

---

# Оглавление

---

Введение.....	6
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ... 7	7
1.1. Методика модельных исследований.....	7
1.1.1. Условия подобия при проведении модельных исследований.....	8
1.1.2. Вибростенд для модельных исследований.....	13
1.1.3. Виброизмерительная аппаратура для модельных исследований... 15	15
1.2. Методика натуральных исследований.....	15
1.2.1. Проблема возбуждения колебаний в натуральных конструкциях.....	16
1.2.2. Принципиальная схема работы вибраторов направленного действия.....	17
1.2.3. Конструкция привода вибромашины.....	19
1.2.4. Особенности конструкции вибромашины.....	22
1.3. Виброизмерительная аппаратура для полигонных и натуральных исследований.....	24
1.3.1. Измерительная техника для проведения экспериментов.....	25
1.3.2. Программно-аппаратный комплекс автоматизации измерений АСTest.....	27
1.3.3. Метрологическое обеспечение экспериментов.....	29
1.4. Натурные исследования на полигоне МГСУ в г. Мытищи.....	29
1.4.1. Организация испытательного полигона и методы проведения эксперимента.....	29
1.4.2. Результаты исследования.....	33
2. ИССЛЕДОВАНИЯ ВЫСОКИХ БЕТОННЫХ ПЛОТИН.....	44
2.1. Исследования сейсмостойкости плотины массивно-контрфорсного типа на крупномасштабной модели в полигонных условиях.....	44
2.1.1. Выбор площадки для создания полигона.....	48
2.1.2. Изучение геологической структуры и планировка площадки-полигона.....	52
2.1.3. Исследование динамических характеристик площадки для сооружения модели.....	54
2.1.4. Проектирование и изготовление фрагмента модели плотины.....	62
2.1.5. Измерительная техника.....	71
2.1.6. Методика исследований.....	72
2.1.7. Результаты исследований.....	74
2.2. Натурные динамические исследования массивно-контрфорсной плотины.....	99
2.2.1. Общий подход к проблеме.....	99
2.2.2. Использование ударных волн специальных взрывов.....	104

2.2.3. Использование специального мощного вибратора (вибромашины) . . . . .	131
2.2.4. Использование записей слабых землетрясений . . . . .	148
2.3. Натурные исследования динамических характеристик плотины Саяно-Шушенской ГЭС . . . . .	165
2.3.1. Краткое описание конструкции плотины . . . . .	165
2.3.2. Методика проведения экспериментов . . . . .	165
2.3.3. Результаты экспериментальных исследований . . . . .	169
<b>3. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ . . . . .</b>	<b>183</b>
3.1. Модельные исследования реакторного отделения АЭС с ВВЭР-1000 . . . . .	183
3.1.1. Конструкция здания, модель, методика экспериментов . . . . .	183
3.1.2. Результаты исследований . . . . .	187
3.2. Натурные исследования реакторного отделения с ВВЭР-1000 . . . . .	193
3.2.1. Объект исследования. Общая характеристика. Состояние строительных конструкций в период исследования . . . . .	195
3.2.2. Эксперименты с использованием вибромашины . . . . .	198
3.2.3. Эксперименты с использованием импульсной (ударной) нагрузки . . . . .	203
3.2.4. Эксперименты с использованием сейсмического эффекта специальных взрывов . . . . .	203
3.2.5. Результаты исследований . . . . .	207
3.3. Натурные исследования строительства строительных конструкций Калининской атомной электростанции (КАЭС) . . . . .	222
3.3.1. Особенности конструкции реакторного отделения . . . . .	222
3.3.2. Особенности конструкции машзала . . . . .	226
3.3.3. Результаты исследований . . . . .	229
3.4. Динамические исследования 4-го энергоблока и спецкорпуса Нововоронежской АЭС (НВАЭС) . . . . .	256
3.4.1. Краткое описание конструкции главного корпуса и спецкорпуса . . . . .	256
3.4.2. Методика проведения исследований . . . . .	264
3.4.3. Результаты измерений колебаний главного корпуса и спецкорпуса . . . . .	268
3.4.4. Расчет динамических характеристик главного корпуса по схеме плоской рамы . . . . .	326
3.4.5. Расчет динамических характеристик главного корпуса НВАЭС как пространственной системы . . . . .	332
3.5. Динамические исследования строительных конструкций реакторного отделения атомной станции теплоснабжения (АСТ) . . . . .	340
3.5.1. Описание конструктивной схемы АСТ и моделей . . . . .	340
3.5.2. Порядок проведения экспериментов . . . . .	344
3.5.3. Результаты исследований . . . . .	344
<b>4. ДИНАМИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЖИЛЫХ И ОБЩЕСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ . . . . .</b>	<b>354</b>
4.1. Комплексные динамические исследования 16-этажного жилого дома . . . . .	354
4.1.1. Описание объекта и задача исследования . . . . .	354
4.1.2. Монтаж вибромашины на объекте испытаний . . . . .	355

