зразків є можливість їхнього пошкодження. Найкращим способом є **висвердлювання** бетонних циліндрів (рис. 6 та 7) діаметром 50 ÷ 150 мм за допомогою спеціальних свердильних установок (NORTON CB 2000 та ін.), які оснащені алмазними коронками.

Порожнечі, що утворилися в елементах споруд після виймання заготовок для зразків, повинні бути відразу ж замуrowані. Бажано застосовувати для цього бетон на безусадковому цементі, щоб уникнути появи тріщин по поверхнях стикування заповнення зі старою кладкою.



Рис. 6. Відбір зразків бетону за допомогою свердильної установки NORTON CB 2000



Рис. 7. Відбір зразків у стіні та склепінні тунелю за допомогою свердильної установки

Якщо зразки, узяті зі споруди, випробовуються не негайно ж після їхнього відбору, то доводиться зважати на можливість поступової зміни фізико-механічних характеристик бетону зразків при їхньому зберіганні. Відомо, наприклад, що у великих блоках бетон усередині масиву може за своїми характеристиками, у тому числі і за міцністю, відрізнятися від зовнішніх шарів того ж масиву. Після відбору з блока глибинного зразка останній при зберіганні виявляється вже в інших умовах, і його міцність може почати швидко зростати. Зразок перестає характеризувати стан



аналогічного матеріалу, що залишився в глибині споруди. Основною вимогою є якнайшвидше випробування бетонних зразків, узятих зі споруди.

**Відбір зразків деревини.** У дерев'яних конструкціях вирізка зразків для лабораторної перевірки фізико-механічних характеристик, як правило, недоцільна. Варто врахувати також, що несуча здатність дерев'яних споруд залежить не тільки від загальних характеристик матеріалу, але й від наявності або відсутності дефектів і пошкоджень деревини, і особливо від її загнивання. Для виявлення та оцінки цих факторів потрібні не лабораторні випробування, а уважний огляд.

Якщо зразки для лабораторних випробувань все-таки будуть узяті, то необхідно зберегти їх від зміни вологості. Для цього відразу після відбору вирізані заготовки деревини повинні бути залиті шаром парафіну або поміщені в герметично закриті посудини або пакети, що виключають можливість її висихання. Місця відбору зразків повинні бути надійно забиті вставками на клею, накладками, якщо в цьому виявиться необхідність, антисептовані.

### **1.5.3. Прилади для вимірювання товщини захисного шару бетону та пошуку арматури**

Величина захисного шару бетону відіграє велику роль у довговічності залізобетонних прогонових будов залізничних мостів, опор, водопропускних труб, захищаючи робочу арматуру від корозії через проникнення води. Таким чином якомога точніше визначення товщини захисного шару бетону, кількості стержнів робочої арматури, її діаметра та розташування дають основу для визначення зносу прогонової будови, опори, труби тощо.

Вимірювання товщини захисного шару бетону, діаметра арматури та її розташування в залізобетонних конструкціях провадять з використанням приладів, в основі яких лежать електромагнітний та радіографічний методи.

Наведені нижче прилади дають достовірну інформацію, але не є обов'язковими для використання. Дозволяється користуватись

іншими серійними приладами, які пройшли перевірку у встановленому порядку в центрах стандартизації, метрології та нормативного забезпечення, і дають можливість отримати інформацію з необхідним ступенем точності.

**1.5.3.1. Вимірювач захисного шару залізобетонних конструкцій ИЗС-10Н** (рис. 8) призначений для вимірювання товщини захисного шару бетону та визначення розташування арматури діаметром від 4 до 8 мм класу А-І і діаметром від 10 до 32 мм класу А-ІІ у залізобетонних виробках і конструкціях при армуванні згідно з ГОСТ 22904-78 в умовах підприємств будівельної індустрії, будівельних майданчиків, а також будівель і споруд, які експлуатуються.



Рис. 8. Прилад "ИЗС-10Н"

Принцип дії приладу базується на реєстрації змін комплексного опору датчика-перетворювача, який виникає при взаємодії електромагнітного поля датчика-перетворювача з арматурним стержнем у залізобетонній конструкції.

Прилад має такі основні технічні характеристики:

- робоча температура повітря, °С -10...+40;
- відносна вологість повітря, % 90;

- атмосферний тиск, мм рт. ст. 650...800;
  - робочий діапазон захисного шару, мм:
    - для діаметрів 4...10 мм 5...30;
    - для діаметрів 12...32 мм 10...50;
  - робочий діапазон визначення розташування проекції стержнів арматури на поверхню бетону:
    - діаметром 4...10 мм при товщині захисного шару бетону до 30 мм;
    - діаметром 12...32 мм при товщині захисного шару бетону до 50 мм;
- діаметри, які контролюються, мм, 4, 5, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 22, 25, 28, 32;
- межа допустимої основної похибки вимірювання товщини захисного шару, мм, при кроках арматури 100 мм і більше при діаметрі стержнів від 4 до 10 мм, та кроках арматури 200 мм і більше при діаметрі стержнів від 12 до 32 мм

$$\pm(0,5+0,05\times h),$$

де  $h$  - товщина захисного шару бетону;

- живлення приладу від електромережі з частотою  $50\pm 0,5$  Гц і напругою  $220 \pm 22$  В або двох пар батарей 3336;
- час безперервної роботи при живленні від батарей, год 8;
- габаритні розміри приладу, мм:
  - електронний блок  $282\times 180\times 125$ ;
  - датчик-перетворювач  $220\times 87\times 84$ ;
  - блок живлення  $100\times 60\times 55$ ;
- маса приладу - не більше 4,5 кг.

**1.5.3.2. Вимірювачі захисного шару бетону та розташування арматури в залізобетонних конструкціях "Пошук - 2,3" та "Пошук - 2,4" мають такі основні технічні характеристики (рис. 9):**

- робочий діапазон захисного шару, мм:
  - для діаметрів 3...4 мм 0...90;
  - для діаметрів 10...18 мм 0...120;

- для діаметрів 25...50 мм 10...130;
- гранична межа чутливості приладу, мм 300;
- гранична робоча товщина, мм 170;
- діаметри, які контролюються, мм 3...50;
- похибка вимірювання діаметрів не нормується;
- мінімальний крок арматури, яка контролюється, мм
- для діаметрів 3...10 мм 100;
- для діаметрів 12...50 мм 200;
- межа похибки вимірювання захисного шару, мм,

$$\pm(0,5 + 0,03 \times h),$$

де h - товщина захисного шару бетону;

- живлення приладу від акумуляторних батарей типу АА, В 3,0/2,5;

- час безперервної роботи (без підсвічування), год 25;

- габаритні розміри приладу, мм:

вимірювача 146×72×25;

- датчика 150×32×37;

- маса, кг:

- вимірювача 0,14;

- датчика 0,20.

Основні функції приладів такі:

- вимірювання товщини захисного шару бетону при відомому діаметрі арматури;

- вимірювання товщини захисного шару та невідомого діаметра арматури (тільки "Пошук - 2,3");

- автоматизоване настроювання на будь-які марки сталей, у тому числі й на невідомі (тільки "Пошук - 2,3");

- акустичний пошук арматури (тільки "Пошук-2.3");

- комбіноване відображення товщини захисного шару в цифровому вигляді та лінійним індикатором;

- енергонезалежна пам'ять 800 результатів вимірювань з реєстрацією в реальному часі та можливістю розглядання результатів за номерами і за датами;

- адресна орієнтація вимірювань за видом арматури (стержні, дріт, канати, пасма) і за видом сталей (тільки "Пошук-2,3");
- повноцінне відображення результатів вимірювань на графічному дисплеї;
- автоматична термокомпенсація та калібрування приладу;
- діалоговий режим роботи користувача з приладом за допомогою меню, клавіатури і текстових повідомлень;
- індикація ступеня розряду батареї живлення приладу з видачею повідомлення про необхідність її зарядження;
- автоматичне вимикання приладу при перервах у роботі;
- вибір мови текстових повідомлень (російська або англійська);
- інфрачервоний оптоінтерфейс для зв'язку з комп'ютером (тільки "Пошук-2,3").

Особливостями приладів є виконання датчиків з копролону у вигляді призм з боковими проточуваннями. Опорна частина датчиків захищається від стирання сталевими кульками, які забезпечують також хороше ковзання датчиків по поверхні конструкції.

Програма комп'ютерної обробки призначена для перенесення результатів вимірювань у комп'ютер, їх збереження, перегляд і вибирання з масиву, а також друкування відібраних результатів у табличній і графічній формах з наведенням часу та дати проведення вимірювань, виду вимірювань, значення товщини захисного шару, діаметра і виду арматури.

Передбачено пересилання інформації в EXCEL для подальшої обробки.



Рис. 9. Прилад "Пошук-2.3"

**1.5.3.3. Вимірювач напруги і коливань ИНК-2,3** (рис. 10) призначений для вимірювання механічних напруг і параметрів коливань при вібрації об'єктів контролю при вирішенні виробничих і наукових завдань.

Основне призначення приладу – вимірювання частотним методом згідно з ГОСТ 22362-77 механічних напруг в окремих елементах залізобетонних конструкцій з попередньо напруженою арматурою й стержнів, дроту або пасом, а також визначення параметрів коливань різних вібраційних установок, які використовуються для ущільнення бетонної суміші.

Визначення величини механічних напруг і параметрів вібраційних коливань здійснюється автоматично з інтелектуальною обробкою інформації та виконанням розрахунків за допомогою сигнального мікроконтролера.

Прилад видає величину напруги в мегапаскалях та її відхилення від проектного значення у відсотках, виправлення на

довжину арматурного стержня у міліметрах, швидкість вібрації, вібраційні переміщення та частоту за кожним із 600 вимірювань.

Технічні характеристики приладу такі:

• робочий діапазон температур, °С	-5,...+45;
• відносна вологість повітря, %	80;
• атмосферний тиск, мм рт. ст.	650...800;
• діапазон вимірювання:	
- частот, Гц	5...200;
- напруги, МПа	50...200;
- амплітуда коливань, мм	0,01,...2;
- вібраційна швидкість, мм/г	0,1,...250;
• межі основної похибки вимірювань, яка допускається, %:	
- частоти	0,2;
- напруги	4,0;
• амплітуди коливань і вібраційної швидкості	6,0;
• живлення приладу без підсвічування, мА	2,0;
• час безперервної роботи, год	30;
• габаритні розміри вимірювача, мм	140×70×25;
• маса вимірювача, кг	0,12;
• маса датчика напруги, кг	0,15;
• маса вібродатчика, кг	0,03;
• довгочасна пам'ять результатів	1200.

Основні функції приладу:

- адресна орієнтація на об'єкт контролю;
- вимірювання частот і амплітуд коливань;
- аналіз та інтелектуальна обробка інформації;
- обчислення та індикація напруги, середньоквадратичного значення, вібраційної швидкості, амплітуди, частоти, відхилення напруги і довжини стержня від проектного значення;
- реєстрація до 1200 результатів вимірювань;
- відображення інформації на графічному дисплеї з підсвічуванням;
- інфрачервоний інтерфейс.



Рис. 10. Прилад "ИНК-2.3"

#### 1.5.4. Оцінка міцності металу

Найбільше застосування в будівельній практиці має прилад Польді (рис. 11, 12) ударної дії; при цьому твердість матеріалу визначається за Бринеллем.

Наконечником приладу є кулька 2 діаметром 10 мм з твердої загартованої сталі, що дає при ударі відбиток одночасно на металі 1 і на сталевому еталонному бруску 3, міцність якого  $HB^{ET}$  повинна бути заздалегідь визначена.



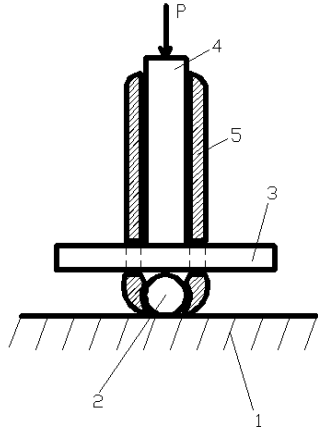


Рис. 11. Схема приладу Польші:  
 1 – матеріал, що досліджується;  
 2 – сталеві кулька; 3 – еталонний брусок; 4 – ударний стержень; 5 – обойма приладу

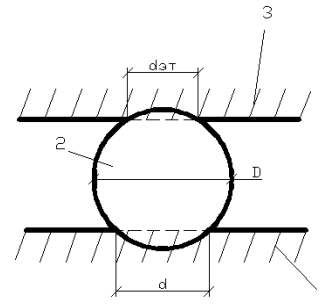


Рис.12. Відбитки, одержувані за допомогою приладу Польші:  
 1 – матеріал, що досліджується;  
 2 – сталеві кулька; 3 – еталонний брусок;  $d$  – діаметр відбитка на поверхні матеріалу, що досліджується;  $d_{ET}$  – те ж на еталонному бруску

Для одержання відбитків ударяють молотком по верхньому торцю стержня 4. Якщо  $P$  – сила, що діє на кульку, то твердість  $HB$  досліджуваного металу за Бринеллем визначається зі співвідношення

$$HB = HB^{ET} \frac{D - \sqrt{D^2 - d_{ET}^2}}{D - \sqrt{D^2 - d^2}},$$

де  $d$  – діаметр відбитка (вм'ятини) на досліджуваному матеріалі;  
 $d_{ET}$  – діаметр відбитка на еталонному бруску;  
 $D$  – діаметр кульки 2.

Визначення міцності та марки сталі виконується за відповідними таблицями. Для термічно легованих сталей у порівнянні з вуглецевою вводиться поправочний коефіцієнт.

За допомогою приладу Польді можна одержати лише орієнтовні характеристики. Але й з урахуванням цього застосування приладу практично корисно, особливо в таких випадках:

- для прискореної перевірки однорідності металу в різних конструкціях;
- при відбракуванні (перевірці) марок металу, які надходять.

### **1.5.5. Прилади для неруйнівного методу контролю міцності бетону**

Прилад типу КМ – пружинний напівавтомат ударної дії із заданою енергією удару. Його будова показана на рис. 13 . При русі ударника всередину корпусу відбувається накопичення потенціальної енергії внаслідок розтягнення ударної пружини. На показники приладу впливає вид щебеню та його розташування. Вплив глибини розташування щебеню на показники міцності враховується шляхом вилучення значень, які відрізняються від середніх на 15%.

Рис. 13. Конструкція приладу КМ:

1 – ударник; 2 – ударна пружина; 3 – бойок; 4 – покажчик;  
5 – шкала; 6 – тримач; 7 – засувка; 8 – упорний болт; 9 – рукоятка

На показники приладів, у яких використовують принцип пружного відскоку, впливає вологість бетону, яка враховується при обробці результатів вимірювань, множенням первісного значення

на поправочний коефіцієнт. Значення поправочного коефіцієнта приймається при вологості: природній - 1,00, підвищеній - 1,15, повному насиченні - 1,30.

Тарувальні криві для приладу КМ наведені в [14].

**Молоток М. П. Кашкарова**, призначений для випробування міцності бетону, наведений на рис. 14. У приладі використовується метод розрахунку міцності бетону через еталон (металевий стержень). Вважається, що модуль пружності металу еталонного стержня відомий. При визначенні міцності бетону удар по його поверхні наноситься змахом самого еталонного молотка. При ударі бойок (сталева кулька діаметром 15 мм від підшипника) залишає на поверхні бетону та на еталонному стержні (круглого перерізу сталі Ст. 5 діаметром 10 мм) вм'ятину.

Рис. 14. Конструкція еталонного молотка К.П. Кашкарова:

1 - корпус; 2 - металева рукоятка; 3 - головка; 4 - пружина;  
5 - склянка з отворами для кульки та еталонного стержня;  
6 - еталонний стержень; 7 - металева кулька

Перед випробуванням бетону еталонний стержень загостреним кінцем вставляють у стакан молотка, переборюючи при цьому опір

пружини. Під дією пружини кулька молотка притискається до еталонного стержня, а останній до внутрішнього упора головки.

При підвищеній вологості первісне значення межі вологості слід скорегувати, помноживши його значення на поправочний коефіцієнт, який залежить від вологості конструкції та приймається при:

- природній вологості 1,00;
- підвищеній вологості 1,20;
- повному насиченні 1,40.

Крім цього, вік споруди враховується також відповідним поправочним коефіцієнтом, який становить 0,75, якщо вік більше року.

Для використання приладу у виробничих умовах необхідно будувати тарувальну криву з урахуванням конкретних складів бетонів, які використовуються для виготовлення конструкцій та прийнятої технології. При неможливості побудувати тарувальну криву слід використати криву НДІ Мостобуду, яка наведена в [14].

**Прилад типу ХПС** - пружинний напівавтомат ударної дії з двома заданими енергіями удару. Конструкція приладу наведена на рис. 15. Накопичення потенціальної енергії відбувається внаслідок стиснення ударної пружини при вдавлюванні ударника всередину корпусу.

На результати випробування міцності бетону впливають підвищена вологість і його вік. Вплив вологості конструкції корегується за допомогою коефіцієнта, значення якого при відсутності експериментальних даних приймається в розмірі при: природній вологості - 1,00, підвищеній вологості - 1,20, повному насиченні - 1,40.

Тарувальні криві для визначення міцності бетону для приладу типу ХПС з енергією удару 4,9 та 1,22 Дж наведені в [14].

Надійність результатів випробувань залежить від стану приладів. Поверхні ковзання ударного стержня перед використанням треба протирати тканиною злегка просоченою мастилом. Кульку та оправу на ударному стержні необхідно систематично чистити, деформовані чи пошкоджені кульки замінювати.

Рис. 15. Конструкція портативного приладу ХПС:

1 - ударний стержень; 2 - стержень для перемикання; 3 - бойок; 4 - корпус приладу; 5 - ударна пружина; 6 - заскочка для вмикання сегмента в положення 1/2; 7 - заскочка для вмикання сегмента в положення 1/1; 8 - тримач заскочок; 9 - конічна гільза

**Прес-насос ГПНВ-5** (рис. 16). Основною частиною приладу є корпус, який складається з траверси з робочим циліндром 8. Він має отвори для проходу штока 7 робочого поршня.

До штока кріпиться підвісна муфта 6 для з'єднання з виривним стержнем або конусом 5. На корпусі передбачені гнізда для висувних ніжок, насоса і манометра. Робочий циліндр щільно закритий кришкою. Поршень робочого циліндра складається з сталевого диска зі штоком. За допомогою шайби та гайки до диска щільно притискається манжет з мастиlostійкої гуми. Між робочим поршнем і кришкою розташована пружина.

Насос складається з циліндра, верхньої кришки, поршня з гвинтовим штоком та рукоятки. Циліндр насоса угвинчується в гніздо корпусу приладу.

У ніжках приладу є сферичні заглиблення для розміщення сталевих кульок 4 діаметром 15,88 мм, які утримуються спеціальними наконечниками 3.

Тарувальні криві для визначення міцності бетону при використанні розтисненого конуса, виривного стержня, а також у залежності від діаметра відбитка кульки наведені в [3].

Рис. 16. Гідравлічний прес-насос ГПНВ-5:

1 - насос; 2 - висувна ніжка; 3 - наконечник; 4 - кульки;  
5 - розтиснений конус; 6 - підвісна муфта; 7 - шток (тяга);  
8 - робочий циліндр; 9 – манометр

**Склерометр Шмідта.** Конструкція цього приладу наведена на рис. 17, а опис в [15, 16].

Для визначення міцності бетону використовується склерометр Шмідта №24 (для мостів і труб). Використання склерометра дозволяє досить швидко визначати міцність бетону будь-яких елементів бетонних та залізобетонних споруд.

Місця замірів обирають таким чином, щоб не було напливів від стиків дощок або листів металевої опалубки, раковин або пористих ділянок.

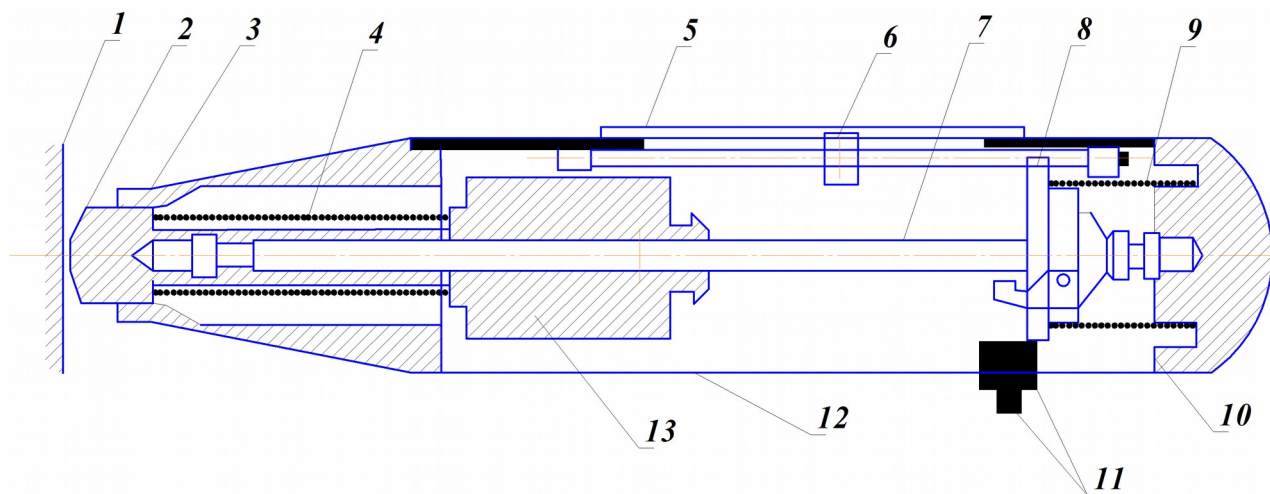


Рис. 17. Конструкція склерометра Шмідта:

1 - бетонна поверхня; 2 - ударний стержень; 3 - ковпачок;  
 4 - ударна пружина; 5 - вікно зі шкалою; 6 - движок зі стержнем;  
 7 - напрямний стержень; 8 - напрямна шайба;  
 9 - пружина; 10 - кришка; 11 - стопорна кнопка; 12 - корпус;  
 13 - молот

Якщо випробування міцності бетону відбувається на елементах, які мають товщину менше 15 см, то необхідно перед вимірюваннями встановлювати розпірки для запобігання впливу пружності конструкції.

Перед виконанням вимірювань необхідно старанно підготувати поверхню бетону. Поверхня бетону на ділянках, які обрані для випробувань, повинна бути очищена від пилу і бруду.

Графіки для визначення міцності бетону в залежності від величини відскоку ударної частини склерометра наведені для діапазону 10...70 МПа і нанесені на корпус приладу, а також подані в [15, 16].

Криві склерометра були побудовані на основі вимірювань, що виконувалися на дуже великій кількості зразків, які після випробувань склерометром роздавлювали пресом.

Оскільки точність визначення міцності бетону знижується з погіршенням його якостей, при отриманні відліку 25 кількість замірів необхідно збільшувати.

Склерометр Шмідта має довжину 350 мм, діаметр 55 мм і масу 1 кг.

Прилад "Онiкс-2,4" (рис. 18) призначається для визначення міцності бетону на стиснення без його руйнування ударно-імпульсним методом (згідно з ГОСТ 22690-88 і ГОСТ 18105-86) при технологічному контролі якості, обстеження будівель, споруд та різних конструкцій.

Новий метод контролю, який застосовано в приладі, дозволяє в 1,5...2 рази скоротити кількість ударів серії, яка необхідна для отримання результатів заданої точності.

Конструкція датчика та його малий важіль дозволяють виконувати роботу з високою інтенсивністю.



Рис. 18. Прилад "Онiкс 2.4"

Цей прилад можливо використовувати і при визначенні твердості, однорідності, щільності та пластичності різних матеріалів, а саме: цегли, штукатурки, композитів тощо.

Прилад має такі основні технічні характеристики:

- діапазон вимірювань міцності, МПа 1...30;  
5...100;
- межа похибки, % 5%;



• живлення приладу від 2 акумуляторних батарей типорозміру AA;

• габаритні розміри приладу:

вимірювача

145 × 75 × 25;

датчика

Ø25 × 160;

• маса вимірювача, кг

0,14;

• маса датчика, кг

0,16;

• робочий діапазон температур, °C

-10... +50.

Основні функції приладу такі:

• автоматичне врахування віку бетону;  
• енергозалежна пам'ять з реєстрацією в реальному часі та можливістю проглядання серійних і внутрісерійних результатів за номерами і датами, а також умов виконання вимірювань;

• інтелектуальна та статистична обробка серії до 15 вимірювань, обчислення коефіцієнтів варіації та розмаху;

• діапазон вимірювань, який переключється програмно;

• адресна реалізація за видами матеріалів: бетон легкий або важкий, цегла керамічна чи силікатна, розчин тощо;

• можливість легкої орієнтації приладу під будь-які види матеріалів і умови споживача введенням в енергозалежну пам'ять приладу коефіцієнтів перетворення, які були отримані при таруванні приладу;

• автоматичне вимикання приладу при його непрацездатності;

• діалоговий режим роботи користувача з приладом за допомогою меню та клавіатури;

• урахування ресурсу роботи датчика за допомогою лічильника ударів;

• вибір мови текстових повідомлень (російська або англійська);

• індикація ступеня розрядження акумуляторної батареї з видачею повідомлення про необхідність її заряджання;

• інфрачервоний оптоінтерфейс для зв'язку з комп'ютером.

**Прилад "Пульсар-1,0"** (рис. 19) призначається для вимірювання часу і швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль у твердих матеріалах при поверхневому та наскрізному прозвучуванні.



Рис. 19. Прилад "Пульсар 1,0"

Прилад дозволяє визначати міцність, щільність і модуль пружності з використанням попередньо встановлених кореляційних залежностей. Основні види матеріалів, які закладені в меню приладу: бетон легкий і важкий, цегла керамічна та силікатна, вуглеграфіт і абразиви.

Основними сферами застосування приладу є:

- визначення міцності бетону згідно з ГОСТ 17624-87 «Бетони. Ультразвуковий метод определения прочности» при технологічному контролі або в разі обстеження будівель і споруд;
- визначення модуля пружності та щільності;
- пошук дефектів у бетонних спорудах за аномальним зниженням швидкості розповсюдження ультразвуку.

Технічні характеристики приладу:

- |  |              |
|--|--------------|
| • діапазон вимірювань часу, мкс                          | 10...2000;   |
| • діапазон вимірювань швидкості, м/с                     | 1000-10000;; |
| • дискретність часу, мкс                                 | 0,1;         |
| • межа відносної похибки вимірювання часу і швидкості, % | 1;           |
| • фіксована база вимірювань, мм                          | 100 або 120; |
| • живлення від 3 акумуляторів АА, В                      | 3,6;         |
| • маса приладу, г  | 500;         |
| • маса датчика, г  | 540.         |

Прилад має великий графічний дисплей (з підсвічуванням), що формує текстові, символні, графічні та цифрові зображення.

При прозвучуванні залізобетонних елементів приладом "Пульсар-1,0" можливо отримати інформацію про міцність і однорідність; модуль пружності та щільності; наявність дефектів і їх локалізацію.

**Молоток для випробувань бетону "DIGI-Schmidt 2"** (рис. 20) призначається для визначення неруйнівними методами однорідності бетону та його міцності на стиснення (у відповідності до Європейського стандарту EN 12398). Молотком, що входить до комплекту поставки, по бетонній поверхні наноситься удар. Відскік бойка залежить від міцності бетону. Ударна твердість вимірюється датчиком і подається на дисплей індикаторного блока та обробляється.



Рис. 20. Молоток для випробувань бетону DIGI- Schmidt 2

У комплект поставки входить:

- 1) індикаторний блок з обсягом пам'яті на 5000 значень, що вимірюються;
- 2) рідкокристалічний дисплей 128×128;

- 3) інтерфейс RS232C;
- 4) вмонтоване програмне забезпечення для друкування результатів вимірювань та передачі їх на персональний комп'ютер;
- 5) блок живлення (комплект з 6 батарейок LR6, 1,5 V з ресурсом роботи 60 год).

Прилад працює в діапазоні температури -10...+60°C;

6) молоток моделі ND з параметрами:

- енергія удару, Нм 2,207;
- діапазон вимірювань міцності бетону на стискання, Н/мм<sup>2</sup> 10...70;
- точність вимірювань ±0,2R;
- відтворюваність ±0,5R.

7) кабель, ремінь, наждачний камінь;

8) футляр для перенесення, мм 325×295×105;

9) загальна маса приладу, кг 3;

10) додаткові пристрої: кабель для принтера, кабель для передачі даних на персональний комп'ютер, випробувальне ковадло.

Для підготовки приладу до роботи молоток приєднується до індикаторного блока і далі, після натискання на кнопку ON, на дисплеї з'являється інформація (номер ударного пристрою та індикаторного блока, встановлена версія програмного забезпечення та остаточний ресурс роботи батарейок живлення).

При проведенні випробувань при шкірному вимірюванні наноситься 10 ударів молотком, при цьому дисплей фіксує такі параметри:

- напрямок удару;
- обчислена величина середнього значення; номер вимірювання;
- одиниці вимірювання;
- номер перевідної кривої;
- коефіцієнт форми;
- виключення викидів;
- обмеження діапазону міцності;
- подавання значень ударної міцності у вигляді піктограми.

Друкування вимірів проводиться на будь-якому принтері, що має серійний порт.