4.1.3. Размещение приборов на здании в процессе проведения экспериментов . . . . .	358
4.1.4. Результаты измерений фоновых колебаний здания . . . . .	360
4.1.5. Результаты измерений поперечных колебаний здания, создаваемых вибромашиной . . . . .	361
4.1.6. Анализ полученных экспериментальных результатов динамических испытаний здания с позиций экстраполяции их на максимальную расчетную сейсмическую нагрузку 9 баллов . . .	373
4.2. Изучение эффективности виброизоляторов фирмы «Вибросейсмозащита» на примере жилых многоэтажных зданий, возведенных вблизи тоннелей метро мелкого заложения. . . . .	378
4.2.1. Результаты измерений колебаний в точках на грунте . . . . .	380
4.2.2. Результаты измерений вибраций в т. 2 (на грунте) и 3 (в подвале 18-этажного здания с виброизоляцией) . . . . .	385
4.2.3. Результаты измерений вибраций в т. 3 (в подвале) и 4 (над т. 3 на отметке пола 3-го этажа) 18-этажного здания с виброизоляцией. . . . .	391
4.2.4. Результаты измерений вибраций на 18-м этаже 18-этажного здания с виброизоляцией . . . . .	399
4.2.5. Измерения вибраций на 2-м этаже 22-этажного здания с виброизоляцией . . . . .	403
4.2.6. Измерение вибраций в 18-этажном здании без виброизоляции . . .	407
4.3. Динамический мониторинг 8-этажного каркасного здания. . . . .	414
4.3.1. Особенности конструкции здания. . . . .	414
4.3.2. Результаты измерений колебаний здания до проходки туннеля . . .	417
4.3.3. Результаты измерения колебаний здания после проходки туннеля . . . . .	426
4.4. Натурные динамические исследования купола здания гипермаркета, возведенного в г. Волжском для установления соответствия его расчетным показателям . . . . .	431
4.4.1. Краткое описание несущих конструкций . . . . .	432
4.4.2. Содержание экспериментов . . . . .	432
4.4.3. Организация и проведение экспериментов. . . . .	434
4.4.4. Результаты проведенного эксперимента . . . . .	436
4.4.5. Анализ результатов экспериментов и расчетов. . . . .	458
4.5. Определение динамических характеристик высотных зданий . . . . .	461
4.5.1. Измерения динамических характеристик «сталинской» высотки по адресу: Садово-Кудринская площадь, дом 1 . . . . .	462
4.5.2. Измерения динамических характеристик административного здания. . . . .	467
4.5.3. Определение частот собственных колебаний 40-этажного здания (жилой комплекс «Северный парк» по адресу: Москва, Ленинградское шоссе, 25) . . . . .	471
4.5.4. Определение частот собственных колебаний 40-этажного здания на ул. Маршала Жукова в Москве. . . . .	475
Заключение . . . . .	480
Библиографический список . . . . .	482

## Введение

Настоящая монография посвящена натурным и модельным экспериментальным динамическим исследованиям строительных конструкций гидротехнических сооружений, атомных электростанций, жилых и общественных зданий, проведенным примерно с конца 1960-х гг. по 2011 г. В монографию включены только наиболее интересные результаты, полученные в этот период. Целью исследований было изучение динамических явлений в строительных конструкциях, связанных с техногенными вибрациями различного происхождения, оценкой сейсмостойкости и вибрационной прочности конструкций, оценкой влияния специальных мероприятий по виброизоляции, а также изучение изменений динамических характеристик зданий, обусловленных их конструктивными изменениями. Мы полагаем, что динамические характеристики строительных конструкций (частоты и формы собственных колебаний, логарифмические декременты колебаний) сами по себе представляют тонкий инструмент анализа их состояния. При этом, как показала наша практика, современные методы динамических расчетов сложных инженерных конструкций, при всех их огромных возможностях, часто дают результаты весьма далекие от реальных. И это связано не с недостатками численных методов, а с неопределенностью некоторых параметров расчетных моделей. В расчетную модель, как правило, закладываются только проектные характеристики. Это касается свойств материалов несущих конструкций, характера связей между элементами конструкций, физико-механических свойств грунтового основания. Для самонесущих элементов в виде различного рода перегородок, навесных панелей и некоторых других элементов конструкций, в лучшем случае, в расчетах учитывается их масса. В действительности, как показали наши исследования, реальные свойства конструкций могут существенно отличаться от проектных, и при динамических расчетах необходимо учитывать также жесткость ненесущих конструкций. По нашему мнению, дальнейший прогресс в динамических расчетах строительных конструкций связан с накоплением данных экспериментальных натурных исследований. Монография адресована инженерам-проектировщикам, научным работникам и студентам старших курсов строительных специальностей различного направления.

---

# 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

---

Экспериментальные исследования динамических явлений в строительных конструкциях зданий и сооружений, представленные в данной работе, осуществлялись двумя способами: 1) модельные динамические исследования; 2) натурные динамические исследования.

В первом случае исследования проводились в лабораторных условиях или на специальном полигоне, на моделях конструкций, геометрически подобных натуре. Динамические нагрузки на конструкции в этих случаях создавались либо с помощью специального вибростенда, либо на специальном полигоне с помощью короткозамедленных камуфлетных взрывов. Регистрация динамических явлений в моделях производилась виброизмерительным комплексом для модельных исследований. Для пересчета результатов исследований на натуру использовались формулы, полученные на основе анализа размерностей.

Во втором случае исследования проводились на реальных натуральных конструкциях. При этом использовались различные источники возбуждения колебаний, включая мощную вибромашину и специальные взрывы.

Ниже мы подробнее остановимся на методике модельных и натуральных динамических исследований.

## 1.1. Методика модельных исследований

Для проведения модельных динамических исследований в лабораторных условиях необходимо решить следующие вопросы:

– выполнить определенные условия подобия, позволяющие однозначно пересчитывать полученные результаты на натурные конструкции;

– определить масштаб модели и материал для ее изготовления, что связано с конструкцией и характеристиками вибростенда, переходными устройствами для закрепления модели, специальными вибраторами для создания динамических нагрузок и др. Особого внимания

требуют вопросы регистрации, обработки и анализа динамических параметров с учетом качественных изменений произошедших в последние годы в измерительной технике.

### 1.1.1. Условия подобия при проведении модельных исследований

Физическое моделирование основано на известном понятии о подобии явлений: два явления называются подобными, если по заданным характеристикам одного можно получить характеристики другого умножением на постоянные коэффициенты (масштабы, множители подобия).

Среди трудов, посвященных этой проблеме, можно выделить работы Л. И. Седова, В. Б. Геронимуса, М. В. Кирпичева, А. Г. Назарова, Г. С. Варданыяна, Д. В. Монахенко. В работах последних трех авторов большое внимание уделяется «смягчению» условий моделирования и за счет этого расширению возможностей метода. В этих целях А. Г. Назаровым введено понятие «расширенного механического подобия твердых деформируемых тел»; Г. С. Варданыяном разработана «аксиоматическая теория размерностей и ее применение в механике деформируемого твердого тела»; Д. В. Монахенко предложена «линейная теория моделирования».