Після проведення 1000 вимірювань молоток необхідно перевірити на випробувальному ковадлі (що додається до нього).

**Прилад "Дефектоскоп А 1220"** (рис. 21) призначається для пошуку різних включень, порожнеч, тріщин у середині виробів з бетону, залізобетону, каменю, пластмас і подібних до них матеріалів при односторонньому доступі до об'єкта.



Рис. 21. Прилад "Дефектоскоп А 1220"

Дефектоскоп можна використовувати для вимірювання товщини виробів, дослідження внутрішньої структури матеріалів та оцінки міцності.

Сфера застосування приладу – пошук дефектів у бетоні, залізобетоні та камені, вимірювання товщини при односторонньому доступі, оцінка структури та міцності неметалів наскрізним прозвучуванням.

Зв'язок з комп'ютером здійснюється через ІК порт або через порт USB.

Конструктивні параметри приладу:

- діапазон дії по глибині в бетоні, мм	0...350 0...700 0...1050
- мінімальний діаметр дефекту, що може бути виявлений, мм	50
- похибка вимірювання глибини, мм	±10
- робоча частота ультразвуку, кгц	55
- живлення	4 сухих елементи або акумулятори АА
- термін роботи від сухих елементів, год	10
- габаритні розміри антенного приладу, мм	145×90×75
- маса антенного приладу, кг	0,76
- габаритні розміри електронного приладу, мм	234×98×33
- маса електронного блока, кг	0,80

**Вимірювач міцності бетону "ОНІКС-ОС"** (рис. 22).  
Призначається для визначення міцності бетону методом викину зі сколюванням згідно з ГОСТ 22690.

Використовується при обстеженні залізобетонних конструкцій, а також при корегуванні коефіцієнтів приладів ударно-імпульсного типу (ОНІКС 2.4/2.5) та ультразвукових (Пульсар).

З додатковими пристосуваннями прилад може використовуватися при випробуванні розчинних зразків, цементних балочок, проб порід матеріалів та для визначення адгезії плитки та покриттів.

Прилад виконано у вигляді гідравлічного преса з конструкцією, що виключає проковзування анкера.

Мікропроцесорний пристрій забезпечує повний контроль процесу навантаження, зусилля викину та його момент, обчислювання міцності та реєстрацію результатів.

Технічні характеристики:

• діапазон вимірювання міцності, МПа	5...100
• зусилля викину анкера, кН	50
• похибка по зусиллю, %	2
• маса приладу, кг	3,7.



Рис. 22. Прилад "Онiкс - ОС"

## **1.6. Перерахунки та загальні висновки за результатами обстеження**

### **1.6.1. Перерахунки на дію експлуатаційних навантажень**

Перерахунок обстежених конструкцій є необхідним у таких випадках:

- при недостатності або повній відсутності розрахункових даних, з чим часто доводиться зустрічатися при обстеженнях давно зведених споруд з незбереженою документацією;

- при наявності невідповідностей між розрахунковими передумовами й встановленими при обстеженні фактичними даними у відношенні прийнятої розрахункової схеми, навантажень, розмірів, властивостей матеріалів і т.д.;

- при наявності дефектів і пошкоджень, що впливають на несучу здатність і деформативність споруди.

За даними перерахунків встановлюється можливість нормальної експлуатації споруди або даються рекомендації про необхідні

обмеження (за величиною навантаження, швидкістю руху та ін.), а також виявляються елементи й з'єднання, що вимагають підсилення.

### **1.6.2. Перерахунок за методом класифікації**

Сутність методу полягає в тому, що найбільше тимчасове навантаження, що витримується безпечно спорудою при регулярній експлуатації, виражається в одиницях «еталонного» навантаження. Певно, таким чином, число одиниць еталонного навантаження для кожного з елементів споруди представляє його клас. За клас усієї споруди в цілому приймається найменший з класів складових його елементів.

Перерахунок за методом класифікації прийнятий при визначенні несучої здатності мостових конструкцій. Він може бути ефективно використаний і щодо інших типів споруд.

### **1.6.3. Перерахунок на випробне навантаження**

Якщо в результаті обстеження приймається рішення про необхідність проведення *випробувань*, то перерахунок завершується підрахунком необхідного випробного навантаження і визначенням відповідних зусиль, напруг, деформацій і переміщень у досліджуваних конструкціях. Ці підрахунки повинні проводитися найбільш точними методами для одержання результатів, які найбільш близько відбивають дійсну роботу споруди, що перевіряється.

### **1.6.4. Висновки за результатами обстеження**

На підставі зробленого обстеження та виконаних перерахунків, складається *загальна оцінка стану обстеженого об'єкта і висновок про можливість його експлуатації*. Вказуються заходи, необхідні для проведення підтримки об'єкта в належному стані, і вимоги, яких потрібно дотримуватися при його експлуатації.

Виявлені дефекти перераховуються у *відомості дефектів*. До цієї відомості додаються необхідні креслення, зарисовки та



фотографії; по можливості вказуються причини пошкоджень і ступінь їхнього розвитку. Особливо відзначаються дефекти та пошкодження, що вимагають негайного усунення, і вказуються рекомендовані терміни проведення інших робіт.

Якщо буде потреба, даються вказівки (на додаток до чинних правил експлуатації) щодо організації та проведення нагляду за станом обстеженої споруди.

Якщо дані обстеження та перерахунку недостатні для висновку про працездатність розглянутого об'єкта і проведення його випробувань буде визнано доцільним, то про це складається мотивований висновок. Намічається характер та обсяг необхідних випробувань і вказуються показники роботи споруди, які підлягають визначенню.

### **Контрольні запитання для самоперевірки**

1. З яких операцій складається обстеження будівель та споруд?
2. З якою документацією необхідно ознайомитися при обстеженні споруд, призначених до здачі в експлуатацію?
3. З яких елементів споруди починають детальний огляд?
4. Які найголовніші розміри повинні бути перевірені при обстеженні?
5. Які спеціальні інструменти застосовують при огляді великих споруд та об'єктів складної конфігурації?
6. Що дозволяє судити про наявність нерівномірних осідань?
7. Найпоширеніший спосіб спостереження за тріщинами?
8. У чому полягає сутність методу підсікання?
9. З якою метою виконується відбір зразків?
10. Призначення приладу вимірювач захисного шару залізобетонних конструкцій ИЗС-10Н.
11. Призначення приладу "ИНК-2.3"?
12. Як працює молоток М.П. Кашкарова?
13. Призначення приладу "Онікс-2,4".
14. Призначення приладу "Пульсар-1,0"?
15. У яких випадках необхідний перерахунок обстежених конструкцій?

16. У якому документі перераховуються виявлені дефекти?

## 2. СТАТИЧНІ ВИПРОБУВАННЯ

### 2.1. Обумовлені характеристики

Необхідність проведення випробувань обумовлена рядом причин:

- умовністю розрахункових схем та їхньою неповною відповідністю реальній роботі споруд (наприклад, неврахування спільного деформування основ, фундаментів та будівель; неврахування непружної роботи залізобетону при розрахунку будівель та споруд, фактичної твердості вузлів та ін.);

- імовірнісним характером фізико-механічних властивостей будівельних матеріалів, навантажень та інших впливів, геометричних розмірів і зміною окремих характеристик у часі;

- необхідністю перевірки реальної роботи конструкцій з нових матеріалів, конструкцій при нових впливах, споруд нової форми.

Перед початком випробувань складають їхню програму, обирають елементи для випробувань. Потім обирають схеми завантаження, види навантаження, режим для статичних випробувань і навантажувальні пристрої та режим – для динамічних випробувань. Призначають прилади й методи вимірювань, складають плани розміщення приладів, визначають заходи щодо техніки безпеки.

Залежно від об'єкта і мети експерименту встановлюються:

- 1) **несуча здатність**, яка характеризується навантаженням, при якому настає втрата міцності або стійкості об'єкта випробування;

- 2) **твердість**, яка характеризується значеннями переміщень, граничними з погляду можливості нормальної експлуатації об'єкта;

- 3) **тріщиностійкість** (у першу чергу для бетонних і залізобетонних конструкцій); тріщини повинні або взагалі не з'являтися, або розкриття їх не повинне виключати або утруднювати експлуатацію внаслідок втрати непроникності, розвитку корозії і т.д.; при визначенні тріщиностійкості встановлюють також

значення навантаження, при якому утворюються тріщини більше припустимих за умовами експлуатації.

## **2.2. Завдання випробувань**

1. При *приймальних випробуваннях* (при передачі закінчених споруд в експлуатацію і проміжних прийманнях у процесі будівництва) перевіряється стан об'єкта та відповідність показників його роботи проектним і нормативним вимогам.

2. *Випробування вже експлуатованих споруд* виконуються:

- для перевірки можливості продовження нормальної служби об'єкта під експлуатаційним навантаженням; необхідність такої перевірки (якщо вона не передбачена в плановому порядку правилами експлуатації) може виникати з появою значних пошкоджень, наприклад після пожежі, поява тріщин і в інших аналогічних випадках, що ставлять під сумнів працездатність споруди;

- для з'ясування можливості підвищення експлуатаційного навантаження при реконструкції об'єкта або зміні характеру його використання.

3. *Випробування конструкцій і деталей при їхньому серійному виготовленні* виконується шляхом вибіркового випробувань окремих зразків продукції з доведенням до руйнування. Завданням випробувань у цьому випадку є встановлення фактичної несучої здатності та інших характеристик випробовуваних зразків продукції з поширенням отриманих результатів на всю виготовлену партію.

4. *Науково-дослідні випробування та випробування дослідних об'єктів виконуються:*

- при застосуванні нових конструктивних рішень і для апробації нових методів розрахунку;

- при використанні нових будівельних матеріалів з характеристиками, що вимагають перевірки під дією навантаження;

- при особливих режимах експлуатації, наприклад у полярних або тропічних умовах, під дією хвиль та морської води й т.д. Такі випробування можуть виконуватися або безпосередньо в натурі, або

лабораторним шляхом зі штучним забезпеченням необхідного режиму.

З погляду впливу процесу випробувань на самі об'єкти необхідно розрізняти:

- об'єкти, які після їхнього випробування повинні бути збережені для експлуатації, - у цьому випадку поява в результаті випробування яких-небудь непоправних пошкоджень або небажаних залишкових деформацій неприпустима;

- об'єкти, не призначені для подальшої експлуатації, - у цьому випадку, якщо це необхідно для вирішення поставлених завдань, об'єкт може бути доведений до руйнування.

### **2.3. Вибір елементів для випробування**

При прикладенні навантаження до споруди в роботу залучаються або всі його конструктивні елементи, або лише окрема їх сукупність, найближчі до місця завантаження. Так, навантаження, прикладене до проїзної частини мосту в будь-якому місці по довжині його прогону, обумовлює появу внутрішніх сил у всіх елементах поясів та ґратах несучих ферм; не включаються в роботу лише окремі так звані «нульові» стержні. При випробуваннях подібного роду споруд декількох положень навантаження буває досить для забезпечення інтенсивної роботи всіх найголовніших елементів. Завдання вибору елементів при призначенні програми випробувань зводиться в цьому випадку до вирішення питання, де найбільш доцільно розміщати вимірювальні прилади для оцінки працездатності та стану споруди в цілому.

З іншим положенням доводиться мати справу в більшості об'єктів промислового і цивільного будівництва, що складаються звичайно з численних однотипних елементів у певному їхньому сполученні. Так, наприклад, у багатоповерховій промисловій будівлі каркасного типу навантаження, прикладене на невеликій ділянці якого-небудь з перекриттів, передається на фундаменти через найближчі ригелі та колони; колони та ригелі, вилучені на кілька прогонів від місця завантаження, майже не залучаються в

роботу. Слабо або зовсім не деформуються ненавантажені плити, що примикають до того ж перекриття, і практично зовсім не працюють перекриття інших поверхів.

При дослідженнях подібного роду споруд вибір елементів для випробування пов'язаний безпосередньо з вибором місця прикладення навантаження. При цьому керуються такими міркуваннями:

- кількість елементів, що завантажуються, повинна бути мінімальною, щоб уникнути надмірних витрат часу та засобів, необхідних для проведення статичних випробувань;

- випробуваннями повинні бути охоплені всі основні види несучих елементів досліджуваної конструкції. У першу чергу випробовують елементи, що працюють найбільш інтенсивно, та елементи з виявленими в них дефектами та пошкодженнями, належна працездатність яких сумнівна;

- відбирають елементи з можливо більш чіткою схемою статичного опирання та закріплення. За інших рівних умов бажано обирати елементи, вільні від додаткових зв'язків з частинами споруди, що примикають, які можуть вносити перекручування в роботу досліджуваних елементів, які важко обчислювати.

При відборі зразків серійного виготовлення для їхніх контрольних випробувань виходять із нижченаведених міркувань.

Для судження про якість виробів розглянутої партії повинні бути випробувані найкращі та найгірші зразки. Відбір їх для статичних випробувань виконується на підставі огляду, контролю неруйнівними методами та попередньою вібраційною перевіркою. Усереднена оцінка дається за результатами випробування зразків у стані, найбільш характерному для більшості виробів даної партії.

## **2.4. Вибір схеми завантаження**

Завантажувальна схема уточнюється одночасно з вибором елементів для випробування, оскільки ці завдання взаємозалежні.

Обрана схема розподілу навантажень повинна забезпечити появу в досліджуваних елементах необхідних напруг і деформацій,

достатніх для виявлення обумовлених характеристик, при цьому варто враховувати наявні реальні можливості (наявність певних видів навантаження та завантажувальних пристосувань) і вартість випробування. Останнє дуже істотно, оскільки зменшення необхідного навантаження спрощує та здешевлює процес проведення випробувань і дозволяє вкладатися в короткі терміни при навантаженні і розвантаженні.

Як приклад розглянемо випадок багатопрогової нерозрізної балки на твердих опорах. На рис. 23, б показана лінія впливу згинального моменту в середині її середнього прогону та схема прикладення рівномірно розподіленого навантаження (рис.23, в), що відповідає максимуму його моменту. Оскільки ординати лінії впливу для крайніх прогонів балки досить малі, завантаження цих прогонів практично не відіб'ється на показаннях приладів, установлених у середньому перерізі досліджуваної балки. З огляду на бажаність економії навантаження, доцільно відмовитися від завантаження крайніх прогонів та прийняти для проведення випробування схему за рис. 23, г.

Виходячи з аналогічних міркувань, встановлюють схеми навантаження і в інших випадках. Так, на рис. 24 показана монолітна плита в поздовжньому та розрізна в поперечному напрямках, підтримувана несучими балками. Для дослідження перерізу *AB* цієї плити необхідно завантажити її рівномірно розподіленим навантаженням на ділянці (уздовж плити), рівному трьом її прогонам. Завантаження ж більш віддалених ділянок практично не відбивається на роботі перерізу *AB*.

На рис. 25 показані завантажувальні схеми для перевірки роботи колони каркасного багатоповерхового будинку із замоноліченими стиками, а на рис. 26 – для випробування елементів поясів та ґрат полігональної ферми.

Зменшення необхідного навантаження можливе при переході до так званих *еквівалентних схем* завантаження.

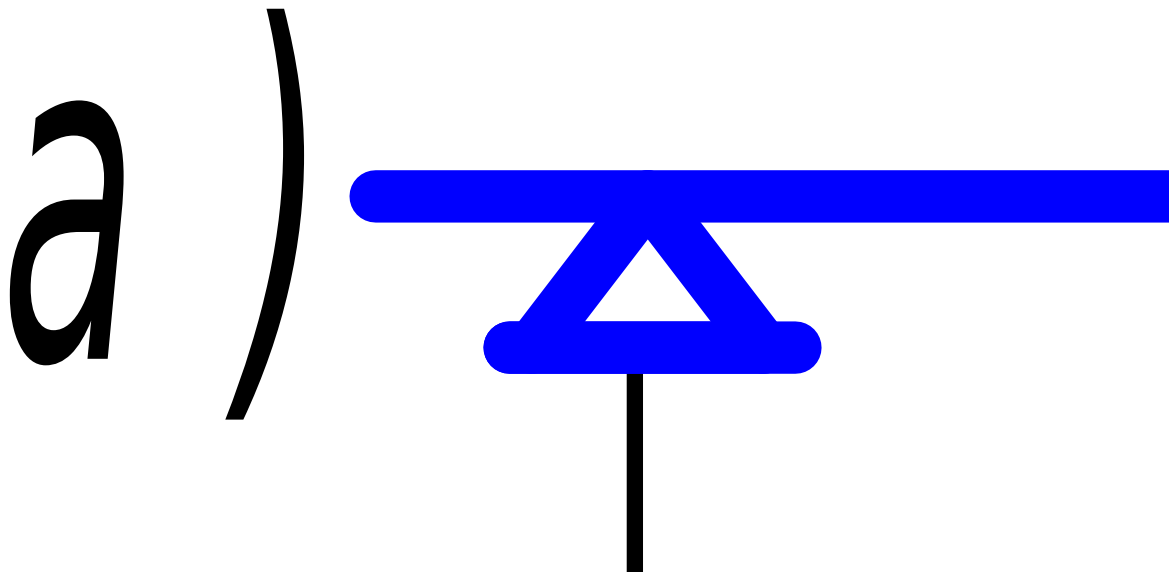


Рис. 23. Завантаження багатопрогової балки на твердих опорах:  
*a* - схема балки; *б* - лінія впливу згинального моменту в  
середньому перерізі; *в* - схема завантаження п'яти прогонів;  
*г* - схема завантаження трьох прогонів

Рис. 24. Завантаження монолітної розрізної плити:

1 - плити; 2 - несучі балки;  
3 - завантажена ділянка випробовуваної плити

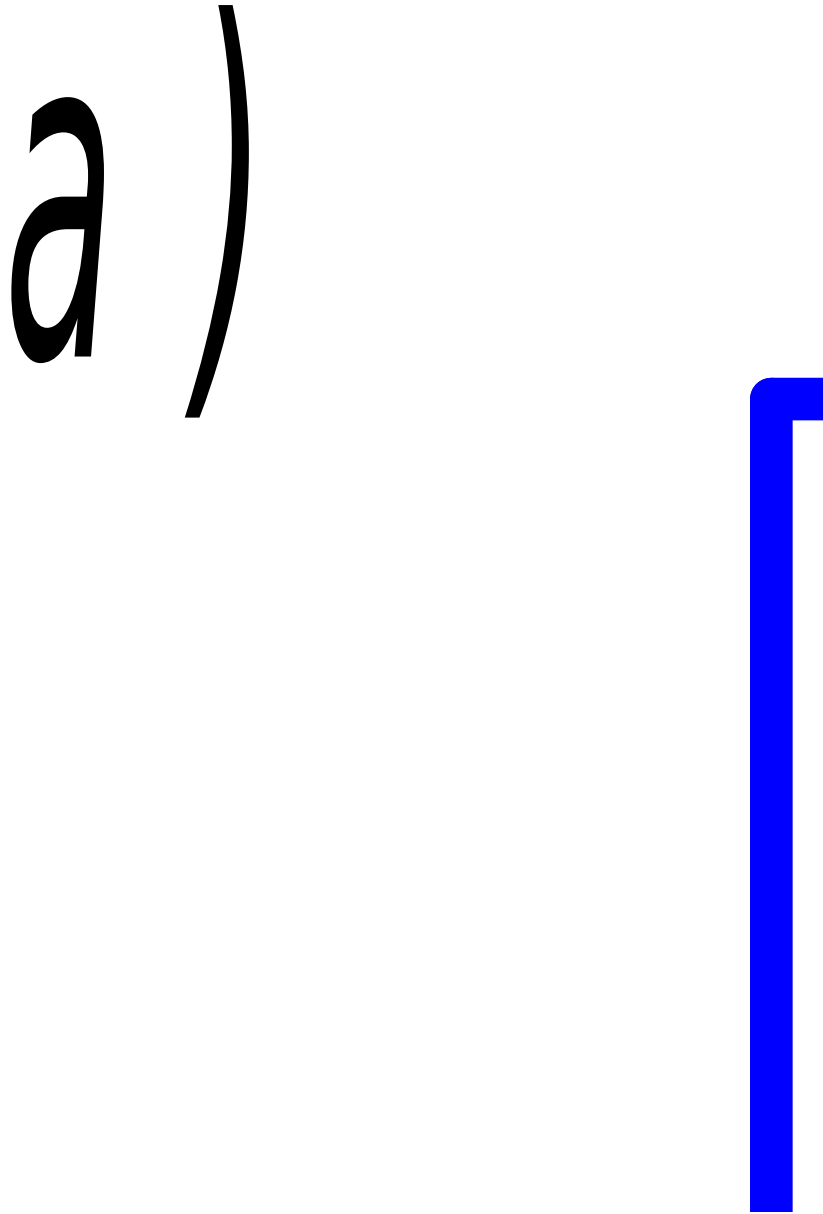


Рис. 25. Схеми завантаження при випробуванні колони перекриття:

*a* – на максимальне вертикальне зусилля; *б* – на найбільший момент у поздовжньому напрямку; *в* – на найбільший момент у поперечному напрямку; *А* – колона, яку випробовують (штрихуванням виділені ділянки, що завантажуються)



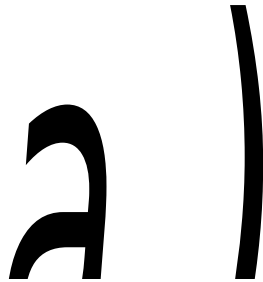


Рис. 26. Завантаження полігональної ферми:  
*a* – навантаження розподілене по всьому прогону; *б* – завантаження напівпрогонів; *в* – розрахункова схема ферми

Для прикладу розглянемо перекриття з розрізним заповненням між балками (рис. 27), у якому потрібно перевірити роботу балки *A*. При розташуванні навантаження інтенсивністю  $q$  на двох плитах прогоном  $l$ , що примикають до цієї балки (рис. 27, *a*), на балку буде передаватися зусилля  $P = q \times l$ . Ефективність використання навантаження в цьому випадку буде дорівнювати 0,5, оскільки половина силового впливу сприймається сусідніми балками.

Якщо розподілене навантаження на плити може бути збільшене, то для одержання того ж тиску на балку *A* можна до прогонів, що примикають (рис. 27, *б*), прикласти більш інтенсивне навантаження  $q$ . Це «еквівалентне» (за дією на балку *A*) завантаження вимагає меншої, ніж у першому випадку, кількості навантаження, оскільки на сусідні балки буде передаватися відповідно менший тиск.

Нарешті, найбільш ефективна еквівалентна схема за рис. 27, *в*, де те ж зусилля  $P = q \times l$  передається повністю (наприклад шляхом підвішування вантажу) безпосередньо балці, що випробовується.

Рис. 27. Завантаження перекриття з розрізними заповненнями між балками:

*a* - навантаження, розподілене по всій ширині плит, що примикають до балки *A*; *б* - еквівалентне розподілене навантаження; *в* - еквівалентне зосереджене навантаження, передане безпосередньо на балку

У всіх випадках переходу до еквівалентних навантажень необхідно попередньо переконатися в тому, що цей перехід не викликає порушення звичайних умов роботи конструкції, що досліджується.

## 2.5. Навантаження

При статичних випробуваннях навантаження повинно прикладатися до об'єкта поступово, без ривків і ударів для того, щоб впливом сил інерції можна було знехтувати.

Навантаження та навантажувальні пристрої повинні задовольняти основні вимоги:

- давати можливість чіткого визначення зусиль, переданих випробовуваному об'єкту;
- бути (по можливості) транспортабельними та не вимагати значної витрати часу для їхнього прикладення і зняття;

- при випробуваннях з тривалою витримкою повинна бути забезпечена *стабільність* навантаження (тобто її сталість у часі).

## **2.5.1. Розподілені навантаження**

### **2.5.1.1. Сипучі матеріали**

Сипучі матеріали (пісок, щебінь та ін.) раніше широко застосовувалися в будівництві як розподілене навантаження для статичних випробувань. У даний час користуватися таким навантаженням не рекомендується, оскільки при цьому не забезпечується виконання розглянутих вище вимог до випробного навантаження, а саме:

- недостатня точність оцінки прикладеного зусилля, оскільки об'ємна вага сипучих матеріалів міняється залежно від важко регульованої щільності засипання; укладання ж із застосуванням мірних ящиків або із засипанням у мішки з їх попереднім зважуванням дуже трудомістка;

- насипна щільність сипучих тіл міняється при їх висиханні та зволоженні;

- прикладання і зняття навантаження вимагає значної витрати часу.

Крім того, при переміщеннях сипучих мас піднімається пил, від якого доводиться захищати вимірювальні прилади.

### **2.5.1.2. Дрібні штучні вантажі**

У теперішній час при відсутності більш досконалих та зручних засобів завантаження часто доводиться застосовувати і дрібні штучні вантажі (цегла, бетонні камені невеликих розмірів і т.п.). Цей вид навантаження має ряд недоліків:

- вага дрібних штучних вантажів визначається звичайно пробним зважуванням (рис. 28) однієї або декількох партій (наприклад сотні цегли). Діючі навантаження визначаються, таким чином, усереднено. Зважування ж усього вантажу при випробуванні практично можливе лише при невеликих завантаженнях;

- вага цегли, бетонних каменів та інших аналогічних матеріалів зростає при насиченні їхніх пор водою. При необхідності витримання навантаження на відкритому повітрі доводиться захищати їх від атмосферних опадів або робити повторне зважування;

- хоча при транспортуванні та укладанні дрібних штучних вантажів можна застосовувати відповідні механізми, весь процес у більшості випадків виявляється все-таки трудомістким і вимагає значної витрати часу.



Рис. 28. Визначення ваги одного вантажу

І в цьому випадку, особливо при застосуванні цегли, також доводиться зважати на дрібний, усюди проникаючий пил, від якого необхідно ретельно захищати прилади.

Істотною перевагою даного виду навантаження є зручність його вкладання на дослідний об'єкт, що особливо важливо при проведенні випробувань у природних умовах.

Варто звертати увагу на укладання цегли та бетонних каменів окремими стовпчиками, що не доторкаються (рис. 29, 30). При недотриманні цього та особливо при кладці в перев'язку, рівномірність передачі навантаження може бути порушена за рахунок утворення самонесучих склепінь.



Рис. 29. Випробування пустотілої плити довжиною 3 м дрібними вантажами



Рис. 30. Випробування попередньо напруженої пустотілої плити довжиною 9 м дрібними вантажами

### 2.5.1.3. Великі штучні вантажі

Великі штучні вантажі (металеві балки та виливки, бетонні та залізобетонні деталі і т.д.) можуть бути точно зважені та замаркіровані. Укладання і зняття їх з об'єкта можуть бути механізовані і не вимагають у цьому випадку надмірних витрат праці та часу. Але для створення розподіленого навантаження вантажі, які мають великі розміри, не завжди зручні, оскільки вага їх передається на досліджуваний об'єкт практично не по всій опорній поверхні, а лише через окремі місця стикання, що важко виявляються. Застосування підкладок фіксує ці місця, але залишається невизначеність відносно розподілу переданого зусилля між окремими підкладками. Крім того, при деформації випробовуваної конструкції схема розподілу тиску через підкладки може мінятися (рис. 31).

Рис. 31. Схема завантаження твердими пакетами та епюра переданих зусиль:

1 – елемент, що випробовують; 2 – те ж елемент у деформованому стані після завантаження; 3 – навантаження твердим пакетом;

4 – підкладки; 5 – огинаюча переданих зусиль;  $P$  – зусилля, передані через підкладки на елемент, що випробовують

Штучні вантажі, які мають великі розміри, використовують для випадків:

- створення розподіленого навантаження на елементах з досить великою власною твердістю, наприклад, на поверхні великих бетонних масивів, де основне значення має звичайно положення лише центра ваги вкладених вантажів;

- одержання погонного розподіленого навантаження, наприклад, укладання таких вантажів поперек проїзної частини мостової конструкції для створення навантаження, розподіленого вздовж прогону;

- як матеріал для одержання зосереджених зусиль.

#### **2.5.1.4. Навантаження водою**

Цей вид завантаження є найбільш досконалим при необхідності прикладення значних за величиною рівномірно розподілених навантажень.

При завантаженні плоских горизонтальних поверхонь на них встановлюються легкі огороження (рис. 32), які сприймають розпір води, що заливається. У ці огороження розміщують та закріплюють водонепроникні оболонки. Під оболонки, безпосередньо на поверхню об'єкта, що випробовують, вкладають звичайно захисні полотнища (наприклад брезент), краї яких також загинаються та кріпляться в огороженні.

Воду заливають за допомогою шлангів від водогінної напірної мережі або подають насосом. Швидкий спуск здійснюється за допомогою сифона (рис. 32) або відкачуванням.

Переваги навантаження водою:

- можливість точно визначати величини завантаження за обмірюваним рівнем води;

- гарантія рівномірного розподілу навантаження;

- сталість завантаження при витримуванні;

- зручність завантаження та розвантаження без застосування фізичної праці;

- плавність завантаження і розвантаження, можливість регулювання їхньої швидкості.

Рис. 32. Завантаження водою:

1 - випробовуване перекриття; 2 - брезент, який підстилають;  
3 - водонепроникна тканина; 4 - огороження; 5 - сифон (кріплення огорожень - підкоси, тяги й т.д. - на кресленні не показане)

Завантаження водою незручне при нерівній, а тим більш при негоризонтальній поверхні випробовуваного об'єкта, оскільки пристрій усякого роду конструкцій, що вирівнюють, значно ускладнює його застосування. При температурах нижче нуля використання води як завантажувального засобу виключене (застосування хімічних добавок для зниження границі замерзання практично себе не виправдовує).