Физическое моделирование используется и в настоящей работе в качестве одного из методов изучения динамических явлений в различных сооружениях. При этом формулы для пересчета изучаемых параметров с модели на натуру могут быть получены либо на основе теории подобия с использованием метода сил, либо на основе анализа размерностей.

Примем следующие обозначения для характерных значений ряда параметров, являющихся существенными для изучаемых явлений:

$L$  — линейные размеры;

$t$  — промежутки времени;

$\rho$  — плотность материала;

$E$  — модуль упругости;

$\varepsilon$  — относительные деформации;

$U$  — перемещения;

$P$  — силы;

$V$  — скорости;

$W$  — ускорения;

$\sigma$  — напряжения;

$\mu$  — коэффициент Пуассона;

$\delta$  — логарифмический декремент колебаний.

Введем обозначения: для параметров природы — индекс «Н», для параметров модели — индекс «М».

Рассмотрим сначала подобие на основе метода сил, который можно сформулировать следующим образом: «две системы ведут себя подобным образом, если выполняются геометрическое, кинематическое и динамическое подобия», которые выполняются, «если две системы геометрически подобны, и если безразмерные отношения всех существенных для данного процесса сил одинаковы в этих системах».

Для условий динамического подобия существенными являются инерционные силы

$$\frac{P_H L_H}{m_H V_H^2} = \frac{P_M L_M}{m_M V_M^2} = \text{idem}.$$

Это выражение представляет общий закон динамического подобия и называется обычно критерием подобия Ньютона. Из него могут быть получены некоторые частные случаи. Например, при преобладающем влиянии сил тяжести — критерий подобия Фруда

$$\frac{V_H^2}{g_H L_H} = \frac{V_M^2}{g_M L_M} = Fr,$$

при преобладающем влиянии сил упругости и сил инерции — критерий подобия Коши

$$\frac{V_H^2 \rho_H}{E_H} = \frac{V_M^2 \rho_M}{E_M} = Ca.$$

При этом для одновременного удовлетворения критериям подобия Коши и Фруда необходимо выполнить условие

$$\frac{E_H \rho_M}{E_M \rho_H} = \frac{L_H}{L_M} = \lambda.$$

Для модельных исследований крупных сооружений, линейные размеры которых достигают 100 м и более, выполнение последнего условия при реальных геометрических масштабах  $\lambda = 100 \dots 500$  связано с очень жесткими требованиями к модельным материалам. Поэтому во многих случаях, ограничиваемых линейно-упругой постановкой задачи, модельные исследования проводятся на основе критерия подобия Коши.

В настоящее время в связи с постановкой и решением все более сложных задач физического моделирования метод сил имеет ограни-

ченное применение. В то же время значительное развитие в решении различных задач физического моделирования получил метод анализа размерностей. Ниже мы применим этот метод к выводу формул пересчета с модели на натуру для ряда характерных параметров изучаемого процесса. При этом в качестве основы для получения таких формул будем пользоваться работой Г. С. Варданяна. Запишем сначала в его редакции формулировку  $\pi$ -теоремы: число  $r$  безразмерных комплексов  $\pi$  равно числу  $n$  всех физически размерных величин, существенных для процесса, за вычетом числа первичных величин  $m$ .