#### **2.5.1.5. Використання тиску повітря**



Випробування плит під тиском повітря, запропоноване Ю.М. Корчемським використовується для статичних випробувань готової продукції на заводах залізобетонних виробів.

Рівномірно розподілене навантаження, що діє на поверхню плити, створюється підвищенням тиску в прилягаючих до деталі повітронепроникних плоских мішках («камерах») із клейонки або тонкої гуми. Камера 2 (рис. 33) в захисному брезентовому чохлі міститься між деталлю 1, яку випробовують, і щитом 3.

Щільність прилягання забезпечується поперечками 4, розміщеними над щитом і закріпленими в нижніх підтримувальних балках 6 тягами 5. Необхідний тиск у камерах створюється за допомогою компресора; можна користуватися також балонами зі стисненим повітрям та ін.

Рис. 33. Випробування плит тиском стисненого повітря:  
1 – деталь, яку випробовують; 2 - надувна гумова камера;  
3 - упорний щит; 4 - поперечки; 5 - тяги; 6 - нижні поздовжні балки; 7 - поперечні опорні балки; 8 - фундамент

### **2.5.2. Зосереджене навантаження**

Для створення зосереджених зусиль застосовуються:

- 1) підвішування вантажів;
- 2) натяжні пристосування;
- 3) домкрати.

Прикладення зосереджених зусиль вимагає в більшості випадків застосування спеціальних *розподільних пристроїв* з метою

збереження поверхні споруди, конструкції або деталі від пошкоджень у місцях прикладення зусиль, передачі навантаження, що прикладається, саме в необхідних місцях, а також імітації (якщо це необхідно) *розподіленого тиску*.

### 2.5.2.1. Розподільні пристрої

Розглянемо кілька прикладів.

На рис. 34 показані деталі обпирання розподільної балки (у цьому випадку покладеного пливком швелера  $1$ ), що передає тиск від навантаження  $P$  на опорні частини А і В.

Рис. 34. Розподільна балка:

$1$  - розподільний швелер;  $2$  - об'єкт, що сприймає навантаження;  $3$  - кутиковий коротиш, приварений до підкладки;  $4$  - сталевий коток;  $5$  - підкладки

На рис. 35 схематично показана імітація розподіленого тиску - передача прикладеної сили в 16 опорних точках.

Зусилля передається через тягу  $2$ , пропущену через отвір у плиті перекриття, що випробовується  $1$ . Система розподільних балок  $3$ , розташованих у кілька ярусів, забезпечує передачу тиску в необхідні місця через підкладки  $4$ .



Рис. 35. Схема розподілу зосередженого зусилля:  
*а* - вертикальний розріз; *б* - план; 1 – плита перекриття, що випробовується; 2 - тяга, що передає навантаження; 3 - балки розподільної клітки; 4 - підкладки, що передають зусилля на перекриття

### 2.5.2.2. Підвішування вантажів

Підвішування вантажів є найпростішим, але й найбільш громіздким способом створення зосереджених навантажень. Перевагою його в порівнянні з іншими розглянутими нижче способами є те, що при підвішуванні вантажів діюче зусилля *не міняється при деформаціях елементів, що випробовуються*.

Для підвішування вантажів до нижніх кінців вертикальних тяг (найчастіше сталевих тросів) кріпляться або горизонтальні площадки, або завантажувальні ящики.

На рис. 36, *а* показана схема підвішування вантажів до вузлів нижнього пояса полігональної ферми, а на рис. 36, *б* - передача

зусиль до вузлів верхнього її пояса за допомогою розподільних балок 4. Застосування останніх зменшує число тяжів у порівнянні з необхідним за варіантом рис. 36, *a*.



Рис. 36. Схема підвішування вантажів:

*a* – до вузлів нижнього пояса; *б* – через розподільні балки;  
*1* – ферма, що випробовується; *2* – підвіски; *3* – вантажні  
площадки; *4* – розподільні балки

Як вантажі можуть бути використані будь-які матеріали, зручні для зважування, укладання та знімання їх. Для полегшення вантажно-розвантажувальних робіт площадки (або завантажувальні ящики) підвішують невисоко над рівнем землі або перекриття. Зазор  $c$  під вантажами (рис. 36, б) призначають при цьому з урахуванням запобігання можливості опускання вантажу на підмурок при деформуванні випробовуваної конструкції.

При необхідності швидкого зняття прикладених зусиль (наприклад в аварійних випадках) у зазори між підмурком та завантажувальними пристроями заганяють заздалегідь заготовлені клини, що приймають на себе тиск вантажів.

Наповнення підвішених ємностей водою має ті ж переваги, що і при застосуванні води для створення розподілених навантажень, а саме: стабільність діючих зусиль, виключення трудомістких процесів і т.д. Але необхідні для цього ємності повинні мати значні розміри, витримувати також і горизонтальну складову гідростатичного тиску, не допускати витоків води. Все це обмежує можливість застосування цього, загалом кажучи, найбільш досконалого виду навантаження.

### **2.5.2.3. Натяжні пристрої**

При заміні підвішених вантажів натяжними пристроями:

- відпадають трудомісткі роботи зі зважування та переміщення вантажів;
- напрямок діючих зусиль може бути не тільки вертикальним, але й горизонтальним і похилим;
- зусилля, що прикладаються, легко регулюються;
- необхідні пристрої компактні і робота з ними навіть у найбільш стиснутих умовах не викликає труднощів.

Натяжні пристрої не забезпечують, однак, строгої сталості (у часі) прикладених зусиль. При тривалій витримці навантаження розвиток пластичних деформацій як у випробовуваному об'єкті, так і в самих натяжних пристроях (головним чином, у їхніх з'єднаннях) супроводжується деяким падінням створеного натягу, що вимагає

періодичних підтяжок. На діючі зусилля впливають також і коливання температури, що обумовлюють невеликі зміни довжини передавальних зусиль тяг.

Для визначення та контролю значень прикладених сил у «ланцюг» натяжного пристрою повинен бути включений *динамометр* або заміняючий його динамометричний елемент (наприклад стержень із наклеєними на ньому тензорезисторами).

Для передачі зусиль використовуються звичайні троси, що натягаються талями з поліспастиами, лебідками або домкратами. На рис. 37 показано кілька прикладів завантажувальних схем.

На рис. 37, *а* вертикальне завантаження перекриття 1 здійснюється за допомогою самогальмуючого ручного таля 3. Для кріплення нижнього кінця натяжного пристрою застосований вільно покладений на підлогу піддон 5 з вантажами, що свідомо перевищують величину зусилля, яке прикладається до перекриття.

На рис. 37, *б* показане завантаження рамної конструкції за допомогою лебідки, що створює натяг у канаті, перекинутому через блок 6.

На рис. 37, *в* показане прикладення горизонтальних зусиль (декількох десятків тонн) до конструкції металевої щогли. Зусилля передаються через систему блоків, поліспастів і розподільних пристроїв.

Тертя в блоках, що входять у такелажну схему, створює різниця зусиль у гілках тягового троса. Включення силовимірювального приладу повинне виконуватися в гілці, що безпосередньо передає навантаження на випробовуваний об'єкт (наприклад, у вертикальну, а не в горизонтальну гілку троса на рис. 37, *б*).

При необхідності створення порівняно невеликих зусиль (близько 1 т і менш) можна застосовувати сталеві стержні, що натягаються стяжними муфтами (з правим і лівим різьбленням по кінцях муфти). На рис. 38 показано подібний пристрій, використаний для створення зусиль у горизонтальному затигуванні дослідного склепіння. Вимірювання діючої сили виконується за допомогою тензометрів, установлених на затигуванні.

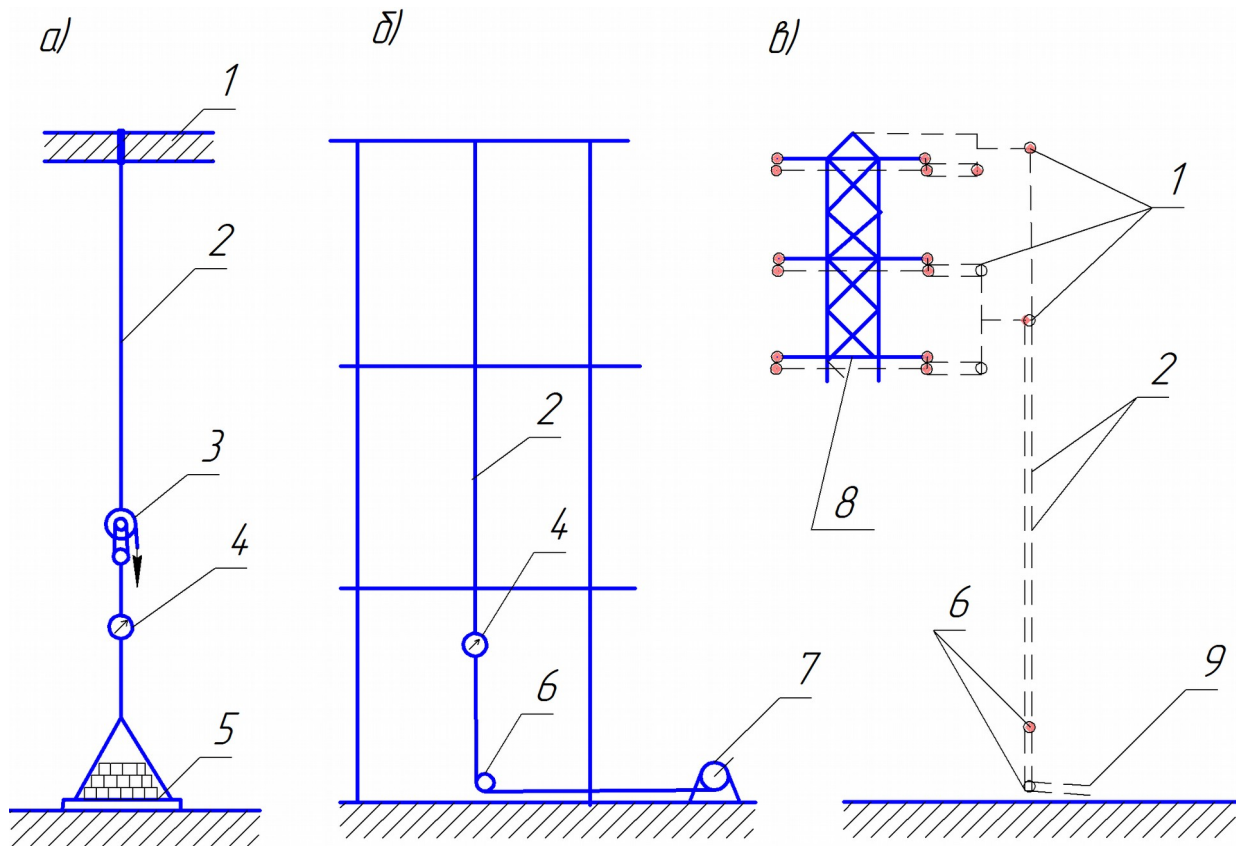


Рис. 37. Прикладення зосереджених зусиль за допомогою талів, лебідок і поліспаствів:

*а* - натяжний пристрій з ручним талем; *б* - з лебідкою; *в* - з поліспастами: 1 - випробовуване перекриття; 2 - троси; 3 - таль; 4 - динамометр; 5 - піддон з вантажами; 6 - блоки; 7 - лебідка; 8 - металева щогла лінії електропередачі; 9 – поліспаств

Рис. 38. Передача зусилля на склепіння тягою зі стяжною муфтою: 1 - склепіння; 2 - упори; 3 - тяга; 4 - стяжна муфта

#### 2.5.2.4. Домкрати

Найбільш зручним засобом для прикладення до досліджуваних об'єктів значних зусиль є домкрати.

Їхні переваги: малогабаритність (у порівнянні з іншими видами навантажувальних пристроїв); легкість створення та регулювання навантаження; можливість прикладення навантаження в будь-яких необхідних напрямках.

За способом створення навантаження застосовувані при випробуваннях домкрати діляться на гідравлічні та гвинтові домкрати з ручним прикладенням зусилля і з електроприводом.

**Гідравлічні домкрати.** Звичайні (вантажопідйомні) домкрати на 100 і 200 т з ручним насосом, вмонтованим у хвостовик корпусу домкрата, при випробуваннях застосовуються рідко, лише при відсутності інших типів, що більше підходять. Ці домкрати масивні, для їх установаження та обслуговування потрібно кілька людей.

Зручніші та ефективніші домкрати з винесеною (спільною для групи домкратів) насосною установкою - ручною або, що краще, електрифікованою. Крім зменшення необхідного числа персоналу та полегшення роботи, централізована насосна установка забезпечує однаковість тиску у всіх домкратах, що обслуговуються, що важливо з погляду чіткості режиму випробування (сталість завантажувальної схеми) і дозволяє вмикати пристрої для запобігання від несподіваних спадів тиску в результаті місцевих витоків. Якщо буде потреба з пульта керування можна також регулювати та підтримувати необхідний тиск у кожному з установлених домкратів окремо.

При централізованій подачі тиску використовують нижченаведені пристрої.

Силові циліндри (циліндрична пара, рис. 39, *а*) і телескопічні домкрати (рис. 39, *б*) різної вантажопідйомності - від 5 до 200 т.

Телескопічні домкрати (рис.39, *б*) мають декілька подовжених поршнів, що входять один в один (плунжерів), що збільшують їх загальний (сумарний) хід. Домкрати такого типу придатні для застосування при значному деформуванні конструкцій, що випробовуються, випускаються різної вантажопідйомності,



наприклад, 120 т при загальному ході плунжерів в 500 мм, 40 т при ході близько 700 мм і т.д.

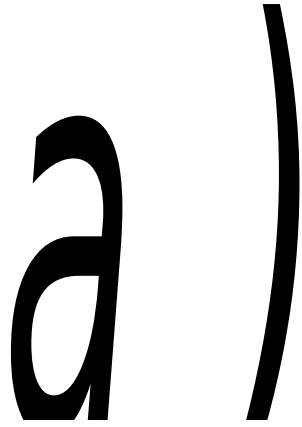


Рис. 39. Силістри циліндри:

1 – циліндр; 2 – поршень; 3 – плунжери телескопічного домкрата;  
4 – порожнини подачі масла

При статичних випробуваннях можна застосовувати також домкрати, призначені для натягу арматур в попередньо напружених залізобетонних конструкціях, що випускаються з різним тяговим зусиллям і різним ходом поршнів (наприклад до 1200 мм).

При використанні гідравлічних домкратів істотним є можливість безперервного спостереження за збудженим зусиллям за показниками манометрів у домкратів.

У відповідальних випадках для контролю величини діючих зусиль варто користуватися спеціальними силівимірювачами, що включаються між поршнем домкрата та елементом, що випробовується.

**Гвинтові домкрати** застосовуються при випробуваннях значно рідше гідравлічних. Ручні гвинтові домкрати зручні лише при малих навантаженнях (приблизно до 1 т). Для створення зусиль до десятків тонн застосовуються домкрати з електричним приводом.

### 2.5.3. Рухоме навантаження

При випробуванні споруд і конструкцій, призначених для пропуску вантажів, що переміщуються (підкранові конструкції, автодорожні та залізничні мости і т.д.), завантаження повинне виконуватися з максимальним наближенням до експлуатаційних умов.

Необхідне навантаження – крани, автомобілі, трактори, дорожні котки, поїзди і т.д. – поступово (для виключення динамічного ефекту) переміщуються по прогону та встановлюються в необхідному, заздалегідь заданому положенні, як показано на рис. 40 - 49.



Рис. 40. Випробування автомобільного мосту автомобілем УАЗ загальною масою 3 т



Рис. 41. Випробування автомобільного мосту автомобілем Белаз-75485 загальною масою 65 т



Рис. 42. Випробування шляхопроводу автомобілем Белаз-540 загальною масою 25,5 т



Рис. 43. Випробування Лопанського мосту в Харкові автомобілями МАЗ 555102-223, середня вага автомобілів 19,1 тс



Рис. 44. Випробування Лопанського мосту в Харкові автомобілями МАЗ 555102-223, середня вага автомобілів 19,1 тс



Рис. 45. Випробування шляхопроводу в Лозовій під навантаження Н-30



Рис. 46. Випробування шляхопроводу в Лозовій під навантаження Н-30



Рис. 47. Випробування металеві прогонової будови з наскрізними фермами з їздою зверху тепловозом ТЭМ2-119



Рис. 48. Випробування металеві прогонової будови з наскрізними фермами з їздою низом тепловозом ТЭМ2-119



Рис. 49. Випробування металевої балкової прогонової будови з їздою зверху тепловозом ТГМ4-2425

Менш точним є прийняття тиску на колесо або скат за паспортним даними з безпосереднім зважуванням лише додаткових вантажів (наприклад, що укладаються в кузов автомобіля). Точніше перевірити все навантаження, що прикладається, на стаціонарних експлуатаційних вагах (автомобільних, вагонних, тепловозних) або визначати тиск від кожного колеса окремо.

## **2.6. Режими випробування**

При виборі режиму випробування встановлюють:

- необхідну інтенсивність навантаження;
- ступені додавання та зняття навантаження;
- тривалість їх витримування на об'єкті, що випробовується.

### **2.6.1. Призначення величини випробувального навантаження**

Якщо споруда або конструкція *після випробування повинні бути передані в експлуатацію*, то випробування не повинне

погіршувати їхнього стану. Це означає, що в процесі прикладення та витримування навантаження в об'єкті не повинні розвиватися залишкові деформації і тим більше, порушення суцільності, які у звичайних умовах експлуатації не могли б з'явитися. Максимальне *випробне навантаження* тому не повинне виходити за встановлену межу. Звичайно за цю межу приймається розрахункове навантаження в найбільш не вигідному його положенні, за винятком тих випадків, коли прикладення випробного навантаження, що перевищує розрахункове, передбачено відповідними технічними умовами.

При випробуваннях *дослідних об'єктів*, передача яких в експлуатацію не передбачається, зазначені вище обмеження зникають, максимум навантаження призначається залежно від поставленого завдання.

Якщо метою випробування є визначення несучої здатності або дослідження умов появи місцевих пошкоджень (тріщин, сколів і т.п.), то значення максимального навантаження уточнюються безпосередньо в процесі експерименту відповідно до його результатів. Однак до початку випробування цей максимум повинен бути оцінений орієнтовно для підрахунку необхідного навантаження. Останнє повинне братися «з запасом» щоб уникнути затримок у ході випробування у випадку його недостатності.

*Випробування залізобетонних виробів серійного виготовлення* та відбір контрольних зразків проводяться відповідно до вказівок стандартів:

при перевірці на міцність – контрольне навантаження приймається рівним *розрахунковому*, помноженому на коефіцієнт  $C$ , числові значення якого беруться від 1,4 до 2,0 залежно від типу конструкції, виду застосованого бетону та характеру очікуваного руйнування;

при перевірці на твердість - контрольне навантаження приймається рівним *нормативному* в найбільш не вигідному його положенні;

при перевірці на тріщиностійкість - для виробів першої категорії тріщиностійкості навантаження береться рівним 1,05 від розрахункового і для другої категорії - 1,05 від нормативного.



## 2.6.2. Послідовність прикладення та зняття навантаження

**Ступені навантаження.** При їхньому призначенні виходять з таких міркувань: з одного боку, чим менший кожний ступінь, тим частіше в процесі навантаження можуть бути взяті відліки по приладах; Графіки досліджуваних характеристик будуються більш чітко (по більшому числу точок), це особливо важливо при наявності нелінійної залежності між навантаженням і досліджуваною характеристикою, з другого - зі зменшенням ступенів навантаження зростає їхня загальна кількість, що робить процес випробування більш тривалим і трудомістким.

У кожному конкретному випадку доводиться знаходити оптимальне рішення з огляду на ці положення.

Так, наприклад, для контрольних випробувань зразків залізобетонних виробів серійного виготовлення в стандартах даються такі вказівки:

- при перевірці *міцності* ступені («частки») навантаження не повинні перевищувати 10% від їх контрольного (тобто максимального) значення;

- при перевірці *твердості* ступені повинні бути не більше 20% контрольного навантаження;

- при перевірці *тріщиностійкості* після прикладення навантаження, рівного 90% від відповідного контрольного, кожна наступна частка завантаження, аж до моменту появи тріщин, повинна становити не більше 5% контрольного.

Для полегшення обробки результатів випробування послідовні ступені навантаження повинні бути по можливості однаковими.

Початковий ступінь навантаження варто брати невеликим (близько 5, але не більше 10% від очікуваного максимального навантаження), оскільки на початку прикладення зусиль частина їх іде на зминання прокладок в опорах під навантажувальними пристосуваннями, обтягування тяг і т.д. Для зменшення цих втрат удаються до повторних прикладень і знімань початкового ступеня навантаження. Такі повторні навантаження корисні також і для перевірки повернення «на нуль» показань встановлених приладів.

При використанні рухомого навантаження з цією ж метою робляться пробні обкатування.

**Розвантаження.** Ступені розвантаження корисно брати такими ж, як і ступені навантаження. Цим істотно полегшується порівняння «прямих» і «зворотних» ходів показань приладів.

Але для прискорення процесу випробування нерідко доводиться вдаватися до скорочення числа ступенів розвантаження. Їх варто тоді брати кратними ступеням навантаження, для того щоб збіг відповідних точок прямого і зворотного ходів все-таки збереглися.

При повторних (циклічних) завантаженнях навантаження після кожного циклу повинно зніматися не повністю, а доводити до рівня першого (початкового) ступеня. Цим забезпечується необхідна чіткість випробування, оскільки всі навантажувальні пристрої залишаються увімкненими. При повному ж розвантаженні не виключена можливість невеликих перекосів і зсувів навантажувальних пристроїв, що утрудняє порівняння одержуваних результатів.

### **2.6.3. Витримування навантаження**

Для з'ясування закономірності збільшення переміщень і деформацій після прикладення навантаження звичайно буває достатня витримка:

- для металевих конструкцій - від 15 до 30 хв;
- для залізобетонних конструкцій - близько 12 год;
- для дерев'яних конструкцій - від 24 год до декількох діб.

Якщо переміщення та деформації при постійному навантаженні в зазначений вище термін не загасають, то час витримування навантаження подовжується. Якщо зменшення наростання переміщень та деформацій не закінчується, то об'єкт, що випробовується, є непридатним для експлуатації в заданих умовах. При вибіркових випробуваннях зразків залізобетонних виробів серійного виготовлення стандарт передбачає обов'язкову витримку:

- при контрольних завантаженнях на твердість і тріщиностійкість - не менше 30 хв;
- після кожного проміжного ступеня навантаження - не менше 10 хв.

## 2.7. Вимірювальні прилади та їхнє застосування

### 2.7.1. Загальні дані

При статичних випробуваннях визначають:

- *основні показники, що характеризують роботу об'єкта, що досліджується, під навантаженням, а саме: переміщення та деформації, зусилля і напруги в елементах досліджуваних конструкцій;*
- *значення допоміжних факторів, що мають вплив на результати випробувань.*

При випробуваннях застосовують прилади як з безпосереднім відліком значень вимірюваної величини, так і вимірювальні перетворювачі, що дозволяють здійснювати вимірювання дистанційно, що істотно розширює можливості експерименту. Перетворювачі дозволяють автоматизувати процес вимірювання реєстрації значень контрольованих величин і виконувати вимірювання в місцях, не доступних для приладів з безпосереднім відліком.

Випускаються вимірювальні пристрої для таких основних вимірювань:

- **лінійних переміщень** - прогиноміри, зсувоміри, індикатори та перетворювачі лінійних переміщень;
- **кутових переміщень** - клінометри, відвіси і т.д. та перетворювачі кутових переміщень;
- **лінійних деформацій** - тензометри та перетворювачі лінійних деформацій;
- **зусиль** - динамометри та перетворювачі сил;
- **напруг** - перетворювачі напруг бетону, ґрунту і т.д.;
- **щільності** – щільностеміри та перетворювачі щільності;

- температури і вологості – термометри, вологоміри, перетворювачі температури та вологості.

При значній кількості встановлених приладів і необхідності проведення кількарізних вимірювань по них, найбільш доцільним є централізоване зняття відліків за допомогою відповідних реєструвальних пристроїв, у тому числі і з автоматичною реєстрацією показань (з видачею результатів цифродрукуювальними апаратами, а також у вигляді перфострічок, магнітних записів і з безпосереднім введенням отриманих даних в ПЕОМ).

Однак у цілому ряді випадків - при невеликій кількості точок вимірювань, нескладних випробуваннях або при відсутності вимірювальних пристроїв, пристосованих для централізованих вимірювань, доводиться користуватися приладами, що вимагають зняття показань безпосередньо на місці.

## **2.7.2. Прилади для визначення лінійних переміщень**

### **2.7.2.1. Діапазон і необхідна точність вимірювань**

При випробуваннях дерев'яних конструкцій, особливо великими прогонами, доводиться вимірювати переміщення близько десятків сантиметрів; переміщення точок металевих конструкцій коливаються залежно від розмірів випробовуваного об'єкта - від декількох міліметрів до їх десятків; найбільш твердими є залізобетонні конструкції, де переміщення вимірюються нерідко частками міліметра.

Підвищені вимоги ставляться при спостереженнях за характером загасання переміщень у часі при підйманні навантаження. У більшості випадків при цьому вимірювання виявляються необхідними з точністю: близько міліметра для дерев'яних конструкцій; десятих і сотих міліметра - для металевих і, нарешті, сотих і навіть тисячних міліметра (тобто близько мікронів) – для залізобетонних.

Для задоволення цих вимог і забезпечення стабільності показань необхідні прилади з високими метрологічними характеристиками.

Для визначення переміщень застосовують звичайно *прогиноміри* або *індикатори* (маються на увазі *індикатори переміщень*).

### 2.7.2.2. Прогиноміри з дротяним зв'язком

Прилади даного типу застосовуються для вимірювання переміщень від 0,1 до 10 см і більше.

Схема одного з найпоширеніших прогиномірів (Н.Н. Максимова) наведена на рис. 50, 51. Нерухана вісь 1 приладу за допомогою струбцини, на схемі не показаної, прикріплюється або до випробовуваного об'єкта, або до нерухокої точки. Навколо шківів 2 прогиноміра, що обертається на осі 1, перекидається гнучкий сполучний дріт 3, що натягається гирею 4. При зміні відстані між об'єктом, що випробовується і нерухоною точкою, шківів 2 приводиться в рух його дротом 3, що охоплює. За допомогою системи передач цей поворот приводить до зсуву стрілки 5. Відлік береться по круговій шкалі на диску 7, нерухомо з'єднаному з віссю 1. Обертаючи цю вісь (при установленні прогиноміра), можна орієнтувати диск зі шкалою в будь-якому положенні – вертикальному, як показано на рис. 50, горизонтальному або похилому, обираючи найбільш зручне для знімання відліків.

a)

Рис. 50. Схема прогиноміра Н.Н. Максимова:

*a* - вид з боку циферблата; *б* - вид збоку; *в* - обхват втулки дротом; *1* - нерухома вісь; *2* - шків; *3* - натягнутий дріт; *4* - гиря; *5* - стрілка; *6* - кругова шкала; *7* - диск; *8* - видна в прорізі диска *7* шкала барабанчика для підрахунку числа повних обертів стрілки *5*

Ціна поділки шкали - 0,01 мм або (в інших варіантах виконання) 0,1 мм.

Хід приладу не обмежений і лімітується лише можливістю безперешкодного підйому або опускання вантажу, що натягує дріт. Повне число обертів стрілки відлічується по шкалі барабанчика *8*, видного в прорізі диска *7*.



Рис. 51. Фото прогиноміра Н.Н. Максимова

**Схеми встановлення.** При вимірюваннях вертикальних переміщень можливі такі основні варіанти.

При наявності доступної нерухокої точки - схема рис. 51, 52, *a* (прилад унизу) і рис. 52, *б*, 53 (прилад нагорі). Для врахування впливу осідань опор потрібно встановити додаткові прогиноміри в опорних перерізах.

При випробуваннях конструкцій, розташованих над водою, при не занадто швидкому її плинні, на дно може бути опущений важкий вантаж (рис. 52, *в*), до якого попередньо прикріплюється нижній кінець сполучного дроту.

*а*)

Рис. 52. Встановлення прогиномірів з дротяним зв'язком:  
*а* - прогиноміри внизу, верх дротів закріплений на прогоновій будові; *б* - прогиноміри на прогоновій будові, низ дроту закріплений у ґрунті; *в* - прикріплення низу дроту до важкого вантажу, опущеного на дно ріки; *1* - прогонова будова; *2* – опо-

ри; 3 - прогиноміри; 4 - сполучні дроти; 5 - палі або стовпи, закріплені в ґрунті; 6 - вантаж, опущений на дно ріки

При неприступності або великій відстані до нерухомих точок (а також для виключення впливу осідання опор) застосовують системи шпренгелів. На рис. 54,а підвішеному дротовому шпренгелі відтягається вниз вертикальним дротом з пружиною, що забезпечує практичну сталість натягу шпренгеля тим самим необхідну нерухомість точки кріплення дроту прогиноміра. На рис. 54,б показаний шпренгель, що відтягується зваженим вантажем. Нарешті, на рис. 54,в сталість натягу шпренгеля забезпечується пружинами, що з'єднують його вершину з поясами випробовуваної ферми (і в цьому випадку невеликі переміщення точок кріплення пружин до поясів практично не впливають на зусилля, передані від пружин розкосам шпренгеля).



Рис. 53. Встановлення прогиномірів із дротовим зв'язком за схемами рис. 52, б, в

Приклад встановлення прогиномірів для вимірювання горизонтальних переміщень наведений на рис. 55.



На результати вимірювань значний вплив чинить зміна довжини дроту, залежно від температури повітря та нагрівання його променями сонця (сталевий дріт довжиною 1 м при підвищенні температури всього на 10°C подовжується більш ніж на 1 мм), що повинно ретельно враховуватися при обробці результатів випробувань.



Рис. 54. Встановлення прогиномірів з дротяним зв'язком з кріпленням дроту до шпренгеля:  
*a* - натягування шпренгеля пружиною; *б* - шпренгель з вантажем; *в* - підтягування шпренгеля пружиною до верхнього пояса; *1* - прогонова будова; *2* - опори; *3* - прогиномір; *4* – сполучний дріт; *5* - шпренгель з товстого дроту або троса; *б* – пружина, яка натягує шпренгель *5*; *7* – підвішений вантаж

Рис. 55. Встановлення прогиномірів з дротяним зв'язком для вимірювання горизонтальних переміщень:

1 - вертикальна стінка резервуара; 2 - нерухомо забитий металевий стовп; 3 - винос для кріплення прогиноміра; 4 – прогиномір; 5 - сполучний дріт; 6 – вантаж, який натягує дріт; 7 – приварений до стінки резервуара стержень для кріплення дроту

### 2.7.2.3. Індикатори

Індикатори являють собою стрілочні контактні прилади, тобто діючі при упорі штифта.

У найпоширеніших індикаторах масового виготовлення ціна поділки шкали 0,01 мм, з діапазоном показань (ходом штифта) до 10 мм. Індикатори спеціального виготовлення випускаються з ходом штифта в кілька десятків міліметрів. Для особливо точних вимірювань застосовуються *мікроіндикатори* з ціною поділки шкали 1 (або 2) мк.

Кінематична схема індикатора показана на рис. 56.

На рис. 57-59 показані схеми вимірювання прогинів балкової конструкції за допомогою декількох індикаторів. Осідання опор виключаються за показами крайніх приладів.

a )

Рис. 56. Штифтовий індикатор переміщень:  
*a* - кінематична схема; *б* - індикатор (вид з боку циферблата); *1* - упорний штифт; *2* - зубчаста кремальєра, нарізана на штифту; *3* - передатні шестірни; *4* - стрілка; *5* - шкала; *6* – пружина для ліквідації зазорів між зубцями шестірень; *7* – шестірня, що натягається пружиною

Рис. 57. Вимірювання прогинів балкової конструкції штифтовими індикаторами:

*a* - розташування індикаторів; *б* - графік пружної лінії деформованої конструкції; *1* - конструкція, що випробовується; *2* - твердий ригель для кріплення індикаторів; *3* - індикатори в прогоні; *4* - індикатори над опорами; *5* - наближений обрис пружної лінії; *6* - осідання лівої опори; *7* - осідання правої опори



Рис. 58. Визначення прогину плити безбаластного мостового полотна за допомогою індикатора



Рис. 59. Визначення прогину залізобетонної балки за допомогою індикатора

При більших відстанях між індикаторами та місцями упору між ними поміщають тверді сполучні елементи, наприклад легкі штанги (рис. 60).

Наявність подібного роду проміжних елементів пов'язана, однак, з можливістю додаткових похибок вимірювань у результаті, хоча і малих, але важко переборних поступових зсувів та змінань у з'єднаннях, жолоблення дерев'яних рейок, змін довжини сполучних металевих елементів при змінах температури і т.п. Позначаються також коливання штанг і рейок при поривах вітру, що при випробуваннях на відкритому повітрі робить більш доцільним застосування дротового зв'язку з індикатором. Один з можливих варіантів такого з'єднання показаний на рис. 61.

Рис. 60. Кріплення індикатора до твердої рейки:  
*1* – елемент, що випробовується; *2* – дерев'яна рейка; *3* – кріпильний пристрій з дерев'яних рейок; *4* – розпірка; *5* – індикатор; *6* – підкладка (упор для штифта індикатора); *7* – дротові розпірки, що перешкоджають коливанням рейки під дією вітру

Рис. 61. Встановлення індикатора із застосуванням дротового зв'язку:  
*1* – поперечний переріз конструкції, що випробовується; *2* – індикатор, встановлений під конструкцією; *3* – сполучний дріт, натягнутий пружиною; *4* – пружина; *5* – закладення в нерухомій точці; *6* – подовжувач штифта індикатора, прикріплений до дроту

#### 2.7.2.4. Електро механічні вимірники переміщень

Для перетворення вимірюваних переміщень в електричні сигнали, які сприймаються на відстані реєструвальними пристроями, запропонована велика кількість рішень, заснованих на зміні електричного опору, ємності, індуктивності і т.д. в перетворювальному елементі вимірювального приладу. У процесі вимірювань зв'язок між нерухомими точками та точками, що переміщуються, спостережуваної конструкції може здійснюватися як гнучким натягнутим дротом, так і за допомогою твердих передач.

На рис. 62 переміщення  $\Delta$  між двома вертикальними поверхнями за допомогою твердого штифта 1 передається на гнучкий пружний елемент з наклеєними на ньому тензорезисторами 2. На рис. 62, а гнучкий елемент 3 являє собою рамочку, а на рис. 62, б консольну балку 4, закріплену в кронштейні 5. У такий спосіб можна вимірювати переміщення до 50 мм із відліком по шкалі реєстру вального пристрою із ціною поділки 0,01 мм. Можливі й інші рішення, засновані на тому ж принципі.

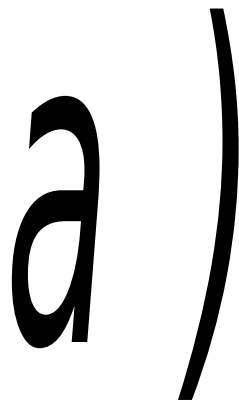


Рис. 62. Електро механічні вимірники переміщень

### 2.7.2.5. Геодезичні методи

Під геодезичними методами розуміють звичайно сукупність прийомів для вимірювання переміщень у досліджуваних конструкціях за допомогою геодезичних інструментів – нівелірів та теодолітів.

**Вимірювання вертикальних переміщень.** Нівелювання під час випробування може виконуватися за марки і репери, установлені для тривалих спостережень за спорудами. Якщо постійних марок на спорудах немає, то користуються, наприклад, знімними підвісними рейкам з міліметровою шкалою (рис. 63).

**Вимірювання горизонтальних переміщень.** Теодоліт центрують над нерухомою точкою, обраною на відстані 25-40 м від споруди в залежності від її висоти. На спостережуваних точках споруди прикріплюють тимчасові марки (з щільного паперу, вузьких смуг лейкопластиру і т.п.).

При визначенні переміщень спостережуваних точок використовують:

- спосіб вимірювання кутів при повторних наведеннях теодоліта на спостережувану марку та марку, закріплену в нерухомій точці. Знаючи відстані між центром стоянки теодоліта та марками, за зміною заміряних горизонтальних кутів знаходять лінійні переміщення точок, за якими спостерігають;



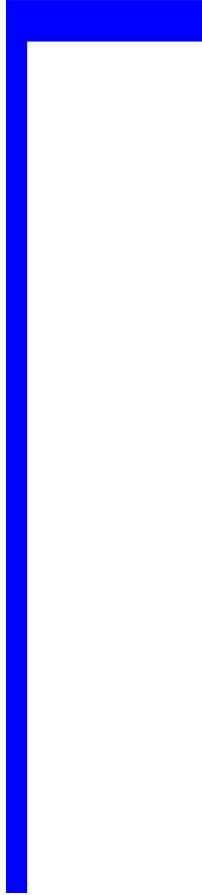


Рис. 63. Підвісна рейка:  
1 – рейка; 2 – інварні смужки зі шкалою; 3 – нівелірна марка; 4 – виріз у рейці для підвіски на марку 3

- спосіб «бічного нівелювання». При кожному відліку трубу теодоліта наводять спочатку на спостережувану марку, а потім поворотом у вертикальній площині - на горизонтальну рейку з міліметровими поділками, закріплену так, щоб вона свідомо залишалася нерухомою під час випробування. Різниці послідовних відліків по рейці дають лінійні переміщення точок, за якими спостерігають.

В усіх випадках недоступними для спостережень залишаються частини споруди поза зоною прямої їхньої видимості, що є серйозним обмеженням застосування геодезичних методів.

### **2.7.3. Вимірювання деформацій**

При дослідженнях конструкцій і деталей у різних галузях техніки (машинобудуванні, авіаційній промисловості і т.д.) широко

застосовується тензометрування з використанням тензометрів і перетворювачів деформації різного принципу дії.

У даний час для вимірювання деформацій при випробуваннях споруд, будівельних конструкцій і деталей найбільш широко використовуються тензорезистори.

### 2.7.3.1. Тензорезистори

Тензорезистори призначені для *дистанційних* вимірювань деформацій. Принцип дії тензорезисторів заснований на зміні омичного опору  $R$  провідників і напівпровідників при деформації.

Основною характеристикою тензорезистора є його *коефіцієнт тензочутливості*, відношення відносної зміни електричного опору  $\Delta R/R$  тензорезистора до деформації, що викликає цю зміну,  $\varepsilon = \Delta l/l$  досліджуваного матеріалу, де  $l$  – довжина (база) провідника.

Для виготовлення тензорезисторів використовуються звичайно сплави міді та нікелю (константан, елінвар та ін.), що характеризуються високим коефіцієнтом тензочутливості  $K$ , сталістю значень  $K$  у необхідному діапазоні деформацій, більшим питомим омичним опором  $\rho = R/F \times l$  (де  $F$  - поперечний переріз провідника, тому що може бути взятий досить малим) і практичною сталістю значень  $\rho$  при коливаннях температури, можливих в умовах користування тензорезисторами при випробуваннях будівельних конструкцій.

Варто підкреслити, що за допомогою тензорезисторів виміряється *відносне* подовження  $\varepsilon$ , а не зміни  $\Delta l$  довжини бази (як у тензометрів).

Однак довжина бази має істотне значення і для тензорезисторів, оскільки при дослідженнях матеріалів з неоднорідною структурою для одержання усереднених значень деформацій у розглянутій зоні довжина бази повинна в кілька разів перевершувати розміри найбільших складових матеріалу; при дослідженні ж деформацій у зонах концентрації напруг довжину бази треба, навпаки, брати по можливості найменшу.

При випробуваннях будівельних конструкцій використовують дротові, фольгові та напівпровідникові тензорезистори.

**Петлеві дротові тензорезистори** (рис. 64, а) з тонкого дроту (діаметром  $12 \div 30$  мкм), приклеєного до паперової або плівкової підкладки, були ще порівняно недавно основним типом приладу, що застосовувався при випробуванні споруд. Ці тензорезистори (з базою звичайно від 5 до 100 мм) зручні в роботі та нескладні у виготовленні. Однак їм властива в більшості випадків *поперечна* чутливість, обумовлена наявністю закруглень, що з'єднують прямі ділянки тензорешітки і сприймають деформації, спрямовані перпендикулярно до поздовжньої осі тензорезистора; наявність поперечної чутливості тензорезистора знижує його *осьову* тензочутливість.

Від цього недоліку вільні безпетлеві тензорезистори (рис. 64, б) з низькоомними мідними перемичками. Через відсутність поперечної тензочутливості та кращі умови передачі деформацій (через продовження прямолінійних ділянок тензорешітки і за перемички) база їх може бути зменшена до 2-3 мм.

У даний час все більше поширення одержують **фольгові тензорезистори** (рис. 64, в) з металевої фольги товщиною не більше 4 - 6 мк. Цим тензорезисторам при виготовленні фотолітографським способом можуть бути надані будь-які обриси, необхідні для умов експерименту. Унаслідок низької поперечної чутливості та плоского перерізу елементів тензорешітки вони мають при тій же площі перерізу більш розвинену поверхню приклеювання, що поліпшує умови їхньої роботи.

Напівпровідникові тензорезистори (рис. 64, г) у порівнянні з розглянутими вище типами мають значно більшу тензочутливість, однак мінливою при деформації та при змінах температури. Незважаючи на це, вони ефективно застосовуються в пружних елементах різних вимірювальних приладів (наприклад динамометрів), де велике значення має їхня висока чутливість, а відзначені недоліки можуть бути компенсовані.

a)

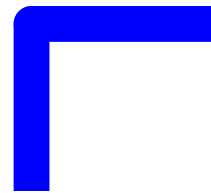


Рис. 64. Тензорезистори:

*a* – петлевий дротовий; *б* – дротовий безпетлевий; *в* – фольговий; *г* – напівпровідниковий; *1* – тензочутливі елементи; *2* – низькоомні перемички; *3* – вивідні контакти; *4* – підкладка («основа») і наклеєний над тензорешіткою захисний шар тонкого паперу; *l* – база тензорезистора

Тензорезистори, застосовувані при випробуваннях споруд, повинні давати можливість вимірювання деформацій до  $10^{-5}$  у діапазоні: при дослідженні пружної стадії роботи матеріалу – до  $(5 \div 7) 10^{-3}$  і пружню-пластичної – до  $10^{-1}$  і більше. Необхідною

умовою є також стабільність показань тензорезисторів, їхня вологостійкість і т.п.

Вплив температурних похибок, обумовлених температурним коефіцієнтом зміни опору тензониток  $\beta$  та різницею температурного коефіцієнта розширення матеріалу тензорезистора  $\alpha_T$  і досліджуваного матеріалу  $\alpha_M$ , виключають установами компенсаційних тензорезисторів.

У випадках, коли встановлення компенсаційних тензорезисторів неможливе або вони не можуть бути поміщені в ті ж температурні умови, використовують так звані *самокомпенсовані* тензорезистори, матеріал яких повинен задовольняти умову  $\beta = (\alpha_M - \alpha_T)K$ , де  $K$  – коефіцієнт тензочутливості тензорезистора.

### 2.7.3.2. Механічні тензометри

Механічні тензометри представлені рядом типів різного конструктивного оформлення. Зупинимося трохи докладніше на одному найпоширенішому важільному тензометрі (Гугенбергера), схематично показаному на рис. 65, 66. Як видно з рис. 65, при деформації досліджуваного матеріалу кінець  $c$  стрілки  $\delta$  тензометра переміщається вздовж шкали  $l_0$  з міліметровими поділками в нове положення  $c'$  (на схемі взятий випадок стискання).

Збільшення  $k$  приладу можна визначити при цьому зі співвідношення

$$k = \frac{c \times c'}{\Delta} = \frac{b \cdot s}{a \cdot r} \quad (1)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $s$ ,  $r$  – плечі важелів;

$\Delta$  – зміна відстані між точками обпирання 2 і 4.

Найчастіше тензометри даного типу випускаються з тисячократним збільшенням, що при базі  $l = 20$  мм дає можливість оцінювати обумовлену деформацію до  $\varepsilon = 10^{-4}$ . Випускають зразки даних тензометрів зі збільшенням і в кілька тисяч разів та базою до

2 мм, які використовуються при вимірюваннях, наприклад, у зонах концентрації напруг.



Рис. 65. Кінематична схема важільного тензометра:

*a* – початкове положення; *b* – зсув важелів після деформації (показані пунктиром); *1* – елемент, що випробовується; *2* – вістря нерухомої ніжки; *3* – нерухома ніжка; *4* – вістря рухомої ніжки; *5* – рухома ніжка; *6* – вісь обертання ніжки *5*; *7* – передатний стержень; *8* – стрілка; *9* – вісь обертання стрілки; *10* – шкала; *l* – база тензометра

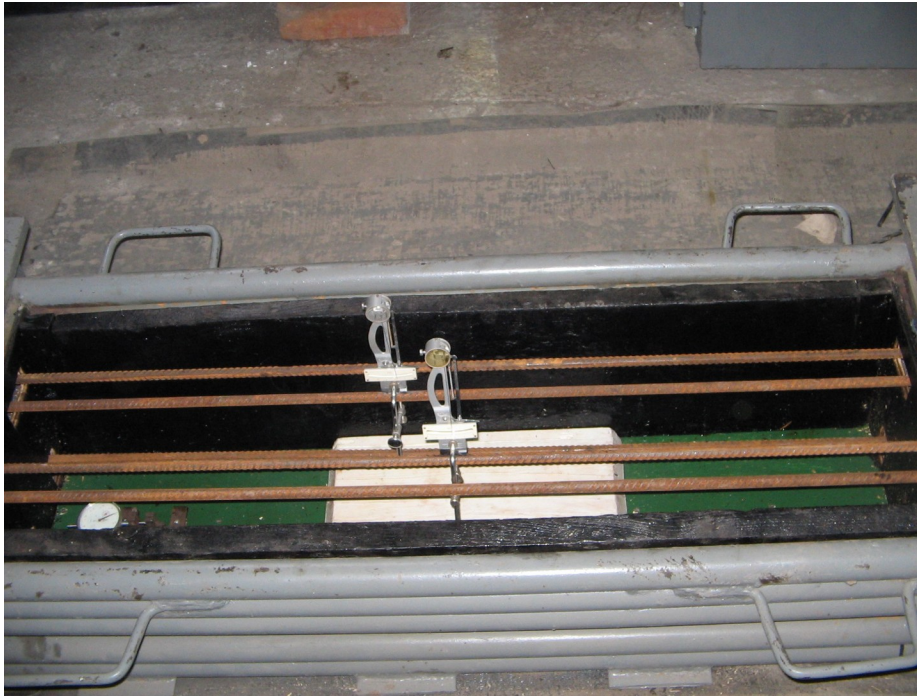


Рис. 66. Визначення подовження арматури за допомогою механічного тензометра Гугенберга

При необхідності одержання усереднених результатів (у випадку неоднорідних матеріалів - деревини, бетону, кам'яної кладки і т.д.) база вимірювань повинна бути збільшена, для чого застосовуються спеціальні *подовжувачі* (рис. 67). Кріплення тензометра до поверхні досліджуваного елемента здійснюється за допомогою струбцин та інших аналогічних пристосувань.

Рис. 67. Тензометр з подовжувачем бази:

1 – елемент, що випробовують; 2 - тензометр; 3 - рухома ніжка тензометра, обперта на елемент; 4 - нерухома ніжка тензометра,

не дотична до поверхні елемента; 5 - стержень подовжувача; 6 - упорна ніжка подовжувача; 7 – гвинт з'єднання; 8 - отвір у стержні подовжувача для струбцини або іншого пристосування для кріплення;  $l$  - база тензометра;  $L$  - база тензометра з подовжувачем

На рис. 68 показана схема одного з важільних тензометрів з індикатором. Цей тип більш важкий та громіздкий у порівнянні з легкими і зручними тензометрами Гугенбергера. У важільних тензометрах інший принцип розповсюдженої у нас системи (Н.Н. Аістова), індикатор замінений мікрометричним гвинтом, який використовується так само, як і в клінометрах його системи. Перевагою цих приладів є їхня малогабаритність і трохи більша, у порівнянні з іншими типами, стійкість на досліджуваній конструкції; недоліком є необхідність обертання мікрометричного гвинта перед кожним відліком.

Рис. 68. Важільний тензометр з індикатором:

$l$  – елемент, що випробовують; 2 – корпус приладу; 3 – нерухома ніжка; 4 – рухома ніжка; 5 – ламаний важіль; 6 – вісь обертання важеля 5; 7 – штифтовий індикатор;  $l$  – база тензометра

Установлення важільних тензометрів вимагає (незважаючи на простоту цієї операції) деякої навички – при недостатньому притиску опорних ніжок можливе їх «проковзування» при



деформаціях матеріалу; при зайвому ж натягу зростає тертя в осях важільних передач, що впливає на точність вимірювань.

Градування тензометрів повинно періодично повторюватися, оскільки їх збільшення  $k$ , обумовлене співвідношенням плечей важелів, не залишається стабільним (впливає навіть найнезначніше зношування опорних призм).

Встановлені тензометри повинні бути захищені від атмосферних впливів і освітлення прямими променями сонця. Чутливі вони також до струсів та ударів.

Незважаючи на всі ці недоліки, механічні тензометри застосовуються як в лабораторних, так і в натурних умовах, у випадках проведення вимірювань у невеликій кількості точок, доступних для безпосереднього зняття відліків. Застосовуються вони також для контролю показань, одержаних за допомогою тензометрів інших систем.

### 2.7.3.3. Динамометри

При випробуваннях будівельних конструкцій поряд зі спеціальними застосовуються також динамометри звичайного типу, які використовуються з іншою метою цілей в будівельній практиці. Найпоширенішими з них є динамометри, засновані на механічному принципі дії, з пружними елементами, з'єднаними зі стрілкою або іншим покажчиком, за положенням якого береться відлік по шкалі. У більшості випадків ці динамометри громіздкі та важкі і не завжди забезпечують необхідну точність і діапазон вимірювань.

У теперішній час усе ширше застосовуються електромеханічні динамометри з тензорезисторами. На рис. 69, *а* показаний тяговий динамометричний елемент у вигляді сталевого стержня круглого поперечного перерізу, близького за обрисами до стандартних зразків, використовуваних при випробуванні металу на розтягання; на рис. 69, *б* – кільцевий динамометр для порівняно невеликих стискальних зусиль, а на рис. 69, *в* та 70 – товстостінний циліндр для вимірювання значних стискальних зусиль. Показані на цих схемах тензорезистори як активні (робочі), так і компенсаційні, розташовані симетрично. Послідовне з'єднання тензорезисторів у кожній групі виключає вплив можливої позацентровості

прикладення навантаження. Розглянуті динамометри компактні, неважкі і відповідають вимогам, які ставляться до них.

## 2.8. Проведення випробувань

### 2.8.1. Підготовчі роботи

Велика трудомісткість і вартість статичних випробувань, поряд із труднощами (а в окремих випадках і неможливістю) повторення випробувань, вимагають ретельного попереднього відпрацьовування їхньої програми. Правильність її вибору в значній мірі визначає як ефективність усієї майбутньої роботи, так і надійність усіх даних, одержуваних у результаті випробування.

**a )**

Рис. 69. Динамометричні елементи із тензорезисторами:  
*a* - для вимірювання розтягуючих зусиль; *б* та *в* - для вимірювання стискальних зусиль; *1* - суцільний стержень круглого перерізу; *2* - кільцевий динамометр; *3* - товстостінний циліндр; *4* - активні (робочі) тензорезистори; *5* - компенсаційні тензорезистори



Рис. 70. Динамометр для визначення зусилля обтиснення у високоміцних шпильках при обтисненні плит безбаластного мостового полотна

Перед початком випробувань повинна бути проведена необхідна підготовка: змонтовані навантажувальні пристосування та підготовлене навантаження; встановлені риштування та огороження; забезпечено, якщо це визначається умовами випробувань, додаткове освітлення місць встановлення приладів; погоджені перерви в експлуатації досліджуваного об'єкта і т.д.

**Попередні підрахунки.** Уточнюється необхідне навантаження для випробувань та визначаються відповідні цьому навантаженню значення переміщень, деформацій, напруг і зусиль, що виникають у досліджуваних елементах конструкцій.

Такі підрахунки є продовженням перерахунків, які виконуються за результатами огляду та з урахуванням усіх виявлених при цьому відхилень від проекту, уточнених характеристик матеріалу, виявлених ослаблень і т.д. У спорудах з неявно вираженою розрахунковою схемою (яка допускає вибір декількох можливих варіантів) попередні підрахунки повинні бути виконані за всіма цими схемами. Порівняння з результатами випробувань дозволяє надалі обрати з них найбільш близьку до дійсної роботи споруди.

Аналогічно поводяться відносно модуля пружності та інших характеристик матеріалу, якщо до початку випробування значення їх не можуть бути надійно визначені. Ці підрахунки ведуться в межах можливих діапазонів з подальшим уточненням фактичних значень за результатами випробувань.

## **2.8.2. Розміщення приладів**

Перед проведенням випробувань складається схема розташування вимірювальних приладів із зазначенням їх типу та характеристик. При цьому враховуються такі положення:

- вимірювання найбільш відповідальних параметрів, що визначають працездатність споруди, треба (для виключення можливості помилок) дублювати, застосовуючи прилади різного принципу дії. Так, наприклад, прогин ферм, який вимірюється за допомогою прогиномірів, доцільно перевіряти шляхом нівелювання;

- до груп однотипних приладів додається контрольний, що знаходиться в тих же умовах, але розташований на елементі, що не бере участі у роботі споруди. Зміна показань контрольного приладу дозволяє врахувати вплив зовнішніх факторів на результати вимірювань і внести в них відповідні виправлення;

- у той же час не треба без особливої в цьому необхідності збільшувати загальну кількість встановлених приладів. Зайві прилади подовжують зняття відліків і, не приносячи особливої користі, ускладнюють проведення випробувань та обробку їхніх результатів;

- за інших рівних умов прилади потрібно встановлювати там, де вимірювані показники досягають найбільших значень. Недоцільно ставити прилади в зоні «нульових» відліків (наприклад тензometri вздовж нейтральної осі елемента, що згинається), оскільки навіть невеликі похибки вимірювань у цьому випадку будуть значно спотворювати одержані результати.

### **2.8.2.1. Розміщення приладів при вимірюванні прогинів**

Щоб визначити прогин балки з урахуванням осідання опор, необхідно встановити не менше трьох прогиномірів (рис. 71, *a*). При неприступності опорних перерізів для встановлення приладів, крайні прогиноміри зсуваються всередину прогону з відповідним урахуванням впливу цього зсуву при обробці результатів досліджень.

Для уточнення обрисів пружної лінії елементів, що навантажуються, потрібне більше число прогиномірів, розподілених уздовж прогону (рис. 71).

#### **2.8.2.2. Розміщення приладів при вимірюванні кутів нахилу**

У балкових конструкціях найбільш доцільно вимірювати поворот опорних частин (рис. 72). У розрізних балках кут нахилу пружної лінії тут є максимальним і поблизу опор майже не міняється, що дозволяє, без істотних погрешностей у результатах вимірювань, вибирати для встановлення приладів найбільш зручні позиції. Можливе також винесення клінометрів і на консолі за опорами.

*a*)

Рис. 71. Розміщення приладів при вимірюванні прогинів:

$a$  - при доступності опорних перерізів балки;  $b$  - при крайніх прогиномірах, зміщених уздовж прогону;  $l$  - прогон балки;  $a$  – відстань між зміщеними прогиномірами;  $f$  - прогин середнього перерізу з урахуванням осідання опор;  $f'$  - частковий зсув середнього перерізу, зафіксований при зміщених крайніх приладах;  $1, 2, 3$  – прогиноміри

Рис. 72. Встановлення приладів для вимірювання кутів нахилу:

1, 2 – клінометри; 3 – початкове положення осі балки;

4 – пружна лінія вигнутої осі балки

### **2.8.2.3. Розміщення приладів при вимірюванні деформацій**

Вибір позицій для кріплення тензорезисторів, механічних тензометрів та інших приладів, які застосовуються при визначенні деформацій, важливий з погляду можливостей і повноти аналізу пружно-деформованого стану досліджуваного матеріалу. Нижче коротко розглянуті основні випадки, які зустрічаються при випробуваннях конструкцій та їх окремих елементів.

Вимірювання при одновісно-напруженому стані матеріалу – при визначенні поздовжніх деформацій (нормальних до поперечних перерізів елементів) у стояках, колонах, ригелях рам, поясах та ґратах ферм, балкових конструкціях і т.д.

Як приклад на рис. 73 показано кілька поперечних перерізів. Бази приладів на схемах орієнтовані за напрямком вимірюваних деформацій, тобто перпендикулярно до площини креслення.

Рис. 73. Розміщення тензometrів по периметру поперечного перерізу елементів: 1-4 – тензometrи, встановлені перпендикулярно до площини перерізу

***При дії однієї лише поздовжньої сили при відсутності згинального момент, в перерізі утворюється рівномірний напружений стан.***

Для визначення виникаючих деформацій теоретично було б достатньо встановити один лише прилад. Однак вважається необхідним проведення вимірювань не менш ніж у двох точках (рис. 73, а) оскільки: 1) відлік по одному лише приладу недостатньо надійний через можливість випадкових похибок і 2) у відсутності ексцентриситету прикладення зусилля необхідно переконатися за однаковим показанням обох приладів.

***Спільна дія поздовжньої сили та згинального моменту в перерізі створюється нерівномірний напружено-деформований стан.***

Якщо площа дії моменту відома, то для вимірювання виникаючих деформацій необхідно встановити не менше двох приладів у точках перетинання, периметра перерізу з площею дії сил (на рис. 73, а момент, прикладений у площині Y). Для контролю доцільно обрати ще одну позицію для проведення вимірювань у найбільш напруженій зоні перерізу. При невеликій відстані між крайніми точками в площині дії моменту (плече  $h$  на рис. 73, а) встановлення контрольного приладу обов'язкове.

Якщо площа дії моменту невідома, то необхідне встановлення трьох приладів - для визначення впливів  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$ .

Відповідний приклад наведений на рис. 73, б. На рис. 73, в показане те ж встановлення, але з додаванням контрольного приладу.