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние конструкции, для которой исследуемый процесс можно представить в виде функциональной зависимости

$$F(\sigma, \varepsilon, U, E, P, L, \rho, t, W, \delta, \mu). \quad (1.1)$$

В механической системе единиц  $L, P, T$  величины, входящие в (1.1), имеют следующие размерности:

$$\begin{aligned} [L] = [U] = L; [\varepsilon] = [\delta] = [\mu] = 1; [P] = P; [\sigma] = [E] = PL^2; \\ [\rho] = PT^2L^{-4}; [t] = T; [W] = LT^{-2}. \end{aligned} \quad (1.1.1)$$

Таким образом, количество величин, определяющих изучаемое явление,  $n = 11$ , а количество первичных величин  $m = 3$ , тогда  $n - m = 8$  — количество безразмерных комплексов, соответствующих исследуемому процессу:

$$\begin{aligned} \pi_1 = \frac{\sigma}{PL^{-2}}; \pi_2 = \frac{E}{PL^{-2}}; \pi_3 = \frac{U}{L}; \pi_4 = \frac{W}{LE^{-2}}; \pi_5 = \frac{\rho}{PL^{-4}T^2}; \\ \pi_6 = \varepsilon; \pi_7 = \mu; \pi_8 = \delta. \end{aligned} \quad (1.1.2)$$

Комбинируя полученные комплексы, можно ввести новые критерии:

$$\begin{aligned} \pi'_1 = \pi_1/\pi_2 = \sigma/E; \pi'_2 = \pi_2/\pi_5 = ET^2L^{-2}\rho^{-1}; \pi'_3 = \pi_4/\pi'_2 = W\rho L/E; \\ \pi'_4 = \pi_5/\pi_4 = \rho W/PL^{-3}. \end{aligned} \quad (1.1.3)$$

На основании полученных критериев имеем следующие формулы для пересчета ряда параметров с модели на натуру:

$$\text{время, периоды колебаний } T_H = T_M \lambda \sqrt{\frac{E_M \rho_H}{E_H \rho_M}}; \quad (1.2)$$



$$\text{ускорения} \quad W_H = W_M \frac{L_M E_H \rho_M}{L_H E_M \rho_H}; \quad (1.3)$$

$$\text{напряжения} \quad \sigma_H = \sigma_M E_H / E_M; \quad (1.4)$$

$$\text{перемещения} \quad U_H = \lambda U_M; \quad (1.5)$$

$$\text{нагрузки} \quad P_H = \frac{W_H \rho_H L_H^3}{W_M \rho_M L_H^3} P_M. \quad (1.6)$$

При этом должны быть соблюдены условия:

$$\mu_H = \mu_M; \delta_H = \delta_M; \varepsilon_H = \varepsilon_M. \quad (1.7)$$

Последнее условие требует выполнения определенного соотношения между нагрузкой, геометрическими размерами и модулем упругости модели, что ограничивает возможности метода. В то же время можно существенно упростить задачу моделирования и за счет этого расширить возможности метода, если принять условие  $\varepsilon_H \neq \varepsilon_M$ . При этом нарушается геометрическое подобие модели натуре. Однако при малых деформациях, которые обычно имеют место в реальных конструкциях и при ограничении рамками линейно-упругой задачи, это условие можно допустить.

Для получения критериев подобия при  $\varepsilon_H \neq \varepsilon_M$  можно применить теорию подобия с использованием, например, понятия «расширенного механического подобия», предложенного А. Г. Назаровым. А можно применить анализ размерностей, как это показано в работе Г. С. Варданяна. Воспользуемся последним, для чего примем новую единицу измерения  $U = [U]$ , не совпадающую с единицей длины  $L$ . Тогда величины, входящие в (1.1), будут иметь следующие размерности:

$$[L] = L; [U] = U; [\delta] = [\mu] = 1; [P] = P; [\sigma] = PL^{-2}; [\varepsilon] = [U]/[L] = UL^{-1}; \\ [E] = [\sigma]/[\varepsilon] = PL^{-1}U^{-1}; [\rho] = PT^2L^4; [t] = T; [W] = LT^2. \quad (1.8.1)$$

Теперь  $n = 11, m = 4, n - m = 7$ .