**Дія поздовжньої сили, згинальних моментів згинально-крутильного моменту В.** Для визначення  $N$ ,  $M_x$ ,  $M_y$  і  $B$  потрібно встановити не менше чотирьох приладів. На рис. 73, г наведений відповідний приклад для тонкостінного двотавра, тут доцільно вмикати додатково контрольний прилад.

**Вимірювання при плоско-напруженому стані матеріалу.** Вимірювати деформації в умовах плоско-напруженого стану доводиться при випробуваннях листових конструкцій (резервуарів, газгольдерів і т.д.), балок-стінок та ін.

Для уточнення напруженого стану матеріалу необхідно при цьому встановлювати в розглянутій точці кілька тензометрів по різних напрямках. Найбільш зручно при цьому застосовувати тензорезистори, приклеювання яких, у будь-якому заданому напрямку не викликає труднощів. Кількість тензорезисторів, необхідних у кожній точці, визначається умовами поставленого завдання. Розглянемо два випадки.

**Випадок 1.** Напрямок головних напруг ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  та головних деформацій) у досліджуваній точці відомий. Повинні бути знайдені головні деформації  $\epsilon_{\max}$  і  $\epsilon_{\min}$  (завдання з двома невідомими). Для їх визначення потрібне кріплення не менше двох тензорезисторів, орієнтованих звичайно по заданому напрямку головних напруг під кутом  $90^\circ$  один до одного (рис. 74, а). Для контролю показань додають третій тензорезистор під кутом  $45^\circ$  до попередніх (рис. 74, б та 75 – «прямокутна розетка»).



a )

I

Рис. 74. Схеми розміщення тензорезисторів у двомірному полі деформацій:

*a* – під кутом  $90^\circ$ ; *б* – «прямокутна розетка»; *в* – «віялова прямокутна розетка»; *г* – рівнокутна дельта-розетка; *д* – Т-дельта-розетка

**Випадок 2.** Головні напрямки *невідомі*. Повинні бути визначені як величини, так і напрямки  $\varepsilon_{\max}$  і  $\varepsilon_{\min}$  (завдання з трьома невідомими). Необхідне кріплення не менше трьох тензорезисторів. Найчастіше застосовується та ж «прямокутна розетка» (рис. 74, *б*). Для контролю може бути доданий під кутом  $45^\circ$  четвертий тензорезистор (рис. 74, *в* - «віялова прямокутна розетка»).

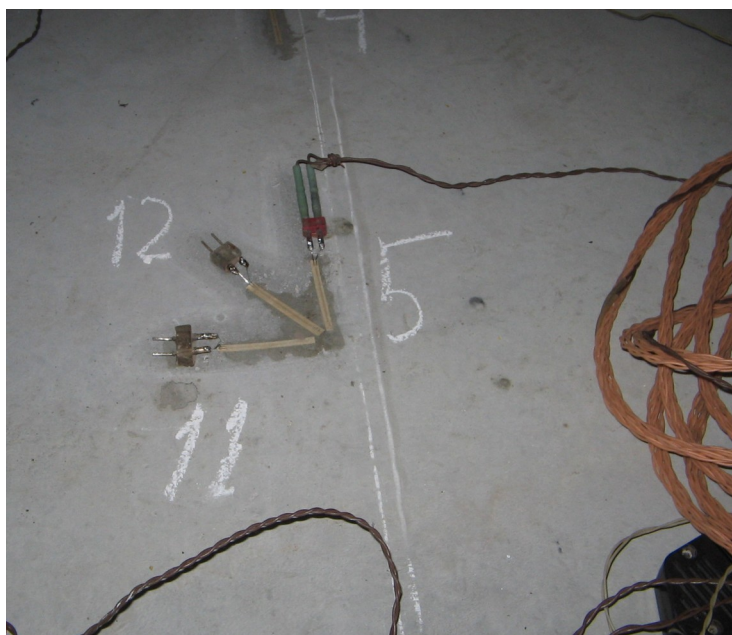


Рис. 75. Встановлення тензорезисторів за схемою рис.74, б, «прямокутна розетка»

Можливе використання розеток та інших конфігурацій, наприклад «рівнокутної розетки» (рис. 74, з) із трьома тензорезисторами, орієнтованими під кутом  $60^\circ$  один до одного. Розвитком її є «Т-дельта-розетка» з чотирма тензорезисторами (рис. 74, д).

Через невеликі розміри тензорезисторів розміщення їх на поверхні конструкцій звичайно не викликає труднощів. У дуже стиснутих умовах для економії місця (а також при різко мінливому полі напруг) можна користуватися розетками зі сполученими тензорезисторами (рис. 76), наклеєними заздалегідь на загальну основу.

Рис.76. Розетки зі сполученими тензорезисторами:  
а – «прямокутна»; б – «рівнокутна розетки»

**Вимірювання деформацій при об'ємно-напруженому стані матеріалу.** Систематично такі спостереження проводяться на об'єктах гідротехнічного будівництва, де встановлення заставних тензометрів при бетонуванні масивів великих гребель необхідне для подальшого спостереження за їхньою роботою в процесі експлуатації. В інших випадках подібні вимірювання проводяться, головним чином, з метою досліджень.

## **2.9. Обробка результатів статичних випробувань**

### **2.9.1. Графічна обробка**

Першим етапом обробки є ретельний контроль вірогідності отриманих експериментальних даних. Різного роду відхилення в правильності ходу приладів (переломи графіків, різкі «випади» окремих точок і т.д.) оцінюють при цьому з погляду можливості їхньої появи за умовами роботи конструкції і порівнюють з одночасно відзначеними показаннями інших приладів, а також записами в журналах випробувань.

У ряді випадків відхилення показань приладів, що збігаються з моментами утворення тріщин в конструкціях, що навантажуються, зрушеннями елементів і т.д., можуть бути пояснені впливом цих факторів і відліки визнані в достатній мірі надійними.

Окремі виправлення та графіки показань можуть бути внесені на підставі вимірювань контрольними приладами. Як приклад на рис. 77 показаний хід робочого 1 і контрольного 2 прогиномірів. Обидва прилади встановлені в безпосередній близькості один від одного, знаходилися в однакових умовах по відношенню до температури нагрівання сонячними променями, впливу поривів вітру і т.д., але прогиномір 2 не реєстрував переміщень. Зміни його показань вносять як виправлення при кресленні графіка 3, що і приймається як вихідне, для подальшої обробки.

Приклади побудови графіків. На рис. 78 показана сполучена схема «час - навантаження - деформація». Ця схема дає наочне

уявлення як про режим прикладення, витримування та зняття навантаження, так і відповідні деформації і розвиток їх у часі.



Рис. 77. Побудова графіка показань приладів з урахуванням виправлень:

1 – графік показань робочого приладу; 2 – графік показань контрольного приладу; 3 – відкоректований графік робочого приладу

Д е ф о



Рис. 78. Сполучений графік «час - навантаження - деформація»:

*I* - навантаження; *II* - витримування під навантаженням;  
*III* - розвантаження; *IV* - спостереження після зняття навантаження

Інший характерний приклад наведений на рис. 79, де показаний графік осідання. По осі абсцис відкладені значення навантаження, по осі ординат – обмірювані переміщення (відкладені в цьому випадку вниз). Вертикальні відрізки графіка, які відповідають відповідному витримуванню навантаження, розшифровують поруч на допоміжних кривих «осідання - час».

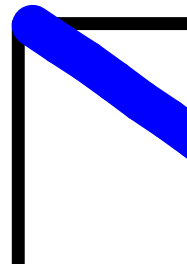


Рис. 79. Графік вимірювання осідань:

*1* – залежність «навантаження-деформація»; *2* і *3* – зростання деформації в часі при витримуванні прикладених ступенів навантаження

## **2.9.2. Обробка результатів вимірювання переміщень**

### **2.9.2.1. Підрахунки прогинів при завантаженні простої балки**

Розташування прогиномірів показано на рис. 71.

При встановленні приладів над опорами та посередині прогону, як показано на рис. 71,а, прогин легко одержати зі співвідношення:

$$f = y_2 - \frac{y_1 + y_3}{2}, \quad (2)$$

де  $y_1$  і  $y_3$  - осідання в опорних перерізах;  
 $y_2$  - переміщення середнього перерізу.

При крайніх положеннях приладів, симетрично зміщених всередину прогону (див. рис. 71, б),

$$f' = y_2 - \frac{y_1' + y_3'}{2}, \quad (3)$$

де  $f'$  - частина прогину середнього перерізу, віднесена до відстані  $l'$  між зміщеними прогиномірами.

Шляхом аналогічних обчислювань визначають відповідне значення  $f'$  і при несиметричному розташуванні приладів по прогону балки.

Перехід від  $f'$  до повного значення прогину  $f$  виконується з урахуванням обрису пружної лінії вигнутої балки. У таблиці наведені дані відповідного перерахування, виходячи з теоретичного обрису пружної лінії для двох практично важливих випадків: суцільного рівномірно розподіленого навантаження та зосередженого вантажу, прикладеного посередині прогону. Розташування приладів прийняте симетричним за рис. 71, б. Крайні прогиноміри знаходяться на відстані  $a$  від опорних перерізів балки з прогоном  $l$ . Підрахунок виконується за формулою:

$$f = k \times f', \quad (4)$$

де коефіцієнт  $k$  залежить від відношення  $a/l$  (таблиця).

Дані таблиці підраховані для балок постійного перерізу. Аналогічно можуть бути отримані значення перехідних коефіцієнтів і при інших схемах завантаження для балок змінного

перерізу та при довільному (несиметричному) розташуванні прогиномірів по довжині прогону.

Таблиця

Значення перехідного коефіцієнта  $k$

$a/l$	При рівномірно розподіленому навантаженні	При зосередженому вантажі посередині прогону
0,10	1,457	1,420
0,09	1,396	1,364
0,08	1,338	1,312
0,07	1,285	1,264
0,06	1,236	1,218
0,05	1,189	1,176
0,04	1,146	1,136
0,03	1,106	1,099
0,02	1,068	1,064
0,01	1,033	1,031

### 2.9.2.2. Визначення опорних моментів і згинальної твердості балок по вимірюваних прогинах та кутах нахилу

На рис. 80, *а* показана балка постійного перерізу з розташованим по її прогону навантаженням будь-якого виду, яке позначають індексом «Р». На балку діють також опорні моменти  $M_A$  та  $M_B$ , значення яких найчастіше (наприклад, у ригелях рам, у нерозрізних балках і т.д.) невідомі та повинні бути визначені експериментальним шляхом. Будемо вважати, що уточненню підлягає також фактичне значення згинальної твердості балки  $EI$ .

Для визначення трьох невідомих ( $M_A$ ,  $M_B$  і  $E$ ) необхідно встановити і взяти відліки по трьох приладах, наприклад вимірювання прогину  $f$  у якому-небудь проміжному перерізі балки та визначення кутів нахилу  $\alpha$  і  $\beta$  вигнутої осі в опорних перерізах рис. 80, *б*.

Вважаючи, що деформації незначні, то  $\text{tg } \alpha \approx \alpha$  і  $\text{tg } \beta \approx \beta$ , можемо записати (при середньому прогиномірі, розташованому посередині прогону):

$$\begin{aligned}\alpha &= \alpha_p + \frac{M_A \times l}{3EI} + \frac{M_B \times l}{6EI} \\ \beta &= \beta_p + \frac{M_A \times l}{6EI} + \frac{M_B \times l}{3EI}, \\ f &= f_p + \frac{M_A \times l^2}{16EI} + \frac{M_B \times l^2}{16EI}\end{aligned}\quad (5)$$

де  $\alpha_p, \beta_p$  - кути нахилу від заданого навантаження в простій балці прогоном  $l$  при відсутності опорних моментів;

$f_p$  - прогин від заданого навантаження в простій балці прогоном  $l$  при відсутності опорних моментів.

Величини  $\alpha_p, \beta_p$  і  $f_p$  визначають розрахунковим шляхом.

Підставивши підраховані значення  $\alpha_p, \beta_p$  і  $f_p$  та отримані за показниками приладів  $\alpha, \beta$  і  $f$  в рівняння (5) і розв'язуючи цю систему рівнянь, знаходимо значення  $M_A, M_B$  і  $E$ .

При можливості осідання опор (рис. 80, в) прогиноміри, крім встановленого в прогоні, повинні бути розміщені і в опорних перерізах  $A$  та  $B$ . Підрахунок прогину  $f$  (за винятком осідання опор) розглянутий вище.

Кут  $\gamma$ , що визначає нахил балки, викликаний нерівномірністю осідання, визначається співвідношення

$$\gamma = \text{arctg} \frac{y_B - y_A}{l}, \quad (6)$$

де  $y_B$  і  $y_A$  – вимірювані осідання опорних перерізів.

Для знаходження кутів  $\alpha$  і  $\beta$  відлік по лівому клінометру, як видно з рис. 80, в, повинен бути зменшений, а по правому збільшений на  $\gamma$ .

Якщо встановлення приладів в опорних перерізах неможливе, то їх зміщують усередину прогону.



a ) M

Рис. 80. Дослідження роботи балки при дії опорних моментів: *a* - схема завантаження; *б* - схема пружної лінії; *в* - пружна лінія при наявності осідання опор; *г* - результуюча епюра згинальних моментів; *д* - допоміжна схема для підрахунку величини опорних моментів

На рис. 80, *г* наведена результуюча епюра моментів для розглянутої балки. Якщо вважати, що кінцеві прогиноміри та клінометри встановлені в перерізах *I* і *II*, які знаходяться на відстані *a* та *в* відповідно від лівої і правої опор, то необхідні підрахунки можуть бути проведені в такому порядку:

1) за отриманими даними визначають умовно «опорні» моменти  $M_{оп}^I$  та  $M_{оп}^{II}$  для балки з прогоном  $l'$ , рівним відстані між перерізами  $I$  і  $II$ , у припущенні впливу на цю балку тієї частини заданого навантаження, що прикладена по довжині  $l'$ . Одночасно визначають і значення твердості  $EI$ ;

2) теоретично підраховують згинальні моменти  $M_P^I$  та  $M_P^{II}$  у перерізах  $I$  і  $II$  для простої балки прогоном  $l$  при дії на неї всього заданого навантаження  $P$ , але при відсутності опорних моментів;

3) вводячи допоміжні позначення:

$$\begin{aligned} M_I &= M_{оп}^I + M_P^I, \\ M_{II} &= M_{оп}^{II} + M_P^{II}, \end{aligned} \quad (7)$$

з геометричних співвідношень за рис. 80,  $\delta$  остаточно знаходимо:

$$\begin{aligned} M_A &= M_I + (M_I - M_{II}) \frac{a}{l}, \\ M_B &= M_{II} - (M_I - M_{II}) \frac{b}{l}. \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.9.3. Оцінка результатів статичних випробувань

Оцінка результатів випробувань виконується на підставі всебічного їх аналізу та зіставлення з даними теоретичних розрахунків, уточнених відповідно до фактичних розмірів, характеристики матеріалу і стану об'єкта, що перевіряється.

Найбільш повна оцінка може бути дана при розгляді результатів випробувань *до вичерпання несучої здатності*. При цьому можуть бути виявлені такі основні питання:

- яким чином відбувається втрата несучої здатності (у результаті руйнування матеріалу в одному або декількох основних елементах конструкції; через втрату стійкості окремих елементів або всієї конструкції в цілому; через порушення роботи зв'язків і з'єднань і т.д.);

- чи відповідає фактичне руйнівне навантаження теоретичному та ступінь їхньої розбіжності;

- чи відповідають вимірювані під час випробування переміщення і деформації обчисленим теоретично.

На підставі аналізу характеру втрати несучої здатності можуть бути надані рекомендації з підсилення виявлених більш слабких елементів і вузлів в аналогічних конструкціях. Зіставлення фактичного та теоретично очікуваного руйнівних навантажень дає можливість при перевищенні руйнівного навантаження над її теоретичним значенням оцінити невраховані раніше зайві запаси міцності з впливаючими звідси практичними висновками. Настання ж руйнування при навантаженні, менше теоретичного, може свідчити про недоброякісність застосованих матеріалів і виконання робіт на об'єкті, що перевіряється. В обох випадках розбіжність може бути також наслідком неправильно обраної розрахункової схеми або проведення самого розрахунку. Остаточні висновки можуть бути зроблені на підставі аналізу і порівняння вимірюваних переміщень і деформацій з теоретичними, а також розгляду умов появи та поступового розвитку тріщин та інших пошкоджень в об'єкті випробування під час його завантаження.

При випробуваннях до руйнування *контрольних зразків* продукції серійного виготовлення (наприклад, стінових панелей та інших аналогічних елементів і конструкцій) висновки за результатами випробувань роблять з урахуванням відповідних нормативних вказівок.

Наприклад, якщо руйнування відібраних для випробування панелей відбувається при навантаженні, менше 100%, але не менше 85% контрольної, то потрібне повторне завантаження такої ж кількості зразків. Усю партію, що перевіряється, вважають такою, що витримала випробування, якщо при цьому повторному випробуванні жоден зразок не зруйнувався, при навантаженні не менше 85%. У протилежному випадку партію бракують.

У панелях, визнаних придатними за їхньою несучою здатністю, прогини, що вимірюються, не повинні перевищувати контрольні більш ніж на 10%. Якщо в панелях не допускаються тріщини за умовами їхньої експлуатації, а при випробуваннях вони з'являються при навантаженні, меншому контрольного, то партія не приймається і т.д.

Найбільш складною є оцінка результатів випробувань споруд, *призначених до введення в експлуатацію*, оскільки судження про їх

фактичну несучу здатність і прогнози у відношенні майбутньої їхньої роботи доводиться в ряді випадків робити на підставі прикладення до них навантаження, що не перевищує розрахункового.

Основними показниками, які використовуються при цій оцінці, є переміщення та деформації, вимірювані при випробуванні, і результати спостережень за появою і розвитком тріщин, пошкоджень у конструкціях, що випробовуються.

При аналізі цих даних виходять з таких міркувань:

- експериментально виявлений напружено-деформований стан конструкцій, що перевіряються, повинен відповідати теоретичному. У тих випадках, коли значення граничних переміщень нормовані за умовами експлуатації, ці вимоги повинні бути дотримані;

- при випробуваннях об'єктів, що багаторазово піддавалися сильним впливам навантаження, виявлення навіть незначних залишкових переміщень і деформацій після прикладення і зняття такого ж випробувального навантаження є ознакою незадовільної роботи споруди. Причини цього повинні бути виявлені і на підставі них зроблені відповідні практичні висновки;

- залишкові прогини залізобетонних конструкцій, що навантажуються вперше, не повинні перевищувати  $1/3$  прогину, вимірюваного при нормативному навантаженні;

- істотні висновки можуть бути зроблені (у тому числі і для пояснення появи надмірних залишкових прогинів) на підставі спостережень за наростанням переміщень при витримуванні навантаження на споруді і за поступовим зменшенням їх після зняття навантаження. При нормальній роботі споруди ці зміни повинні поступово загасати; відсутність явно вираженого загасання свідчить про незадовільний стан споруди; у випадку ж прискорення процесу наростання переміщень під час витримування навантаження, споруда за її станом повинна бути визнана непридатною для передачі в експлуатацію;

- у попередньо напружених конструкціях після їх завантаження та зворотного зняття навантаження не повинні зменшуватися зусилля в напружених елементах.

При наявності численних результатів випробувань однотипних конструкцій, проведених у порівнянних умовах, найбільш загальні

висновки по них одержують шляхом *статистичної обробки* відповідних експериментальних даних.

### **Контрольні запитання для самоперевірки**

1. Чим обумовлено проведення статичних випробувань?
2. З якою метою проводяться випробування споруд, що знаходяться в експлуатації?
3. Як виконати вибір елементів для проведення статичних випробувань?
4. Як виконується вибір схеми завантаження?
5. Переваги та недоліки сипучих матеріалів як навантажень.
6. Недоліки великих штучних вантажів як навантажень.
7. Які переваги навантаження водою?
8. Які способи застосовуються при створенні зосереджених зусиль?
9. Що є найбільш зручним засобом для прикладення до досліджуваних об'єктів значних зусиль?
10. У яких випадках застосовується рухоме навантаження?
11. Як призначаються ступені навантаження?
12. Які випускаються вимірювальні пристрої для проведення основних вимірювань при статичних випробуваннях?
13. Назвіть основні прилади для визначення лінійних переміщень.
14. Яка ціна поділки шкали в індикаторах масового виготовлення?
15. Якими приладами виконують вимірювання горизонтальних переміщень?
16. Назвіть основні прилади для вимірювання деформацій.
17. З якою метою проводять попередні підрахунки перед проведенням статичних випробувань?
18. Які положення враховуються при розташуванні вимірювальних приладів на конструкції перед проведенням випробувань?
19. Як виконується розміщення приладів при вимірюванні кутів нахилу?
20. З якою метою виконується графічна обробка результатів випробувань?
21. Як виконується оцінка результатів статичних випробувань?

### **3. ДИНАМІЧНІ ВИПРОБУВАННЯ**

## 3.1. Основні характеристики динамічної роботи будівельних конструкцій

### 3.1.1. Навантаження

Під динамічними навантаженнями розуміють впливи, які міняються настільки швидко, що в елементах конструкцій виникають *сили інерції*, які істотно впливають на їхню роботу.

Величина, напрямок і місце прикладення навантажень можуть змінюватися незалежно один від одного або одночасно.

*Основні види динамічних впливів:*

1) зусилля, що виникають при роботі стаціонарно встановленого устаткування, - сили інерції частин, що рухаються, механізмів і машин, удари падаючих частин силових установок (молотів, копрів) і т.д.;

2) рухоме навантаження - від кранів, електрокарів, залізничного та автодорожнього транспорту; при русі людських мас (ходьба «у ногу», біг) і т.д.;

3) пульсації вітру, що викликають коливання високих димарів, щогл, веж і т.п.;

4) сейсмічні впливи при землетрусах і великих вибухах (наприклад, на викид породи, що викликають коливання ґрунту і поширюються далеко); удари повітряної вибухової хвилі і т.д.

По закономірності зміни динамічних впливів у часі розрізняють:

а) *періодично мінливі навантаження*. Одним з основних видів таких впливів є *гармонійне навантаження*, що міняється по синусоїдальній кривій (рис. 81). Будь-яке інше більш складне багаторазово повторюване навантаження може бути подане у вигляді суми окремих гармонійних впливів;

б) *циклічні незакономірні завантаження*, що носять характер випадкових процесів;

в) *імпульсивні навантаження* як одиночні (епізодичні), так і повторні. За тривалістю їхньої дії розрізняють *короткочасні та миттєві імпульси* (або удари).

Характеристиками імпульсного навантаження, що мінється в часі  $t$  за законом є:

- 1) тривалість впливу  $\tau$ ;
- 2) величина імпульсу

$$S = \int_0^{\tau} P(t) dt, \quad (9)$$

- 3) форма імпульсу

$$f(t) = \frac{P(t)}{P_0}, \quad (10)$$

де  $P_0$  – максимальне значення впливу.

Рис. 81. Графік пульсуючого навантаження

### **3.1.2. Робота конструкцій при динамічних впливах**

Під дією динамічного навантаження в елементах конструкцій виникають ( що носять у більшості випадків характер коливань) переміщення, деформації, напруги та зусилля.

**Періодичні коливання** - коливання, що повторюються через певні проміжки (цикл) часу (рис. 82, а і б). Основні параметри періодичних коливань:

$T$  - період коливання, рівний тривалості одного циклу, с;

$n = 1/T$  - частота коливання, рівна числу циклів коливань в одиницю часу;

$\omega = 2\pi/T$  - циклічна частота (або «кругова» частота), рівна числу циклів коливань в  $2\pi$  с.

При **гармонійних коливаннях** (рис. 82, б), що зустрічаються найбільш часто, переміщення  $Z$  визначають залежно від часу  $t$ :

$$Z = a \times \sin(\omega \times t + \alpha), \quad (11)$$

де  $a$  - амплітуда коливань ( $2a$  - розмах коливань);

$\omega t + \alpha$  - фаза коливань, що визначає положення точки, що коливається в момент часу  $t$ ;

$\alpha$  - початкова фаза (при  $t = 0$ ).

При гармонійних коливаннях швидкості та прискорення точок, що коливаються, змінюються також гармонічно.

Будь-яке періодичне коливання може бути отримане в результаті накладення один на одного певного числа гармонійних коливань з відповідно підібраними частотами та амплітудами.

Серед **неперіодичних коливань** найбільш істотними з погляду дослідження динамічних деформацій є *загасаючі* коливання (рис. 82, в). На рис. 82, г показані зростаючі коливання, що відповідають звичайно початку динамічного процесу. На рис. 82, д наведений графік коливань з мінливими розмахами і частотою, викликаними впливом циклічного незакономірно мінливого навантаження.

При спільній дії двох періодичних коливань з близькими між собою періодами  $T_1$  і  $T_2$  виникає явище *биття* (рис. 82, е). Період результуючого коливання  $T$  визначається за співвідношенням:

$$T = \frac{2}{(1/T_1 + 1/T_2)}, \quad (12)$$



період биття

$$T_{\sigma} = \frac{2}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}. \quad (13)$$

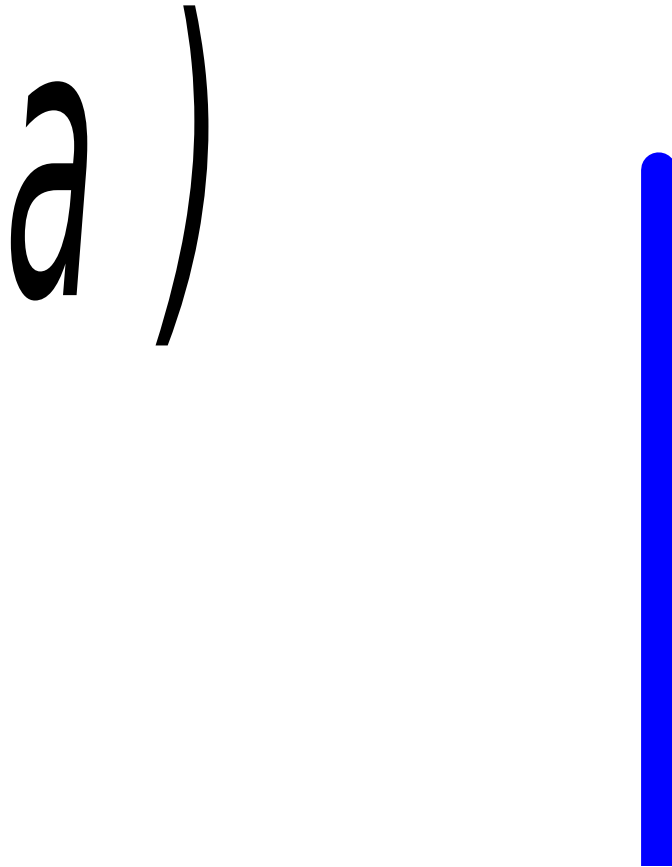


Рис. 82. Коливання:

*a* - періодичні; *б* - гармонійні (окремий випадок періодичних коливань); *в* - загасаючі; *г* - зростаючі; *д* - незакономірні; *е* - биття

З точки зору динамічних характеристик (тобто зв'язку між коливаннями та викликаючими їх динамічними впливами) розрізняють:

- *власні* (або «вільні») коливання, що виникають у результаті початкового збурювання (наприклад, удару, раптового видалення

якого-небудь зв'язку і т.п.), що протікають потім (поступово загасаючи) без прикладення яких-небудь нових зовнішніх впливів;

- *змушені* коливання, що відбуваються при систематичних повторюваних прикладеннях збуджуючих сил;

- *автоколивання*, тобто сталі коливання при наявності зовнішнього незмінно діючого джерела енергії (наприклад, коливання високих гнучких щогл або поперечні коливання мостів великих прогонів при вітрі постійної швидкості). Амплітуда автоколивань визначається властивостями коливальної системи і не залежить від початкових умов, при яких ці коливання виникли.

Основною динамічною характеристикою кожної конструкції є властиві їй частоти вільних коливань. У міру наближення частоти змушених коливань конструкції до частоти її власних коливань зростають амплітуди змушених коливань (а отже, і внутрішні зусилля та напруги), обумовлені цими впливами. Найбільші амплітуди виникають при резонансі, що відповідає збігу вищевказаних частот.

Сукупність частот власних коливань конструкції називається *спектром* її частот. Число коливань, що утворюють спектр, визначається *степенем вільності* коливної системи, тобто кількістю параметрів, необхідних для визначення координат усіх її точок у будь-який розглянутий момент часу.

Будівельні конструкції є системами з нескінченно великим числом степенів вільності. Умовно, до систем з *одним* степенем вільності можуть бути віднесені конструкції з обертонами коливань (тобто з коливаннями більше високих частот), в десятки разів перевищуючі частоту *основного*, тобто найнижчого тону. Прикладом таких конструкцій можуть служити: гнучкі балки з одним важким зосередженим вантажем, у порівнянні з яким власною вагою балок можна знехтувати; масивні фундаменти на податливій основі (якщо розглядати тільки поступальні або тільки обертальні коливання вантажу) і т.д.

При навантаженні, розподіленому вздовж гнучкого елемента, а також у випадку, коли власною вагою елемента в порівнянні з прикладеним навантаженням не можна знехтувати, доводиться

рахуватися як з основним тоном коливання, так і з наявністю обертонів.

У курсі динаміки споруд докладно розглядають способи обчислення частот спектра власних коливань для різноманітних конструкцій. При динамічних випробуваннях ці частоти визначають експериментальним шляхом.

З погляду оцінки роботи конструкцій необхідно знати основну частоту і кілька наступних за нею обертонів.

Кожній частоті спектра відповідає своя форма коливань даної конструкції. Як приклад на рис. 83 показані форми коливань балки із шарнірно обпертими кінцями, що відповідають основному тону (рис. 83, *a*) і першим двом обертонам (рис. 83, *б* і *в*).

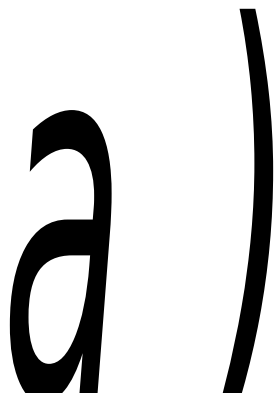


Рис. 83. Форми коливань однопрогонової шарнірно обпертої балки:  
*a* - коливання основного тону; *б* і *в* – першого та другого обертонів

Щоб викликати змушені коливання з формою, що відповідає тому або іншому тону спектра, необхідний вплив на систему збуджуючих навантажень, із частотою, рівною частоті розглянутого тону. При додаванні імпульсивних навантажень виникають складні загасаючі коливання, що є результатом накладення один на одного вільних коливань різної інтенсивності, що відповідають *різним* частотам спектра. Так, наприклад, у простій шарнірно обпертій балці удар посередині прогону викликає найбільші коливання другої форми (рис. 83, *б*).

## **3.2. Динамічні характеристики матеріалу**

### **3.2.1. Динамічний модуль пружності**

Співвідношення  $\sigma - \varepsilon$ , що характеризує модуль пружності, залежить від швидкості прикладення навантаження. Чим швидші зовнішні силові впливи, тим менше позначається вплив пружної післядії та пластичних деформацій. Цим пояснюється більша лінійна залежність між  $\sigma$  і  $\varepsilon$  при динамічній роботі матеріалу і деяке перевищення динамічного модуля пружності в порівнянні зі статичним його значенням.

Для металу різниця між  $E_{\text{дин}}$  і  $E_{\text{стат}}$  досить мала, наприклад для сталевих конструкцій ці величини можна вважати такими, що практично збігаються.

Для бетону, деревини та інших будівельних матеріалів розбіжність між динамічними і статичними значеннями модуля більш істотні.

Динамічні значення модуля пружності визначаються звичайно шляхом вібраційних випробувань, а також дослідженнями матеріалу за допомогою ультразвукових коливань.

### **3.2.2. Динамічні міцнісні характеристики**

При збільшенні швидкості прикладення навантаження проявляється в більшості випадків тенденція до збільшення межі пластичності і межі міцності матеріалу, що завантажується. З іншого боку, при різких силових впливах (ударах) можлива раптова поява та майже миттєвий розвиток тріщин, які можуть привести до крихкого руйнування конструкцій при порівняно малих прикладених зусиллях.

Схильність до крихкого руйнування, з яким доводиться рахуватися у першу чергу у металевих конструкціях, зростає в

місцях концентрації напруг (в отворах, вирізах і т.п.) і при зниженні температури.

При тривалих вібраційних навантаженнях можлива поява та розвиток тріщин від втоми. Міцність матеріалу визначається при цьому, як відомо, границею витривалості, що залежить як від матеріалу, так і від характеристик завантажувального циклу.

### 3.2.3. Внутрішнє тертя

Внутрішнє тертя є однією з найголовніших динамічних характеристик матеріалу. Наявність внутрішнього тертя (названого також внутрішнім непружним опором, демпфіруванням і т.д.) спричиняє загасання вільних коливань. Від інтенсивності внутрішнього тертя в матеріалі в значній мірі залежать і від амплітуди змушених коливань: чим більше внутрішнє тертя, тим більшою, за інших рівних умов, виявляється амплітуда сталих змушених коливань, а отже, і величина відповідних їм динамічних напруг. Усі зазначені фактори дуже важливі з погляду умов динамічної роботи конструкцій.

Внутрішнє тертя викликає необоротне поглинання (перетворення в тепло) механічної енергії, яке передається системі, що коливається, зовнішніми впливами. Кількісною характеристикою внутрішнього тертя є коефіцієнт поглинання  $\psi$  - відношення енергії, необоротно поглиненої матеріалом конструкції за цикл коливань, до середнього (за той же цикл) повної механічної енергії коливань розглянутої системи.

У динамічних розрахунках замість коефіцієнта поглинання користуються пропорційним йому параметром, що називається коефіцієнтом внутрішнього тертя (або коефіцієнтом непружного опору):

$$\nu = \frac{\psi}{2\pi}. \quad (14)$$

При випробуваннях будівельних конструкцій значення  $\psi$  і  $\nu$  визначають звичайно за отриманими даними про загасання вільних коливань, користуючись співвідношенням

$$\psi = 2\delta, \quad (15)$$

де  $\delta$  - логарифмічний декремент коливань.

Крім внутрішнього тертя, на режим як вільних, так і змушених коливань, впливає також «кулонівське» тертя в з'єднаннях і опорах, дія якого повинна бути врахована.

Опір же коливанням, які надаються повітряним середовищем (аеродинамічний опір), дуже незначний і у звичайних умовах роботи конструкцій ним можна знехтувати.

### **3.3. Завдання динамічних випробувань**

Нижче розглянуті основні завдання динамічних випробувань, обумовлені характером і призначенням досліджуваних об'єктів і їхнім станом.

#### **3.3.1. Випробування споруд і окремих конструкцій, що підлягають здачі в експлуатацію**

Об'єкти, розраховані на вплив динамічних навантажень (мости, конструкції ряду промислових будівель і т.д.), випробовують з метою перевірки їхньої роботи в умовах, що максимально наближаються до експлуатаційних. При цьому визначають динамічні параметри; так, наприклад, за частотою власних коливань окремих елементів можна судити про їхню жорсткість, а отже, і про відповідний модуль пружності матеріалу; шляхом розгляду форми коливань можна виявити наявність розбіжностей між прийнятою розрахунковою схемою й дійсною роботою досліджуваного об'єкта і т.д.

Істотна можливість зіставлення сталевих характеристик однотипних елементів у спорудах шляхом порівняння частот та інтенсивності загасання їхніх власних коливань. При незначній витраті праці та часу можуть бути, таким чином, виявлені ослаблені ділянки в досліджуваних об'єктах.

### **3.3.2. Випробування споруд і конструкцій, що знаходяться в експлуатації**

Повторні динамічні випробування дають можливість шляхом зіставлення їхніх результатів судити про зміну стану досліджуваного об'єкта в часі. З цією метою динамічні випробування можуть виконуватися:

а) у плановому порядку, якщо це передбачено правилами експлуатації;

б) після ремонтів і підсилень;

в) при наявності сумнівів у належному стані та збереженні необхідної твердості і несучої здатності об'єкта, наприклад, при сильному ураженні корозією, після пожеж і т.п.

Від статичних випробувань, які можуть бути поставлені з тією ж метою, динамічні випробування вигідно відрізняються меншою трудомісткістю і можливістю проведення їх в більш стислий термін.

При динамічних випробуваннях конструкцій, що експлуатуються, можуть ставитися й інші завдання. Так, наприклад, при необхідності розміщення нового динамічно діючого устаткування в ряді випадків виявляється доцільною попередня експериментальна перевірка частот власних коливань конструкцій, щоб уникнути небажаного збігу цих частот з частотою силових впливів агрегатів, які підлягають встановленню.

Якщо надмірні коливання спостерігаються при роботі вже змонтованого устаткування, аналогічні експериментальні дослідження виконуються для обґрунтування та розроблення заходів з усунення вібрацій.

### **3.3.3. Випробування будівельних деталей серійного виготовлення**

Мала трудомісткість і швидкість проведення динамічних випробувань дозволяють застосовувати їх для контролю якості виробів, що випускаються.

Основними параметрами, чутливими до наявності дефектів і знижених характеристик матеріалу в досліджуваних зразках, є частота та інтенсивність загасання їхніх власних коливань.

Проведена динамічна перевірка не знижує несучої здатності випробовуваних деталей і не перешкоджає їх використанню за основним призначенням.

### **3.4. Динамічні навантаження**

#### **3.4.1. Ударне навантаження**

Одиночним ударом збуджуються власні коливання в досліджуваних конструкціях і елементах.

З точки зору організації експерименту ударні випробування належать до числа найбільш простих, оскільки необхідні для створення удару пристосування порівняно нескладні і для уточнення основних параметрів збуджених коливань (їхньої частоти та інтенсивності загасання) не обов'язкове точне вимірювання величини повідомленого імпульсу; необхідно лише забезпечити силу удару, достатню для виразного запису коливань за допомогою застосованої вимірювальної апаратури.

##### **3.4.1.1. Вертикальні удари**

Для порушення коливань у порівняно легких та податливих елементах (наприклад, у плитах і балках перекриттів) можна здійснити удар ручним трамбуванням.

При дослідженнях більш важких та масивних конструкцій потрібні й більш сильні ударні впливи. Для цього ще порівняно недавно використовувалися падаючі вантажі (з масою від 100 кг і вище) з висоти 1-1,25 м; вантаж підіймали за допомогою переносних пристосувань типу легких ручних копрів. На конструкцію в місці падіння вантажу насипали шар піску для захисту поверхні елементів від пошкоджень при ударі та виключення підскоку вантажу, оскільки повторне його падіння після відскоку спотворює запис збуджених коливань.



Труднощі, пов'язані із застосуванням падаючих вантажів, зникають при використанні так званого «зворотного удару», що виникає при різкому розвантаженні конструкції. Для одержання цього динамічного ефекту до конструкції, що випробовується, у перерізі, обраному за умовами експерименту, прикріплюють тягу з включеним у неї динамометричним елементом, наприклад сталевим стержнем із заданою межею міцності. При відповідному значенні зусилля, переданого за допомогою тяги, цей стержень розривається, забезпечуючи тим самим практично миттєве зняття прикладеного навантаження.

#### **3.4.1.2. Горизонтальні та похилі удари**

Для створення горизонтальних ударів найчастіше користувалися підвішеним вантажем, що відтягується від конструкції перед ударом (приклад такого пристрою, що діє за принципом «тарана», схематично показаний на рис. 84). У теперішній час цей примітивний метод, де це можливо, також замінюється «зворотним» ударом, який створюється за допомогою натяжних пристосувань та забезпечує можливість одержання динамічних впливів у будь-якому необхідному напрямку із заздалегідь заданою силою удару.

Рис. 84. Горизонтальний удар «тараном»:

1 – конструкція, що досліджується; 2 – підвішена важка колода у відтягнутому положенні перед ударом; 3 – те ж у момент удару; 4 – підвіски

В окремих випадках, наприклад при вивченні сейсмостійкості конструкцій, можливе застосування спрямованих вибухів невеликої потужності, зроблених на відповідній відстані від досліджуваного об'єкта.

### 3.4.2. Вібраційне навантаження

Змушені коливання досліджуваних об'єктів створюються за допомогою *вібраційних машин* і гідродомкратів з пульсуючим впливом.

При натурних випробуваннях користуються звичайно вібраційними машинами з обертовими нерівноваженими масами, що приводяться в рух електромотором.

#### 3.4.2.1. Найпростіші машини з однією нерівноваженою масою

При обертанні нерівноваженої маси  $m$  (рис. 85) з кутовою швидкістю  $\omega$  розвивається відцентрова сила

$$P = m \times e \times \omega^2, \quad (16)$$

де  $e$  - відстань від центра ваги нерівноваженої маси до центра обертання.

При збереженні заданої швидкості обертання величина відцентрової сили  $P$  залишається постійною, напрямок же її безупинно міняється. Горизонтальна та вертикальна складові ( $X$  і  $Y$ ) силового впливу, переданого на об'єкт, що випробовується, змінюються при цьому за гармонійним законом:

$$\begin{aligned} X &= m \times e \times \omega^2 \times \cos \alpha \\ Y &= m \times e \times \omega^2 \times \sin \alpha \end{aligned} \quad (17)$$

де  $\alpha$  - кут, що характеризує положення неврівноваженої маси в розглянутий момент часу.

Силові впливи подібного роду досить часто зустрічаються в умовах експлуатації. Однак з погляду поставленого завдання, що полягає у виявленні динамічних характеристик досліджуваної конструкції, одночасна дія пульсацій у двох взаємно перпендикулярних напрямках небажана, тому що при цьому ускладнюється проведення необхідних інструментальних вимірювань, і наступна обробка та оцінка отриманих результатів. Вібраційні пристрої розглянутого найпростішого типу застосовуються лише при відсутності більш досконалого вібраційного устаткування.

Рис. 85. Відцентровий вібратор неспрямованої дії:

1 - неврівноважена маса; 2 – обертовий диск; 3 - корпус вібратора; 4 – об'єкт, що випробовують; 5 - кріплення

**3.4.2.2. Вібраційні машини спрямованої дії з неврівноваженими масами, що обертаються навколо паралельних осей**

Зусилля, що виникають при роботі вібраційної машини з двома неврівноваженими масами, які обертаються в різні сторони навколо паралельних осей  $O_1$  і  $O_2$ , схематично показані на рис. 86.

Приймемо, що маси  $m$  і ексцентриситети  $e$  вантажів 1 і 2 рівні між собою. Допустимо, що швидкості обертання вантажів  $\omega$  постійні і за абсолютною величиною рівні; збігаються також за своєю абсолютною величині і кутами  $\alpha$  (рис. 86), що характеризують (у будь-який момент часу) положення обертових вантажів щодо горизонталі.

При дотриманні всіх цих умов вертикальні складові  $Y_1$  і  $Y_2$  при впливі на випробовуваний об'єкт відцентрових сил будуть підсумовуватися; горизонтальних же складових тих же сил - взаємно погашатися.

Рис. 86. Відцентрова вібраційна машина з двома вантажами, що обертаються в протилежних напрямках навколо паралельних осей  $O_1$  і  $O_2$ :

1 і 2 - неврівноважені маси; 3 - обертові диски; 4 - корпус вібраційної машини; 5 - об'єкт, що випробовують; 6 - кріплення

На підставі формули (17) результуюча  $Y$  вертикальних впливів у момент положення вантажів під кутом  $\alpha$  буде дорівнювати

$$Y = Y_1 + Y_2 = 2 \times m \times e \times \omega^2 \times \sin \alpha . \quad (18)$$

Екстремальні значення  $Y$  при  $\alpha = \pm 90^\circ$

$$Y_{\max} = \pm 2 \times m \times e \times \omega^2 . \quad (19)$$

### 3.4.2.3. Гідравлічні пульсатори

Для створення циклічних впливів при *стендових* випробуваннях фрагментів конструкцій та окремих їхніх елементів, найчастіше застосовують гідравлічні силові циліндри (домкрати), з'єднані з насосною установкою і спеціальним агрегатом - пульсатором, що збуджує змінний потік рідини (рис. 87).

Перевагами даного способу збудження динамічних навантажень є:

- можливість створення значних зусиль (близько десятків і сотень тонн) у будь-яких сполученнях цих силових впливів за їхньою величиною, напрямком і фазою;
- дистанційність порушення;
- можливість програмування режиму тривалих випробувань і автоматизації всього процесу.

За своєю конструкцією домкрати циклічної дії випускають у різних варіантах. Як приклад на рис. 87 показана схема домкрата, призначеного для порушення пульсаційних зусиль.

Рис. 87. Схема домкрата циклічної дії:

1 і 2 - упорні поверхні (у об'єкта, що випробовується, та у стенда); 3 - циліндр; 4 - плунжер; 5 - порожнина для нагнітання масла; 6 - настановний шток; 7 і 8 - шарніри; 9 - стягуючі пружини

### **3.5. Вимірювання при динамічних випробуваннях**

#### **3.5.1. Загальні дані**

**Обумовлені характеристики.** При динамічних випробуваннях так само, як і при статичних, визначенню підлягають переміщення, деформації, напруження та зусилля, що виникають в об'єкті, що досліджується, під дією прикладеного навантаження. У ряді випадків необхідно також знати відповідні швидкості та прискорення.

При процесах, що носять вібраційний характер, потрібно встановити частоту, а іноді й фази вібрацій.

**Умови проведення вимірювань.** Процеси, які швидко протікають, можуть бути лише в окремих випадках більш-менш надійно оцінені шляхом візуальних спостережень за показаннями приладів. Як правило, необхідно застосовувати засоби вимірювань з автоматично діючими реєструвальними пристроями.

Перекручування, внесені в одержувані результати інерційними силами частин, що рухаються, приладів і тертям у них, а також впливом інерції і сил тертя у будь-яких з'єднаннях і контактах між

досліджуваним об'єктом і чутливими елементами засобів вимірювань, повинні бути зведені до мінімуму. Це досягається застосуванням електрично та оптично діючих безінерційних систем. При цьому забезпечується:

- 1) можливість одержання досить великих збільшень - у сотні і тисячі разів, неможливих при використанні механічних передач;
- 2) можливість дистанційних вимірювань, що при динамічних завантаженнях нерідко буває важливим і з погляду техніки безпеки.

### **3.5.2. Вимірювання переміщень**

При вимірюваннях динамічних переміщень, що не носять вібраційний характер, раніше застосовували різні самописні прилади механічної дії. У теперішній час все ширше користуються оптичними методами, у тому числі «уповільненою» кінозйомкою, що дозволяє детально розшифровувати хід процесів, які швидко протікають. Особливо перспективна щодо цього стереофотограмметрична зйомка.

Найчастіше при динамічних випробуваннях доводиться визначати параметри *вібраційних* переміщень. Відповідні вимірювання виконуються при цьому розглянутими нижче методами і засобами.

#### **3.5.2.1. Вібрмарки**

Вібрмарки застосовують для прискореної наближеної оцінки розмаху коливань сталого режиму. Вібрмарку у вигляді гострого клина (рис. 88, *a*) викреслюють на папері та наклеюють на об'єкт, що досліджується так, щоб основа клина розташовувалася по напрямку коливань.

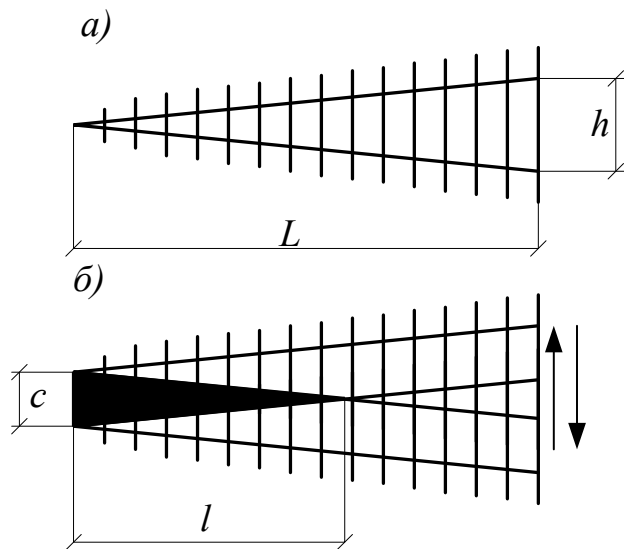


Рис. 88. Вібрмарка:

*a* - у стані спокою; *б* - при вібраціях у напрямках, показаних стрілками

Як відомо, око людини має властивість утримувати зорові враження біля десятої частки секунди. Спостерігачеві, що перебуває поза об'єктом, при частоті близько 500 коливань у хвилину і більше, вібрмарка, яка рухається, буде здаватися роздвоєною - крайні її положення видно чітко, а між ними утвориться розмитий фон з темним клином, що виділяється на ньому (рис. 88, б).

З подібності трикутників (рис. 88, *a* і *б*) впливає співвідношення

$$c = \frac{h}{L} l, \quad (20)$$

де  $c$  - розмах коливань, який підлягає визначенню;

$h/L$  - відношення основи до висоти вібрмарки;

$l$  - висота темного клина, яка вимірюється за рисками вібрмарки з точністю до напіврозподілу.

Для одержання чітких результатів коливання повинні бути стабільні, тому що при мінливих їх розмахах темний клин стає розмитим. При накладенні одночасних коливань у декількох



напрямок зображення як темного клина, так і ділильних рисок розпливається.

Відношення  $h/L$  беруть звичайно 1:10. При вимірюваннях малих переміщень можна доводити  $h$  до 5 мм і брати  $h/L = 1:20$ . Хороші результати дає фотографування вібрмарки з відповідною витримкою.

### 3.5.2.2. Віброметри і їх застосування

Прилади та установки для вимірювання параметрів вібрацій застосовують у різних галузях народного господарства. При випробуваннях споруд, поряд з найбільш досконалими з цих засобів вимірювань, у ряді випадків доводиться вдаватися і до більш простих прийомів. Нижче розглянуті відповідні прийоми з використанням інертної маси.

**Вимірювання вертикальних коливань.** Найбільш простим способом є підвішування інертної маси за допомогою пружини до конструкцій, що розташовані вище (рис. 89, *a*). Відповідна довжина пружини забезпечує частоту власних коливань цієї маси, досить низьку в порівнянні з частотою вібрацій, які спостерігаються.

Для проведення вимірювань при відсутності самописних приладів можуть бути використані індикатори переміщень (ті ж, що і при статичних випробуваннях), що прикріплюються до досліджуваної конструкції або до встановленого на ній важкого стійкого штатива.

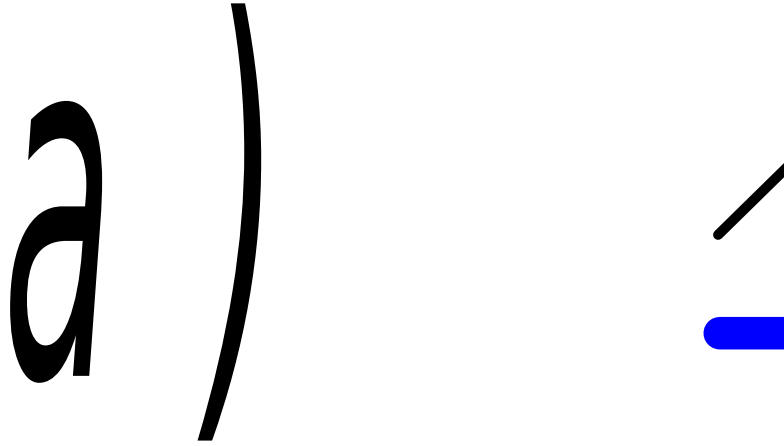


Рис. 89. Пристрої для вимірювання вертикальних коливань:  
*a* – інертна маса, підвішена до пружини; *б* – те ж з важелем;  
*в* – на вигнутих листових пружинах; *1* – інертна маса; *2* – циліндрична пружина; *3* – листові пружини; *4* – важіль; *5* – стояк;  
*6* – підставка приладу; *7* – індикатор

На рис. 89, *б* показаний переносний пристрій з інертною масою, закріпленою на горизонтальному кінці ламаного важеля, який утримується пружиною. Відліки беруть за індикатором. Як показують теоретичні підрахунки, розбіжність точки кріплення пружини до важеля з віссю його горизонтального плеча значно знижує частоту власних коливань системи, що й потрібно за умовами експерименту. Мінімально можлива частота виявляється рівною близько 0,1 гц, оскільки подальше підвищення точки кріплення пружини робить систему нестійкою (стає можливим поворот важеля з вертикальної площини).

На рис. 89, *в* інертною масою є важка обойма, прикріплена до підставки приладу вигнутими листовими пружинами. Індикатор закріплений у гнізді обойми.

**Вимірювання горизонтальних коливань.** На рис. 90,*a* показаний найпростіший прийом вимірювання горизонтальних коливань з використанням інертної маси у вигляді металевої або дерев'яної балки, підвішеної до козлів. Горизонтально орієнтований штифт індикатора або самописного приладу повинен бути впертий у торець горизонтального маятника.

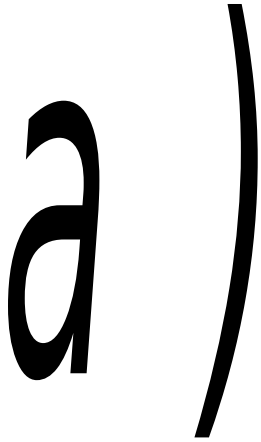


Рис. 90. Пристрої для вимірювання горизонтальних коливань: *a* – інертна маса на підвісках; *б* – горизонтальний маятник з похилою віссю; *в* – те ж із плоскими листовими пружинами (схема дана в горизонтальній проекції); *1* – інертна маса; *2* – підвіски; *3* – упорний штифт; *4* – стояк; *5* – плоскі листові пружини; *б* – підставка приладу; *7* – індикатор

На рис. 90, *б* показаний переносний пристрій з масою *1*, прикріпленою до стояка *4*. Вісь обертання маятника, як видно зі схеми, нахилена до вертикалі під кутом *i*, що знижує частоту

коливань інертної маси. Оскільки кут  $i$  може бути взятий як завгодно малим, то теоретично може бути досягнуте будь-яке зниження частоти. Однак одночасне зменшення відновлювальної сили при виході інертної маси з положення рівноваги встановлює можливий мінімум частоти на рівні 0,6-0,7 Гц. На рис. 90, в показаний високочастотний горизонтальний маятник (для акселерометрів) з двома плоскими пружинами.

При швидких знакозмінних рухах стрілки індикатора на його циферблаті добре видно затемнений сектор (рис.91, а), що дозволяє при сталому режимі коливань визначати їхній розмах. Основною умовою правильності вимірювань є при цьому безперервність збереження контакту між штифтом індикатора і фіксуючим його положення упором; це буде дотримано, якщо на всіх фазах коливань сила інерції штифта, що рухається, не перевершить зусилля, що притискає пружини індикатора. Відповідні межі вимірювань для приладів, що звичайно застосовуються, із ціною поділки шкали в 0,01 мм наведені на рис.91, б.



Рис. 91. Застосування індикаторів для вимірювання коливань: а - визначення розмаху коливань; б - граничні параметри коливань, що вимірюються; 1 - поверхня вібруючого елемента; 2 - шкала індикатора (показана частково); 3 - сектор, що перекривається вібруючою стрілкою індикатора; а - напрямок стрілки в стані спокою

### 3.5.2.3. Віброперетворювачі

Електричні віброперетворювачі виробляють сигнали, які дистанційно передають інформацію про переміщення (лінійні та кутові), за якими спостерігають, їхню швидкість і прискорення.

Розрізняють перетворювачі індукційні, індуктивні, ємнісні, омичного опору і т.д.

На рис. 92, *а* показана найбільш проста схема *індукційного* вимірювального перетворювача, що являє собою соленоїд, у котушці якого при вібраціях магнітного сердечника виникає електрорушійна сила, пропорційна швидкості коливань. Індукційні перетворювачі, застосовувані в численних конструктивних варіантах, прості, надійні і мають достатню чутливість при використанні сильних магнітів.



Рис. 92. Вимірювальні перетворювачі вібрацій:

*а* – індукційний; *б* – індуктивний; *1* – постійний магніт; *2* – котушка; *3* – сердечник; *4* – якір

В *індуктивних* перетворювачах під дією вібрацій міняється індуктивний опір. На рис.92, *б* схематично показаний перетворювач даного типу зі змінним при вібраціях зазором між якорем і сердечником. Такі перетворювачі мають високу чутливість і реагують на зміни в десяті частки мікрона.

Індуктивні перетворювачі інших конструкцій засновані на зміні магнітної проникності їхнього сердечника при коливаннях, використанні струмів Фуко, магнітопружного ефекту і т.д.

Ємнісні перетворювачі являють собою конденсатори з мінливою при вібраціях ємністю. Маючи винятково високу чутливість, вони дозволяють вимірювати різні параметри коливань як лінійні, так і кутові. Однак вони вимагають захисту від сторонніх електричних полів і реагують на зміни вологості й температури навколишнього середовища. Їх застосування доцільне, головним чином, при особливо точних дослідженнях у лабораторних умовах. Вимірювальні перетворювачі, засновані на змінах омичного опору, найбільш універсальні. При випробуванні будівельних конструкцій основним видом даного типу перетворювачів є тензорезистори, які застосовуються в першу чергу при вимірюваннях деформацій. Запис динамічних процесів, які швидко протікають, при застосуванні перетворювачів, що передають електричні сигнали, виконується за допомогою багатоканальних світлопроменевих магнітоелектричних осцилографів. При високочастотних вібраціях застосовують осцилографи з електропроменевою трубкою.

### **3.5.3. Вимірювання деформацій. Контроль частот**

Вимірювання деформацій здійснюється за допомогою тензорезисторів аналогічних за своєю конструкцією та способами кріплення до досліджуваних елементів, що застосовуються при статичних випробуваннях. Прилади ж, засновані на механічному принципі дії, і вимірювальні перетворювачі інших систем через властиві їм недоліки при дослідженнях динамічних деформацій матеріалу будівельних конструкцій у даний час застосовуються дуже рідко.

Сигнали, що виробляються тензорезисторами, записуються на осцилограмах багатоканальних осцилографів. У ряді випадків ефективно використання для даної мети *етюрографів*, які дають можливість розглядати і фіксувати передані на екран осцилографа зображення сигналів від встановлених у різних позиціях тензорезисторів.

Визначення частот зареєстрованих вібрацій при наявності записаних віброграм не викликає при їхній обробці яких-небудь труднощів.

Зручними для цілей контролю є частотоміри, засновані на механічному принципі дії, особливо *багатоязичковий* частотомір (рис. 93) з набором гнучких, консольно закріплених пластинок 2, з різною частотою власних їхніх коливань. На вільних кінцях цих пластинок знаходяться наконечники-показчики 1.

При встановленні частотоміра на вібруючий об'єкт пластинки, частоти яких близькі або точно збігаються з частотою коливань, що сприймаються, починають резонувати, дозволяючи (як показано на рис. 93, б) легко брати відповідні відліки по шкалі приладу. Частоти власних коливань сусідніх пластинок відрізняються один від одного на 1,0-0,5 Гц, а в окремих приладах і на 2 Гц, що у звичайних умовах випробувань цілком задовольняє запропоновані вимоги.

Рис. 93. Багатоязичковий частотомір:

*a* - поздовжній переріз; *б* - поперечний переріз; *в* – вид зверху;  
*1* - наконечники; *2* - сталеві пластинки; *3* - корпус приладу; *4* - шкала частот

## **3.6. Проведення динамічних випробувань**

### **3.6.1. Підготовчі роботи**

Динамічні випробування, як правило, менш трудомісткі і проводяться швидше, ніж випробування статичні, пов'язані з прикладенням і зняттям громіздкого навантаження та тривалим витримуванням його на об'єкті. Але, з іншого боку, при динамічних випробуваннях потрібне забезпечення безвідмовної дії ряду механізмів (джерел динамічних впливів, реєструвальних приладів і т.д.) і чітке дотримання синхронності їх увімкнення і роботи.

Розроблення *програми*, що передбачає всі взаємозалежні деталі майбутніх випробувань, є першим і найбільш важливим попереднім етапом.

Підготовчі роботи – кріплення конструкцій, улаштування риштувань і огорожень, підведення освітлення до місць встановлення приладів і т.д., залишаються в основному тими ж, що й при статичних випробуваннях. Додатково необхідні: пристрої для кріплення вібраційних машин і прикладення ударних навантажень; амортизуючі прокладки, що охороняють елементи споруди від пошкоджень при ударах; пристрої для штучного порушення поштовхів при пропуску рухомого навантаження і т.д.

Заходи щодо техніки безпеки доповнюються встановленням огорожень у механізмів, що створюють динамічні впливи; при пропуску рухомого навантаження на більших швидкостях передбачають заходи для виключення можливості нещасних випадків.

### **3.6.2. Розміщення приладів і проведення випробувань**

Прилади повинні бути розміщені в тих перерізах і точках об'єкта, де найбільш чітко можуть бути виявлені значення обумовлених параметрів. Оскільки при динамічних випробуваннях у ряді випадків застосовуються досить складні прилади (які знаходяться в розпорядженні випробувальних груп звичайно в



обмеженій кількості), істотна можливість кількаразового використання того самого приладу з установленням його в різних позиціях. Деяке збільшення, що викликається цими перестановками, тривалості всієї роботи компенсується скороченням кількості необхідної апаратури та обслуговуючого її кваліфікованого персоналу.

Так само, як і при статичних випробуваннях, найбільш відповідальні вимірювання рекомендується дублювати і застосовувати для зіставлення результатів прилади різного принципу дії. У той же час не треба, без достатньої для цього підстави, збільшувати загальну кількість точок вимірювання, щоб уникнути непотрібного ускладнення як самого випробування, так і обробки його результатів.

**Відмітчики часу.** Для аналізу запису динамічних процесів і зіставлення показань, установлених у різних місцях приладів, необхідно чітко відзначати час вимірювання. Такі оцінки синхронно наносяться на всі діаграми при замиканні слабкострумового ланцюга, у який повинні бути включені пристрої всіх діючих реєструвальних приладів.

Замикання ланцюга виконується або автоматично, наприклад, при натисканні спеціально встановлених педалей при в'їзді та проходженні рухомого навантаження з об'єкта або увімкненням вручну спеціального контакту в потрібний момент часу. Для повторних оцінок, наприклад через кожні 10-30 с, використовують «контактні годинники», які регулярно із заданою частотою замикають ланцюг.

В окремих приладах є пристрої для оцінок часу через задані інтервали від розташованого всередині корпусу приладу, годинникового механізму. Більш надійними (при наявності декількох приладів) є, однак, централізовані сигнали, що гарантують строгу синхронність нанесення оцінок.

При дистанційній реєстрації показань зручне сполучення записів по групі приладів на одній стрічці реєструвального пристрою (наприклад багатоканального осцилографа).

### **3.6.3. Випробування ударним навантаженням**

Ударні випробування прості, вимагають мінімальної підготовки і порівняно нескладного устаткування. Найбільш зручні ударні випробування для порівняльної оцінки динамічних характеристик однотипних конструкцій, наприклад, паль, балок і плит перекриттів. Однак, чим масивніші досліджувані елементи, тим слабша припадає на них дія удару, що вимагає застосування більш чутливої апаратури або збільшення сили удару, чим практично й обмежується можливість застосування даного методу випробувань.

**Обумовлені характеристики.** Частоту та інтенсивність загасання власних коливань, що виникли в результаті удару, визначають шляхом обробки записаних віброграм. Дуже важливо, що значення розглянутих параметрів не залежать від сили удару. Це дає можливість перевіряти й уточнювати отримані дані, шляхом повторного запису при додаткових ударних впливах. Можливе також використання того самого приладу з установленням його в різних позиціях.

При ударних випробуваннях можуть бути досліджені також швидкості поширення ударних хвиль, встановлена форма коливань (що, однак, зручніше робити вібраційним шляхом), а також досліджена чутливість споруди до дії ударів, наприклад для з'ясування можливості роботи на даному об'єкті устаткування, яке підлягає встановленню.

Якщо для порівняльних оцінок параметрів однотипних конструкцій потрібне уточнення тільки частот власних коливань, то замість самописних приладів можуть бути використані багатоязичкові частотоміри, що значно спрощує проведення випробувань.

### **3.6.4. Випробування вібраційним навантаженням**

При випробуваннях вібраційним навантаженням у досліджуваних конструкціях збуджуються *змушені* коливання в широкому діапазоні частот, включаючи зону резонансу.

Вібраційні випробування дозволяють найбільш повно і всебічно виявити динамічні характеристики об'єктів, що обстежуються. Але, з іншого боку, для їх проведення потрібні спеціальні вібраційні машини та наявність можливості кріплення і пуску їх на об'єкті.

В окремих, порівняно рідких випадках, як джерело силових впливів може бути використане встановлене на об'єкті, що випробовується, динамічно неврівноважене технологічне устаткування при можливості зміни частоти обертів або зворотно-поступальних ходів частин механізмів, що рухаються. Однак попередньо необхідно уточнювати (що часто досить складно) фактичні значення динамічних впливів устаткування; ці труднощі зникають при використанні заздалегідь вивірених вібраційних машин.

**Обумовлені характеристики.** При вібраційних випробуваннях одержують «резонансні криві», що дають значення обмірюваних величин (переміщень, деформацій і т.д.) у функції частот збуджуючих сил.

При обробці цих кривих можуть бути отримані частоти власних коливань досліджуваних елементів та інтенсивність загасання виниклих коливань.

При підтримці строго стабільного режиму роботи вібраційної машини реєструвальні прилади можуть бути використані неодноразово, з перестановкою їх з місця на місце. При цьому для визначення переміщень можна користуватися не тільки записуючими приладами (що бажаніше), але й приладами з візуальним відліком.

Визначення частоти власних коливань можна робити навіть без установаження яких-небудь вимірювальних приладів на самому об'єкті, оскільки момент резонансу може бути чітко виявлений за положенням «піка» на кривій витрати енергії вібраційної машини.

**Особливості вібраційних випробувань.** При поступовій зміні числа обертів вібраційної машини доводиться зважати на можливість «зривів» частот (рис. 94).

На рис. 94, *а* показана залежність між числом обертів  $\omega$  вібраційної машини і потужністю  $W$ , яку вона споживає. На діаграмі чітко видно пік резонансу з максимумом у точці 1, що відповідає частоті  $\omega_1$ .

*а*)

Рис. 94. До зривів резонансної кривої:

*а* - загальний обрис кривої витрати енергії; *б* - розрив безперервності при прямому ході; *в* - те ж при зворотному ході;  $W$  – енергія, яка споживається;  $\omega$  - частота

На рис. 94, *б* показаний хід експерименту при поступовому зростанні швидкості обертання. При зміні потужності на валу електродвигуна вібромашини від нуля до  $W_1$  швидкість обертання плавно зростає до  $\omega_1$ . Однак при подальшому найнезначнішому збільшенні  $W$  швидкість обертання різко зростає до  $\omega_2$ , що відповідає точці 2 кривої. Криволінійна ділянка 1 - 2 графіка, показана пунктиром, виявляється виключеною з експерименту.

Зворотна картина (рис. 94, *в*) спостерігається при поступовому зменшенні швидкості обертання. Стрибок з'являється в цьому випадку між точками 3 і 4 кривої і виключеним виявляється весь пік резонансу.

Розглянуті явища обумовлюються тим, що електродвигуни вібромашин є одночасно джерелом енергії і збудником частоти з певним для кожного двигуна зв'язком між даними характеристиками. Ці дві функції повинні бути розділені, що здійснено, наприклад, у розглянутому вище гідропульсаторі з додатковим обертанням його центральної осі.

При використанні звичайного устаткування експеримент проводять спочатку зі зростанням, а потім зі зменшенням швидкості обертання. Таким чином, вдається шляхом накладення результатів, отриманих при прямому та зворотному ходах, побудувати майже весь обрис резонансної кривої за винятком її крутої «вихідної вітки»  $I^{-3}$ , що не знижує, однак, загальної цінності одержуваних результатів.

### **3.6.5. Випробування експлуатаційним навантаженням**

Основною перевагою розглянутих випробувань є можливість одержання даних про дійсну роботу як усієї споруди в цілому, так і окремих її елементів в експлуатаційних умовах. У випадку, коли споруда, що досліджується, вже експлуатувалася або повністю підготовлена до використання, такі випробування не вимагають складної підготовки і можуть бути виконані в найкоротший термін.

До недоліків таких випробувань належать:

- різноманіття, а в ряді випадків і невизначеність виникаючих силових впливів і труднощі виділення впливу окремих факторів;
- труднощі, а іноді й практична неможливість повторення випробувань з точним відтворенням тих же умов завантаження, наприклад, при повторних пропусках безрейкового транспорту і т.п.

При випробуванні експлуатаційним навантаженням визначають такі характеристики:

- значення переміщень, деформацій і зусиль, що виникають в елементах споруди під дією експлуатаційного навантаження;
- визначення частоти власних коливань за настанням стану резонансу і за частотою загасаючих власних коливань, що виникають після різкого вимикання або зупинки дії навантажень;

- неприпустимі (тобто надмірні переміщення, деформації та напруги) режими роботи встановленого устаткування або швидкості пропуску рухомого навантаження.

Особливості випробувань експлуатаційним навантаженням. При дослідженнях динамічних впливів від стаціонарно встановленого устаткування необхідно, крім спостережень при нормальному режимі його роботи, проведення таких же вимірювань при тяжких умовах: прискореному пуску, різкому гальмуванні і т.д.

При випробуваннях *рухомим навантаженням* повинні бути передбачені: найбільш не вигідне розташування навантаження, що пропускається (тобто, що викликають найбільші зусилля в досліджуваному об'єкті), критичні її швидкості (відповідні стану резонансу), різке гальмування і т.д. При пропуску безрейкового транспорту повинні бути, крім того, відтворені вертикальні удари, можливі при наявності нерівностей полотна (що імітується спеціально покладеними підкладками), і горизонтальні впливи при різкій зміні напрямку руху машин (наприклад, об'їзд на швидкому ході перешкоди, встановленої на проїжджій частині).

Для запобігання можливості нещасних випадків, пов'язаних з пропуском рухомого навантаження на більших швидкостях, повинні бути вжиті запобіжні заходи: встановлені огороження, попереджувальна сигналізація і т.д.

### **3.7. Обробка результатів динамічних випробувань**

Обробка результатів динамічних випробувань складається з двох основних операцій:

- 1) загального аналізу досліджуваних процесів;
- 2) встановлення числових значень параметрів, що характеризують ці процеси.

Експериментальні дані, які підлягають обробці, можуть при цьому мати форму графіків, записаних приладами, як правило, у функції часу, і дискретних (тобто які перериваються у часі) цифрових відліків або по-різному зафіксованих оцінок. Графіки, побудовані у функції часу, є найбільш зручною та наочною формою

при дослідженні нестационарних процесів, що змінюються в часі. При стаціонарних процесах графіки не настільки обов'язкові (вони корисні для контрольного перегляду) і можуть бути заміряні рядом дискретних вимірювань.

### **Етапи обробки:**

1) зареєстровані складні процеси розділяють на більш прості складові. Так, наприклад, коливання будь-яких складних обрисів прийомами *гармонійного аналізу* можуть бути подані у вигляді сум простих гармонійних коливань;

2) визначають числові значення параметрів, що характеризують досліджувані процеси;

3) отримані дані, якщо буде потреба, піддаються подальшій обробці. Так, наприклад, шляхом диференціювання та інтегрування, що звичайно виконується за допомогою спеціальних пристроїв, за вимірними переміщеннями визначають швидкості та прискорення і навпаки; шляхом зіставлення одночасно отриманих даних виявляють форми коливань і т.д.;

4) на підставі зробленої обробки дають загальну оцінку динамічної роботи об'єкта, що досліджується.

**Способи проведення обробки.** Розглянуті вище етапи аналізу динамічних процесів широко застосовуються у будь-яких техніки: у машинобудуванні, літакобудуванні, при дослідженнях сейсмічних процесів, у геофізичній розвідці і т.д.

Обробка одержуваної інформації в значній мірі або повністю автоматизована. Для цього мети застосовують спеціальні прилади і їх комплекси.

Результати вимірювань можна переносити на ЕОМ для подальшої їх обробки. Також виконується передача електричних сигналів від вимірювальних приладів безпосередньо на ЕОМ.

### **3.7.1. Графіки динамічних процесів**

**Графіки, побудовані у функції часу,** є найпоширенішим видом документації динамічних випробувань.

При користуванні механічними самописними приладами на паперовій стрічці приладу, що рухається, викреслюється звичайно лише одна діаграма (рис. 95). Хоча швидкість руху стрічки може регулюватися, для точного визначення масштабу часу необхідні додаткові оцінки.

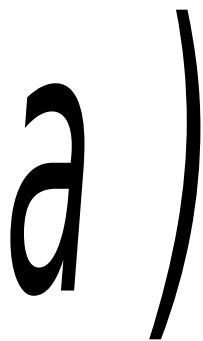


Рис. 95. Зразки записів механічного самописа:

*a* - зі східчастими оцінками часу; *б* - з оцінками, нанесеними вібруючим пером відмітчика часу; *1* - паперова стрічка; *2* – запис основної діаграми; *3* і *4* - відмітки, нанесені «пером часу»; *T* - інтервали східчастих оцінок; *t* - період коливань «пера часу»

Такі оцінки наносяться звичайно «пером часу». При розімкнутому електричному колі, приєднаному до приладу, перо часу креслить на стрічці пряму лінію. При замиканні ж ланцюга за допомогою контактних годинників або іншим способом перо підтягується до магніту всередині корпусу приладу і фіксує на стрічці відмітку у вигляді невеликої сходинки (рис. 95, *a*). Частоту нанесення таких відміток (через 1-2 *c* або інші інтервали) призначають у відповідності до швидкості руху стрічки.



На рис. 95, б показаний інший вид відміток для більших швидкостей. Відмітки наносяться пером часу, яке утримується гнучкою пластинкою; відриваючись при розмиканні ланцюга від магніту, таке перо креслить на стрічці загасаючу криву власних коливань з частотою, наприклад, в 25 або 50 Гц.

При записах, виконуваних за допомогою *осцилографів*, на їхній фотострічці, що рухається, може одночасно фіксуватися ряд діаграм (до 8, 12 і навіть 24). Показання групи приладів на одній стрічці дають можливість надійного ув'язування отриманих результатів у часі.

Для визначення масштабу часу може бути використаний один із записів коливання зі строго заданою частотою (рис. 96, а); застосовуються також оцінки часу у вигляді поперечних ліній, засвічуваних на фотострічці (рис. 96, б), наприклад спалахами неонові лампи.

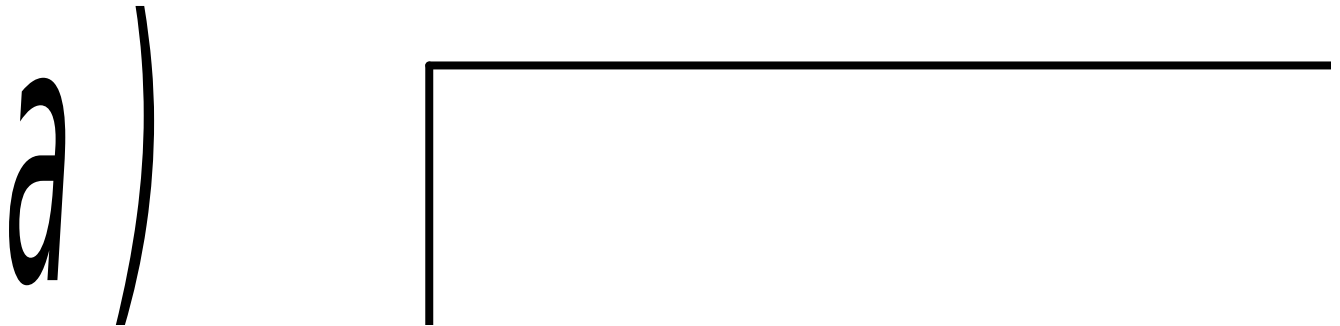


Рис. 96. Зразки осцилограм:

*a* - масштаб часу визначається по запису коливань заданої частоти; *б* - масштаб часу дається оцінками у вигляді поперечних ліній; *1* - стрічка або плівка; *2* - записані осцилограми; *3* - коливання заданої частоти; *4* - поперечні лінії масштабу

**Епюрограми** дають сполучені умовні зображення сигналів, переданих одночасно рядом приладів на екран світлопроменевого осцилографа-епюрографа конструкції В.Л. Бурнштейна.

Як приклад на рис. 97, *а* наведена епюра розподілу поздовжніх деформацій по висоті балки, що згинається. Кожному тензорезистору, встановленому в розглянутому перерізі (рис. 97, *б*), відповідає на епюрограмі свій сигнал з довжиною, пропорційною інтенсивності деформації, що вимірюється.

Рис. 97. Епюрограма:

*а* - екран епюрографа; *б* - балка, що випробовується; *1* – контур екрана; *2* – масштабна сітка; *3* – світлові сигнали; *4* – тензорезистори, наклеєні на боковій поверхні балки

По мірі змінення значень обумовлених величин безупинно міняються і сигнали на екрані епюрографа, але в кожний окремо взятий момент за цими сигналами можуть бути зроблені дискретні відліки.

Реєстрація епюрограм при динамічних процесах виконується на фотознімках з мінімальною витримкою й точною оцінкою моменту зйомки. Можлива також кінозйомка екрана епюрографа з наступною обробкою окремих найбільш характерних кадрів.

### **3.7.2. Визначення параметрів коливальних процесів**

### 3.7.2.1. Визначення розмахів і амплітуд коливань

При заданому масштабі вимірювань розмах визначається як різниця значень екстремальних ординат коливань за розглянутий період (рис. 98, *a*).

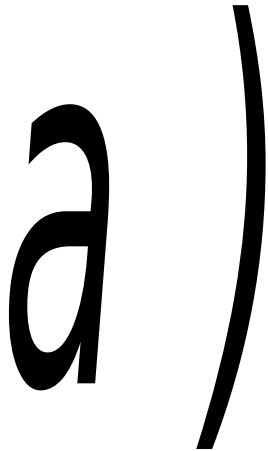


Рис. 98. Вимірювання розмахів і амплітуд коливань:  
*a* - фіксація розмаху *A*; *б* - те ж амплітуд *a*; *1* - нульова лінія, записана до нанесення удару; *2* - те ж після загасання коливання; *3* - ділянка нульової лінії, побудована при обробці діаграми

Для вимірювання амплітуд до початку випробувань на графіку повинна бути нанесена «нульова лінія», що відповідає показанню записуючого приладу в стані рівноваги; після закінчення випробування нульова лінія повинна бути нанесена для перевірки (рис. 98, *б*). На графіках значної довжини положення нульової лінії остаточно встановлюють при аналізі діаграми.

Для автоматизації трудомістких вимірювань, пов'язаних з ручною обробкою графіків, є так звані «обчислювачі» віброграм, де вимірювання ординат роблять за допомогою чутливих фотоелементів з автоматичним, точним приведенням до середини товщини лінії запису. Результати вимірювань одержують у вигляді дискретних відліків на стрічках для подальшої обробки їх на ЕОМ.

### 3.7.2.2. Вимірювання періодів коливань

При заданому масштабі часу визначення періодів коливань не викликає труднощів. При наявності строго стабільного режиму для зменшення похибок вимірювань, уздовж осі абсцис, доцільно робити на ділянці, що включає кілька циклів коливань, з обчисленням за отриманим результатом тривалості одного періоду (рис. 99).

Рис. 99. Визначення періоду сталих коливань:

1 - запис пера часу; 2 - оброблювана діаграма; 3 – відстань, мм, між записаними відмітками часу при заданому інтервалі в  $\tau$ , с;  
 $x$  - заміряна за графіком довжина запису  $n$  повних коливань;

$T = \frac{x \times \tau}{n \times \xi}$  - тривалість одного періоду вимірюваних коливань, с

### 3.7.2.3. Перехід від переміщень до швидкостей та прискорень і назад

Переміщення, швидкість та прискорення пов'язані між собою диференціальними залежностями.

Операції переходу можуть бути виконані графічно, шляхом аналітичної обробки та із застосуванням приладів. Усі ці способи докладно розглядаються в спеціальній літературі.

Найбільш простим є випадок сталих гармонійних коливань з амплітудою  $a$  та частотою  $\omega$ , які описуються рівнянням

$$y = a \times \sin \omega t . \quad (21)$$

Перехід від *амплітуд*, що вимірюються, до максимальних *прискорень* може бути виконаний шляхом найпростішого перерахування, оскільки прискорення

$$\ddot{y} = -a \times \omega^2 \times \sin \omega t . \quad (22)$$

Із зіставлення формул (21) і (22) знаходимо необхідне співвідношення у вигляді

$$|\max \ddot{y}| = a \times \omega^2 . \quad (23)$$

Аналогічно для визначення максимальної *швидкості* одержуємо

$$|\max \dot{y}| = a \times \omega . \quad (24)$$

#### 3.7.2.4. Визначення коефіцієнта поглинання

**Визначення по загасанню вільних коливань.** При наявності розгорнутого в часі графіка загасаючих коливань (рис. 100) знаходять логарифмічний декремент  $\delta$ , пов'язаний з  $\psi$  залежністю

$$\psi = 2\delta . \quad (25)$$

Логарифмічний декремент підраховують за формулою

$$\delta = \ln \frac{a_n}{a_{n+1}} , \quad (26)$$

де  $a_n$  і  $a_{n+1}$  - амплітуди  $n$  і  $n+1$ , які вимірюються на графіку циклів коливань.

Рис. 100. Визначення логарифмічного декременту коливань

Незважаючи на принципову простоту даного методу, при практичному його застосуванні доводиться зіштовхуватися з такими труднощами:

1) загасання коливань у більшості випадків відбувається настільки повільно, що сусідні амплітуди графіка  $a_n$  і  $a_{n+1}$  досить мало відрізняються один від одного. Для збільшення цієї різниці з амплітудою  $a_n$  зіставляється амплітуда більш віддаленого циклу –  $n + m$  (рис. 100).

Підрахунок ведеться в такому випадку за формулою

$$\delta = \frac{1}{m} \ln \frac{a_n}{a_{n+m}}, \quad (27)$$

яка дає усереднене значення декременту коливань по довжині взятої ділянки розгорнення, що містить  $m$  циклів коливань;

2) значення  $\delta$  не залишаються чітко стабільними по довжині діаграми. Декремент коливань варто тому визначати не для однієї, а для декількох ділянок по довжині графіка з віднесенням одержаних значень  $\delta$  до середини кожної ділянки. За отриманими даними будують потім графіки, що являють собою залежність  $\psi$  від амплітуд динамічних напруг;

3) розглянутий спосіб виявлення  $\psi$  за віброграмами загасаючих коливань виявляється важко застосовним при складному обрисі діаграм, обумовленому накладенням один на одного загасаючих коливань різних частот. У таких випадках доцільніше визначати  $\psi$  за резонансними кривими.

**Визначення  $\psi$  за резонансними кривими.** За вимірюваннями, зробленими при змушених коливаннях у зоні резонансу, коефіцієнт поглинання може бути визначений декількома способами. Із числа, що рекомендуються, розглянемо два способи, які мають найбільше практичне значення при випробуваннях натурних об'єктів.

1. *Визначення  $\psi$  за кривою витрати потужності при резонансі.* На рис. 101 наведені криві витрати енергії  $W$  при роботі відцентрових вібраційних машин для двох значень  $\psi$ . Початкова та кінцева ділянки цих кривих з'єднані пунктирною лінією  $OA$ , що виділяє обрис піка резонансу.



Рис. 101. Визначення  $\psi$  за резонансною кривою витрати потужності:  
 1 - пік резонансу при великому коефіцієнті поглинання;  
 2 - те ж при малому

Як показують відповідні підрахунки,  $\psi$  може бути визначено за формулою:

$$\psi = \pi \frac{n_2 - n_1}{n_0}, \quad (28)$$

де  $n_0$  - резонансна частота;

$n_1$  і  $n_2$  - частоти точок  $C$  і  $D$  резонансної кривої, що лежать на перетинанні цієї кривої з відрізком  $CD$ , проведеним паралельно  $OA$  через середину висоти  $W_0$  піка резонансу.

2. Визначення  $\psi$  за шириною резонансного амплітудного піка.  
 На рис. 102 по осі ординат відкладена амплітудна крива переміщень або деформацій, зафіксованих будь-якими приладами, встановленими на об'єкті, що випробовується. Обрис кривої відповідає змушеним коливанням, які викликаються роботою відцентрової вібраційної машини. По осі абсцис відкладена безрозмірна величина  $n/n_0$ , рівна відношенню частоти обертів машини до резонансної частоти.

Відповідно до підрахунків, коефіцієнт поглинання може бути визначений за формулою

$$\psi = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} b(1 - b^2), \quad (29)$$

де  $b$  - ширина петлі резонансу, яка вимірюється за графіком на половині її висоти.

При крутому обрисі піка резонансу  $b^2$  значно менше одиниці і для практичних підрахунків цією величиною можна знехтувати, тоді

$$\psi = \frac{2\pi}{\sqrt{3}} b. \quad (30)$$

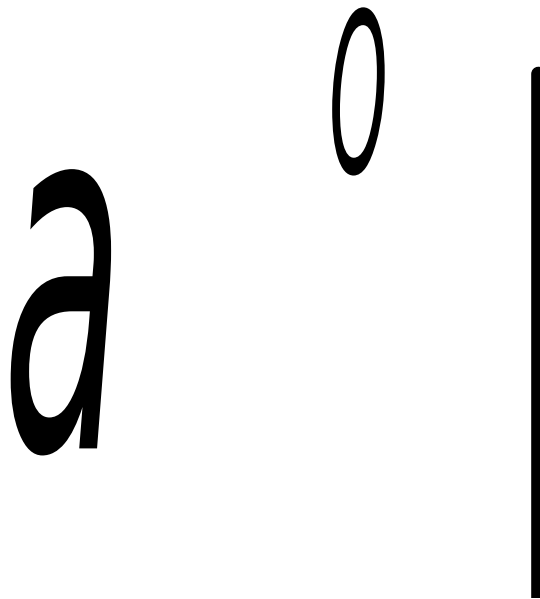


Рис. 102. Визначення  $\psi$  по ширині резонансного амплітудного піка

### 3.7.3. Визначення інших динамічних характеристик

#### 3.7.3.1. Форми коливань

Для виявлення форм коливань необхідний одночасний запис динамічних переміщень у ряді точок системи, що коливається, з подальшим графічним аналізом отриманих результатів.



При сталих, строго стабільних коливаннях можна користуватися також вимірюваннями, отриманими за допомогою приладів, що переставляються (у тому числі і з візуальним відліком), за умови правильної оцінки фаз коливань.

Як приклад на рис. 103 наведені дві можливі форми коливань того самого стержня. Як видно з рис. 103, *a* і *б*, абсолютні значення амплітуд у перерізах *I* і *II* мало відрізняються один від одного; фази ж коливань у цих перерізах на рис. 103, *a* збігаються, а на рис. 103, *б* виявляються протилежними.

Рис. 103. Визначення форми коливань:

*a* і *б* - обриси пружної лінії системи, що коливається; *в* - епюри переміщень допоміжної балки *I* при коливаннях форми «*a*»; *г* - те ж при коливаннях форми «*б*»

Для виявлення фактичної форми коливань можна скористатися, наприклад, допоміжною балкою 1, встановленою на вібруючому елементі (рис. 103, а). При збігу фаз коливань в перерізах I і II показання вимірювача амплітуд (або іншого приладу), який переміщується вздовж балки 1, будуть залишатися майже незмінними (відповідна еюра обміряних амплітуд показана на рис. 103, в). У випадку ж різниці фаз одержані відліки будуть мінятися по довжині балки, зростаючи до її країв від деякої «нульової» точки в проміжному перерізі III (рис. 103, з).

Для виявлення фаз при згинальних коливаннях користуються також тензорезисторами, які наклеюють до початку випробування в розглянутих перерізах. Обробка записаних з їхньою допомогою віброграм деформацій дає можливість переконатися в збігу або зрушенні фаз коливань у перерізах, що зіставляються.

Цей спосіб може бути застосований і в конструкціях більш складного обрису.

### 3.7.3.2. Інші дані

При динамічних розрахунках у ряді випадків користуються значенням *наведеної маси*, що обчислюється за відповідними формулами. У найпростіших системах значення наведеної маси можна визначити і за експериментальними даними. Так, наприклад, для простої балки наведена маса  $m$  пов'язана з циклічною частотою власних коливань  $\omega$  співвідношенням

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}, \quad (31)$$

де  $K$  – коефіцієнт твердості балки.

Для знаходження  $m$  вимірюємо двічі, поміщаючи посередині прогону балки додаткові маси  $m_1$  і  $m_2$ , рівні 10 – 20 % від  $m$ .

Відповідно до формули (31):

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{m + m_1}}, \quad (32)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{K}{m + m_2}}. \quad (33)$$

Після виключення  $K$  зі співвідношень (32) і (33) отримуємо значення  $m$  у вигляді

$$m = \frac{m_2 \omega_2^2 - m_1 \omega_1^2}{\omega_2^2 - \omega_1^2}. \quad (34)$$

*Інерційні сили*  $Q_{\text{ін}}$ , що виникають в елементах конструкцій, визначаються співвідношенням

$$Q = -m \times \ddot{y}, \quad (35)$$

де  $\ddot{y}$  - прискорення маси  $m$ .

Значення цих прискорень можуть бути знайдені експериментально за показниками акселерометрів або за даними опрацювання віброграм переміщень.

У тих випадках, коли значення наведених мас можуть бути встановлені з необхідною точністю, досить визначити  $\ddot{y}$  лише для точок приведення.

У більш складних випадках, де метод приведення мас не може бути використаний, рекомендується такий прийом: конструкція з урахуванням її конфігурації і діючих на неї навантажень, розбивається на ряд найпростіших елементів з масами  $m_1$ ,  $m_2$  і т.д.; визначивши експериментальним шляхом прискорення центрів ваги цих мас, знаходимо за формулою (35) прикладені до них інерційні сили.

*Динамічні напруги*  $\sigma_{\text{дин}}$  можуть бути знайдені розрахунковим шляхом за діючими динамічними навантаженнями та уточнених значеннями інерційних сил.

Отримані значення  $\sigma_{\text{дин}}$  у межах пружної роботи матеріалу можуть бути перевірені за показниками тензорезисторів та інших приладів, що вимірюють деформації, за умови, якщо динамічний модуль пружності матеріалу відомий.

Вищенаведені приклади не вичерпують усіх питань, що виникають при обробці результатів динамічних випробувань, але дають необхідне уявлення про них у межах поставленого завдання.

### **3.8. Оцінка та використання результатів динамічних випробувань**

Найбільш повне уявлення про умови роботи досліджених конструкцій дає зіставлення експериментально визначених значень динамічних параметрів (частот коливань, значень переміщень, деформацій і т.д.) з відповідними йому теоретичними за умови, що в розрахунках відбиті необхідні дані, які характеризують фактичний стан об'єкта, що перевіряється.

При наявності нормативних вимог, наприклад відносно значень параметрів вібрацій, що не перешкоджають роботі прецизійних верстатів, і отримані фактичні значення не повинні перевищувати допустимі.

Експериментально визначені частоти вільних коливань елементів конструкції дозволяють уточнювати вимоги до режиму експлуатації (відносно дії встановленого устаткування, швидкості пропуску рухомого навантаження і т.д.) для попередження можливості резонансу. Якщо ж резонанс і пов'язані з ним небажані явища вже існують, то отримані дані про частоти власних коливань використовують при розробленні необхідних захисних заходів.

При динамічних випробуваннях однотипних конструкцій і елементів порівняння частоти та інтенсивності загасання коливань дозволяє давати порівняльну оцінку стану і працездатності об'єктів.

Необхідно відзначити, що при проведенні через певні інтервали повторних випробувань тієї самої споруди, порівняння одержаних динамічних характеристик дозволяє (за зменшенням частоти власних коливань окремих елементів і всієї конструкції в цілому, прискоренням загасання коливань, зміною обрису піка резонансу при вібраційних випробуваннях і т.д.) давати об'єктивну оцінку зміні стану споруди, що перевіряється. Така можливість, що не вимагає значних витрат часу і праці та не порушує умов роботи об'єктів, що перевіряються, є однією з найцінніших особливостей динамічних випробувань.

## Контрольні запитання для самоперевірки

1. Які види динамічних впливів існують?
2. Які коливання виникають в елементах конструкцій під дією динамічного навантаження?
3. З точки зору зв'язку між коливаннями та викликаючими їх динамічними впливами, які види коливань розрізняють?
4. Чи існує різниця між динамічним і статичним модулями пружності?
5. Що є кількісною характеристикою внутрішнього тертя?
6. З якою метою проводяться повторні динамічні випробування?
7. Види динамічних навантажень.
8. У яких випадках застосовуються горизонтальні та похилі удари?
9. У яких випадках застосовуються вібраційні машини спрямованої дії з нерівноваженими масами?
10. Які прилади використовують для прискореної, наближеної оцінки розмаху коливань сталого режиму?
11. Для вимірювання яких коливань використовуються віброметри?
12. Які види віброперетворювачів існують?
13. Якими приладами виконується контролювання частот?
14. Як виконується розміщення приладів при проведенні динамічних випробувань?
15. Недоліки при проведенні випробувань експлуатаційним навантаженням.
16. Які характеристики визначають при випробуванні експлуатаційним навантаженням?
17. Які етапи обробки результатів динамічних випробувань існують?
18. Якими диференціальними залежностями пов'язані між собою переміщення, швидкість та прискорення?
19. Якими способами може бути визначений коефіцієнт поглинання?

## **4. ОСНОВНІ ВИЗНАЧЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТУНЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ПРОЦЕСІ ЇХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Завдання визначення фактичної несучої здатності тунельних споруд ділянок, які експлуатуються, виникають у процесі ухвалення рішення про доцільність і допустимість змін умов експлуатації цих ділянок. Неминучість змін умов функціонування об'єктів метрополітену виникає при зведенні нових об'єктів міської інфраструктури в зоні проходження тунелів діючого метрополітену. У цьому випадку можуть змінюватися величина та форма силових впливів на тунелі, властивості ґрунтів, що оточують тунель, умови обводненості тунелів. Може також змінюватися й екологічна обстановка навколо тунелів: наприклад, можуть виявитися різні види агресивного впливу на конструкції та персонал.

Потреба у визначенні фактичної несучої здатності тунельних конструкцій, які знаходяться в експлуатації, виникає також при ухваленні рішення про необхідність, обсяги та терміни проведення ремонтно-відбудовних робіт на дефектних ділянках метрополітену.

Практика останнього десятиліття експлуатації тунельних споруд метрополітену виробила таку найбільш доцільну етапність визначення фактичної надійності тунельних конструкцій:

- встановлення теоретичних запасів міцності конструкції;
- натурне обстеження технічного стану тунельних конструкцій і заобробного простору;
- визначення фактичних запасів міцності конструкції розрахунковим шляхом на основі результатів натурального обстеження конструкцій і породного масиву.

### **4.1. Визначення теоретичних (проектних) коефіцієнтів запасу міцності конструкцій**

Оцінка початкової (теоретичної) надійності тунельних конструкцій виконується на основі проектно-технічної документації, що включає такі матеріали:

- інженерно-геологічні умови закладення ділянки тунелю;
- робочі креслення та пояснювальну записку до них, прийняті навантаження і впливи, розрахункові схеми та статичні розрахунки.

Оскільки, як правило, аналізується стан тунелів метрополітену, запроектованих і побудованих більше 20 років тому, необхідно для даних тунелів переглядати розрахункові положення, засновані на застарілих і не діючих у даний час нормах.

Статичні розрахунки оброблення тунелів доцільно здійснювати за допомогою сучасних програм з використанням методу кінцевих елементів.

За отриманими в результаті статичного розрахунку значеннями згинальних моментів і нормальних зусиль обчислюються:

а) для конструкцій з чавунних тюбінгів: напруги в найнебезпечніших перерізах за формулами:

*Для перерізів з позитивним моментом*

$$\sigma^+ = \frac{N}{F_H} + \frac{M}{W_{\max}} \quad \sigma^- = \frac{N}{F_H} - \frac{M}{W_{\min}}; \quad (36)$$

*Для перерізів з негативним моментом*

$$\sigma^+ = \frac{N}{F_H} + \frac{M}{W_{\min}} \quad \sigma^- = \frac{N}{F_H} - \frac{M}{W_{\max}}, \quad (37)$$

де  $\sigma^+$  і  $\sigma^-$  - максимальні напруги стиснення та розтягування відповідно;

$M$  - максимальний згинальний момент (позитивний або негативний);

$N$  - нормальне зусилля в перетині;

$F_H$  - площа поперечного перерізу;

$W_{\max}$ ,  $W_{\min}$  - максимальний і мінімальний момент опору перерізу відповідно;

б) для залізобетонних конструкцій: коефіцієнти запасу міцності в найбільш напружених перерізах.

У відповідності до СНиП II-23-87 "Стальные конструкции" оброблення з чавуну СЧ-20 мають такі граничні (розрахункові) характеристики:

$$R_{\text{чав. розтягнення}} = 650 \text{ кгс/см}^2,$$
$$R_{\text{чав. стискання}} = 2000 \text{ кгс/см}^2.$$

Коефіцієнти запасу міцності розрахункових перерізів для чавунних конструкцій визначаються як відношення розрахункових опорів чавуну до відповідних напруг в перерізах

$$K_{\text{зан}} = \frac{R}{\sigma_{\text{max}}}, \quad (38)$$

де  $K_{\text{зан}}$  - коефіцієнт запасу міцності;

$R$  -  $R_{\text{чав. розтягнення}}$  або  $R_{\text{чав. стискання}}$ ;

$\sigma_{\text{max}}$  -  $\sigma^+$  або  $\sigma^-$ .

Як для чавунних, так і для залізобетонних обробок тунелів гранично припустимий мінімальний коефіцієнт запасу становить 1,0.

Якщо в якому-небудь з розрахункових перерізів конструкції коефіцієнт запасу менше 1,0 - це означає, що конструкція не має достатньої експлуатаційної жорсткості.

## 4.2. Натурне обстеження технічного стану конструкцій

Програма натурального обстеження тунельної ділянки містить у собі:

- ознайомлення з виконавчою та технічною документацією;
- оцінку фактичного стану бетону по товщині конструкції шляхом вибурювання та дослідження кернів;
- оцінку ступеня корозії арматури та інших металевих елементів конструкцій;
- визначення геометричних параметрів конструкції (еліптичність, уступи між блоками та між кільцями оброблення);



- докладний огляд внутрішньої поверхні оброблення з фіксацією (зрисовуванням) усіх видів пошкоджень. При виявленні тріщин на них варто встановлювати вимірювальні бази або гіпсові маяки;
- проведення хімічних аналізів і електромеханічних вимірювань;
- визначення положення рейкової колії в плані та профілі;
- проведення маркшейдерської зйомки положення оброблення в плані та профілі.

Визначення положення рейкової колії в плані та профілі виконується за допомогою тунельного шаблону (рис. 104), по реперах. Дані вимірювань заносяться до спеціальних журналів та наносяться на спеціальні таблички, які встановлені над реперами (рис. 105).



Рис. 104. Визначення положення рейкової колії в тунелі за допомогою тунельного шаблону

Геометричні параметри обстежуваного оброблення тунелю та його положення в плані і профілі визначаються трьома

незалежними методами з метою підвищення вірогідності результатів вимірювань.



Рис. 105. Таблички, на яких фіксують положення рейкової колії в плані та профілі

Такими методами є:

- знімання поперечних перерізів тунельного оброблення пристроєм "Планшет";

- високоточні вимірювання діаметрів тунельного оброблення ноніусною рулеткою;

- інструментальні (маркшейдерські) вимірювання деформацій оброблення тунелю, його положення в плані та профілі.

Пристрій "Планшет", розроблений в ЦНІС та прийнятий на "озброєння" тунелеобстежувальними станціями, дозволяє одержувати не тільки докладні відомості про стан оброблення на даний момент (еліптичність, уступи, розкриття стиків між блоками), але й простежити за характером розвитку змін їх стану в часі.

Пристрій "Планшет" фіксує декартові координати центрів кривизни кожного елемента (блока, тьюбінга) оброблення та

вимірює полярні координати розташування кожного з цих елементів (напрямні кути нормалей до контуру блоків і радіуси-вектори крайніх точок блоків).

Шляхом переходу від системи полярних координат у декартові координати здійснюється графоаналітична побудова контуру кільця оброблення довільного обрису.

Точність вимірювання радіусів-векторів пристроєм "Планшет" становить  $\pm 10$  мм. Тому даний метод вимірювання використовується для одержання якісної картини зміни в часі геометричної форми і розмірів внутрішніх обрисів тунельних конструкцій.

Для кількісної оцінки поперечних розмірів тунельних конструкцій використовується високоточна ноніусна рулетка з постійним натягом стрічки, що має точність вимірювання 0,1 мм.

У цьому випадку контроль виконується шляхом проведення високоточних вимірювань по фіксованих точках діаметрів тунельного оброблення: горизонтальних, вертикальних, правого і лівого "косих" діаметрів.

Інструментальні (маркшейдерські) спостереження за станом тунельних конструкцій мають на меті одержання картини планового та висотного положення тунелю в породному масиві, а також картини деформацій оброблення.

Ці роботи містять у собі: нульовий цикл із закладенням полігонометричних знаків (ПЗ) і деформаційних реперів (ДР) у бетон зворотного склепіння (лоток) тунелів і закладкою деформаційних марок (ДМ) у склепіння тунелів.

Самі інструментальні спостереження передбачають:

- геометричне нівелювання II класу по ПЗ, ДР і ДМ з визначенням абсолютних висот;

- вимірювання горизонтальних кутів і довжин ліній по ПЗ (підземна полігонометрія II розряду) з визначенням координат пунктів в умовній системі координат.

Нівелірні ходи II класу проходять по знаках піднімальної полігонометрії та деформаційних репера у прямому і зворотному напрямках для визначення деформацій тунелів з точністю визначення перевищень  $\pm 0,1$  мм.

Результатом первинного натурального обстеження технічного стану тунельних конструкцій ділянки тунелю, яка знаходиться в експлуатації, є така звітна технічна документація:

- карта дефектів (розгорнення внутрішньої поверхні оброблення тунелю з нанесенням усіх дефектів);
- відомість дефектів (відповідно до карти дефектів);
- поперечники контрольних кілець оброблення з нанесенням внутрішнього та зовнішнього контурів оброблення, а також із зображенням внутрішнього або проміжного шару гідроізоляції (у випадку її наявності);
- відомості про міцність матеріалу оброблення, яка визначається, як не руйнівними, так і прямими методами;
- відомість маркшейдерської зйомки оброблення з фактичним поздовжнім профілем (з додаванням креслення базової мережі спостережень);
- відомість результатів хімічного аналізу води в місцях теч;
- відомості про корозійний стан бетону, арматур та інших конструктивних елементів;
- технічний звіт з первинним аналізом стану конструкцій.

#### **4.3. Геофізичне обстеження фактичного стану породного масиву і контакту "оброблення - порода"**

Ця частина роботи має такі завдання:

- уточнення інженерно-геологічних умов на ділянці розташування тунелів;
- виявлення порожнистостей за обробленням;
- визначення будови породного масиву, виявлення в ньому зон ущільнення;
- визначення фактичних показників фізико-механічних властивостей порід;
- визначення стану матеріалу оброблення тунелів (каверни, внутрішні тріщини, дислокації).

Для вирішення зазначених завдань застосовуються такі методи дослідження:

- сейсмічне прозвучування породного масиву з тунелів;
- наземна сейсміка (метод переломлених хвиль);
- метод акустичної добротності;
- ультразвукові дослідження у свердловинах і шпурах.

Для визначення фактичної несучої здатності оброблень тунелів, які знаходяться в експлуатації, найбільш важливим є виявлення стану контакту "оброблення-порода". Тут важливо зафіксувати ділянки порожнистості в контактному шарі та кількісно оцінити фактичну деформативність контактного шару (коефіцієнт пружної відсічі породи).

Ця інформація виявляється методом акустичної добротності коливання оброблення тунелю. Метод заснований на аналізі акустичного коливання оброблення, порушеного каліброваним ударом у напрямку, нормальному до поверхні тунелю. У кожній точці робиться імпульсне порушення акустичних коливань в обробленні (ударами молотка по поверхні оброблення) і здійснюється їх приймання у безпосередній близькості від місця порушення. Для приймань коливань використовується задемпфований сейсмоприймач, що щільно притискається до поверхні оброблення.

Реєстрація процесу коливань здійснюється в аналоговому вигляді на магнітний носій за допомогою широкосмугового магнітофона.

На стадії обробки ці коливання за допомогою аналого-цифрового перетворювача (АЦП) перетворюються з аналогової форми запису в цифрову і оброблюються на комп'ютері за спеціальною програмою, що передбачає розрахунок числових значень двох параметрів: добротності коливань і їхньої максимальної амплітуди  $A$ . За параметром  $A$ , що є більш чутливим до стану контакту, будуються карти-розгорнення контактної поверхні "порода-оброблення" з необхідною густотою та детальністю. При цьому більш високі числові значення параметра  $A$  характеризують більш низьку якість контакту і навпаки:

$A \leq 4$  - стан контакту задовільний;

$4 < A \leq 10$  - поганий контакт оброблення тунелю з породою в заобробному просторі;

$A > 10$  - наявність заобробних порожнистостей.

Дослідження деформативних властивостей породи на контакті з обробленням здійснюється двома неруйнівними сейсмоакустичними методами:

- метод сейсмоакустичного профілювання;
- метод сейсмоакустичної томографії.

Сейсмоакустичне профілювання здійснюється методом переломлених хвиль. Порушення сейсмічних коливань здійснюється кувалдою. Для реєстрації використовується багатоканальна цифрова сейсмічна станція та сейсмоприймачі, які кріпляться алебастром до оброблення тунелю.

Результатом сейсмоакустичного профілювання є годографи (графіки) поздовжньої хвилі. Годографи інтерпретуються узагальненим методом Герглоца-Віхерта на ПЕОМ в інтерактивному режимі. У результаті інтерпретації будується швидкісний розріз заобробного простору в ізолініях швидкості поздовжніх хвиль.

Метод сейсмоакустичної томографії використовується при наявності двох, розташованих недалеко один від одного, тунелів. Метод полягає в просвічуванні заобробного простору між двома тунелями.

Сейсмічні приймачі кріпляться до оброблення одного тунелю, а порушення сейсмічних хвиль здійснюється з другого тунелю. Результатом цього методу також є швидкісний розріз.

По швидкісних розрізах - за значеннями швидкості поздовжньої хвилі визначаються значення модулів деформації породного масиву в заобробному просторі. Для цього виконується порівняння модулів деформації досліджуваних порід, отриманих раніше прямими методами, з результатами сейсмоакустичних досліджень. При цьому отримують кореляційні залежності, за якими й обчислюються значення модулів деформації.

Перехід від модуля деформації до значення питомого коефіцієнта відсічі породи здійснюється за формулою Гальоркіна

$$K_0 = \frac{E}{100(1 + \mu)}, \quad (39)$$

де  $K_0$  - питомий коефіцієнт відсічі породи;

$E$  - модуль деформації породи;

$\mu$  - коефіцієнт Пуассона породи в заобробному просторі.

Перехід від питомого коефіцієнта відсічі породи до розрахункового коефіцієнта відсічі здійснюється за формулою

$$K = \frac{K_0}{r}, \quad (40)$$

де  $K$  - розрахунковий коефіцієнт відсічі;

$r$  - радіус виробітку, м.

Таким чином, у результаті геофізичних досліджень заобробного простору тунелю одержують фактичні характеристики породи, які використовуються для визначення фактичного напружено-деформованого стану оброблення тунелю, що експлуатується.

#### **4.4. Визначення фактичних коефіцієнтів запасу міцності тунельних конструкцій в експлуатаційний період**

Фактична надійність тунельних конструкцій, які експлуатуються, визначається фактичними коефіцієнтами запасу міцності матеріалів тунельного оброблення.

Вище відзначалося, що фактичні запаси міцності тунельних конструкцій визначаються розрахунковим шляхом на основі використання розрахункових параметрів фактичних фізико-механічних характеристик конструкцій, отриманих при їхньому натурному обстеженні, і фактичних деформативних характеристик контактного шару між породою та обробленням, отриманих при геофізичному дослідженні заобробного простору.

Суть процесу визначення фактичних коефіцієнтів запасу міцності тунельних конструкцій, які знаходяться в експлуатації, полягає в такому обчислювальному процесі:

- визначення теоретичних запасів міцності конструкції на основі вихідних параметрів, отриманих з виконавчої технічної документації, що включає геометричні розміри конструкції, фізико-

механічні характеристики матеріалу, інженерно-геологічні показники породного масиву і гідрогеологічні показники, отримані в результаті вишукувань на стадії робочого проектування;

- визначення фактичного напружено-деформованого стану тунельної конструкції за допомогою статичного розрахунку цієї конструкції з використанням розрахункових параметрів, отриманих при натурних обстеженнях, характеристик форми та розмірів оброблення (еліптичність, уступи між блоками оброблення та між кільцями, розкриття стиків), його технічного стану (пошкодження матеріалу, корозія, тріщини і т.п.), фактичних характеристик піддатливості породи (коефіцієнти пружної відсічі), фактичних показників обводненості оброблення;

- визначення фактичних коефіцієнтів запасу міцності тунельної конструкції з використанням значень згинальних моментів.

### **Контрольні запитання для самоперевірки**

1. Назвіть етапи визначення фактичної надійності тунельних конструкцій.

2. Що обчислюється в результаті статичного розрахунку значення згинальних моментів і нормальних зусиль?

3. Що містить у собі програма натурного обстеження тунельної ділянки?

4. Якими трьома незалежними методами користуються з метою підвищення вірогідності результатів вимірювань?

5. Для яких випробувань використовують пристрій "Планшет"?

6. Яка технічна документація є результатом первинного натурного обстеження технічного стану тунельних конструкцій ділянки тунелю?

7. Які завдання має геофізичне обстеження фактичного стану породного масиву?

8. У чому полягає сутність методу сейсмоакустичного профілювання?



9. У чому полягає сутність методу сейсмоакустичної томографії?

10. У чому полягає суть процесу визначення фактичних коефіцієнтів запасу міцності тунельних конструкцій, які знаходяться в експлуатації?

### **Бібліографічний список**

1. Аронов, Р.И. Испытание сооружений [Текст] /Р.И. Аронов. – М.: Высш. шк., 1974. – 187 с.

2. Долидзе, Д.Е. Испытание конструкций и сооружений [Текст] / Д.Е. Долидзе. – М.: Высш. шк., 1975. – 252 с.

3. Експлуатація і реконструкція мостів [Текст] / Н.Є. Страхова, [та ін.]. – К.: Український транспортний університет, 2000. – 384 с.

4. Злочевский, А.Б. Методы регистрации и обработки результатов динамических испытаний конструкций [Текст] / А.Б. Злочевский. – М.: МИСИ, 1977. – 84 с.

5. Золотухин, Ю.Д. Испытание строительных конструкций [Текст] / Ю.Д. Золотухин. – Минск: Вышэйш. шк., 1983. – 207 с.

6. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений [Текст]: справ. пособие / Б.С. Касаткин [и др.]. – К.: Наук. думка, 1981. – 683 с.

7. Максимов, Л.С. Измерение вибраций сооружений [Текст] / Л.С. Максимов, И.С. Шейнин. – М.; Л.: Стройиздат, 1974. – 252 с.

8. Матвеев, В.К. Современные методы обследования автодорожных мостов, опыт Т.К.М. [Текст] / В.К. Матвеев, В.К. Блохин, О. В. Крутиков // Мосты: сб. тр. – М.: МГУПС, 1997. – 251 с.

9. Металлические конструкции [Текст] / под ред. М.М. Сахановского. – К.: Будівельник, 1976. – 252 с.

10. Настанови з ремонту бетонних і залізобетонних конструкцій мостів і труб, що експлуатуються [Текст]. – К.: ТОВ «Швидкій рух», 2006. – 276 с.

11. Новгородский, М.А. Испытание материалов, изделий и конструкций [Текст] / М.А. Новгородский. – М.: Высш. шк., 1971. – 326 с.

12. Обследование и испытания конструкций зданий и сооружений [Текст] / под ред. В.М. Калинина. – М.: Стройиздат, 2005.
13. Обследование и испытания сооружений [Текст] / под ред. О.В. Лузина. – М.: Стройиздат, 1987.
14. Содержание и реконструкция мостов [Текст] / В.О. Осипов [и др.]. – М.: Транспорт, 1986. – 327 с.
15. Почтовик, Т.Я. Методы и средства испытания строительных конструкций [Текст] / Т.Я. Почтовик, А.Б. Золочевский, А.И. Яковлев. – М.: Высш. шк., 1973.
16. Правила визначення вантажопідйомності балкових залізобетонних прольотних будов залізничних мостів. ЦП/0085 [Текст]. – К.: Транспорт України, 2002. – 404 с.
17. Содержание и реконструкция мостов [Текст] / под ред. В.О. Осипова. – М.: Транспорт, 1986. – 326 с.
18. Содержание, реконструкция, усиление и ремонт мостов и труб [Текст]: учебник для ВУЗов / под ред. В.О. Осипова, Ю.Г. Кузьмина. – М.: Транспорт, 1996. – 471 с.
19. Сердюков, В.М. Испытание сооружений [Текст] / В.М. Сердюков, А.Г. Григоренко, Л.И. Кривелев. – К.: Будівельник, 1976. – 200 с.
20. Технологические правила торкретирования кладки инженерных сооружений [Текст]. – М.: Транспорт, 1985. – 31 с.
21. Указания по испытанию прочности бетона в конструкциях и сооружениях неразрушающими методами с применением приборов механического действия [Текст]. – К.: Будівельник, 1967. – 79 с.
22. Тоннели и метрополитены [Текст] / В.Г. Храпов [и др.]. – М.: Транспорт, 1990. – 232 с.

## Предметний покажчик

- Вертикальні удари 132, 162  
вібромарка 139  
віброметр 140  
віброперетворювач 144  
відомість дефектів 46, 175  
відбір зразків  
- бетону 22  
- деревини 23  
- металевих конструкцій 21  
вимірювання  
- вертикальних коливань 140  
- горизонтальних коливань 142  
випробування 8  
внутрішнє тертя 129  
Гідравлічні пульсатори 137  
горизонтальні удари 133  
Дефектоскопія матеріалів і з'єднань 20  
динамічні випробування 122, 130  
динамометри 68, 102  
домкрати  
- гвинтові 71  
- гідравлічні 70  
- неперіодичні 124  
- періодичні 124  
Метод підсікання 19  
механічні тензометри 98  
Навантаження  
- вібраційне 134  
- еталонне 46  
- зосереджене 63  
- рухоме 72, 122  
- ударне 132  
натяжні пристрої 67  
несуча здатність 48  
Обстеження 8, 12  
обмірювання 12  
огляд 7, 13  
огляд об'єкта в натурі 12  
ознайомлення з документацією 12  
опорні моменти 115  
Підвішування вантажів 65, 66  
похилі удари 133  
прилади для вимірювання товщини захисного шару бетону та пошуку арматури  
- "ИЗС-10Н" 24

Епюорограма 156, 157

Індикатори 88

Карта дефектів 175  
коливання

- автоколивання 126
- гармонійні 124
- власні 125
- змушені 126, 134, 149
- молоток М. П. Кашкарова 33
- "Онiкс-2,4" 38
- "ОНIКС-ОС" 44
- прес-насос ГПНВ-5 35
- "Пульсар-1,0" 39
- Склерометр Шмiдта 36
- типу КМ 32
- типу ХПС 34

прогиномiри з дротяним зв'язком 83

пристрiй "Планшет" 173

Режими випробування 77  
розподiленi навантаження

- великi штучнi вантажi 60
- вико рист ання тиск у повіт ря 62
- дрiбнi штучнi вантажi 57
- навантаження водою 61
- сипучi матерiали 57

- "Пошук - 2,3" 26

- "Пошук - 2,4" 26

прилади для неруйнiвного методу контролю мiцностi бетону

- "DIGI-Schmidt 2" 41

- "Дефектоскоп А 1220" 43

Статичнi випробування

- конструкцiй, якi експлуатуються 49

- науково-дослiднi 49

- приймальнi 49

- при сер iйн ом у виг ото вле ннi 49

Твердiсть 48

тензорезистори

- дротовi 96, 97

- напiвпровiдниковi 96

- петлевi дротовi 96

- фольговi 96

товщинометрiя 20

трiщиностiйкiсть 48

тунельний шаблон 172

Щiлиномiри 18

розміщення приладів при

- вимірюванні деформацій  
107

- вимірюванні кутів нахилу  
105

- вимірюванні прогинів 105

розподільні пристрої 64