В результате получаем семь критериев подобия:

$$\pi_1 = \frac{\sigma}{PL^{-2}}; \pi_2 = \frac{E}{PL^{-1}U^{-1}}; \pi_3 = \frac{\varepsilon}{UL^{-1}}; \pi_4 = \frac{W}{LT^{-2}}; \\ \pi_5 = \frac{\rho}{PL^{-4}T^2}; \pi_6 = \mu; \pi_7 = \delta. \quad (1.8.2)$$

Как и в предыдущем случае, комбинируя полученные комплексы, можно ввести новые критерии:

$$\begin{aligned}\pi'_1 = \pi_1/\pi_2 = \sigma U/EL; \quad \pi'_2 = \pi_2/\pi_5 = ET^2U/L^3 \rho; \quad \pi'_3 = \pi_3\pi_2 = E\varepsilon/PL^{-2}; \\ \pi'_4 = \pi_4/\pi'_2 = \rho WL^2/EU; \quad \pi'_5 = \pi_5\pi_4 = W\rho/PL^{-3}.\end{aligned}\quad (1.8.3)$$

Эти критерии приводят к следующим формулам для пересчета ряда параметров с модели на натуру:

$$\text{время, периоды колебаний } T_H = T_M \sqrt{\frac{E_M \rho_H U_M L_H^3}{E_H \rho_M U_H L_M^3}}; \quad (1.9)$$

$$\text{напряжения } \sigma_H = \sigma_M E_H U_M L_H / (E_M U_H L_M), \quad (1.10)$$

$$\text{перемещения } U_H = \frac{E_M P_H L_M}{E_H P_M L_M} U_M; \quad (1.11)$$

$$\text{деформации } \varepsilon_H = \varepsilon_M \frac{P_H E_M L_M^2}{P_M E_H L_H^2}. \quad (1.12)$$

Выразим с помощью  $\pi'_5$  нагрузки  $P$  через инерционные силы

$$\frac{P_H}{P_M} = \frac{W_H \rho_H L_H^3}{W_M \rho_M L_M^3}, \quad (1.13)$$

тогда формулы пересчета для перемещений и деформаций запишутся в следующем виде:

$$U_H = \frac{W_H \rho_H E_M L_H^2}{W_M \rho_M E_H L_M^2} U_M; \quad (1.14)$$

$$\varepsilon_H = \frac{W_H \rho_H E_M L_H}{W_M \rho_M E_H L_M} \varepsilon_M. \quad (1.15)$$

Практическая реализация вышеуказанных зависимостей при подготовке к проведению экспериментов на моделях позволяет нам точно подобрать материалы для изготовления моделей, разработать конструкцию специального вибростенда для моделирования динамических нагрузок, подобрать и отладить комплекс измерительной аппаратуры, разработать методику подготовки и проведения опытов.

## 1.1.2. Вибростенд для модельных исследований

Вибростенд для модельных динамических исследований сооружений должен удовлетворять ряду требований, обеспечивающих его эффективное использование при изучении динамических явлений в конструкциях:

- его размеры должны быть относительно небольшими, но достаточными для испытания моделей различных масштабов, обеспечивающих воспроизведение всех особенностей конструкций сооружений; его подвижный стол (виброплощадка) должен быть, при заданных размерах максимально легким и максимально жестким, чтобы собственные частоты колебаний его были выше рабочего диапазона частот;

- подвеска (опорное крепление) подвижного стола должна обеспечивать строго горизонтальные колебания заданного направления;

- возбудитель колебаний подвижного стола (вибратор или другое устройство) должен обеспечивать требуемые виды динамических нагрузок в заданных диапазонах амплитуд и частот колебаний.

Для подвижного стола-платформы были приняты размеры в плане  $1 \times 1$  м. Такие размеры вибростола позволяют размещать на нем модели сооружений примерно в масштабе от 1 : 10 (небольшие здания) до 1 : 100 (здания АЭС, фрагменты высоких плотин).

Конструкция подвижного стола имеет сложную слоистую структуру и изготовлена на одном из заводов аэрокосмического направления по специальной технологии. Слоистая структура стола (тонкие пластинки металла из легкого сплава, перемежающиеся пластинами специального пластика) в сочетании с ячеистой конструкцией обеспечивает решение вышеуказанных задач: виброгасящий эффект собственных колебаний, легкость и жесткость конструкции.

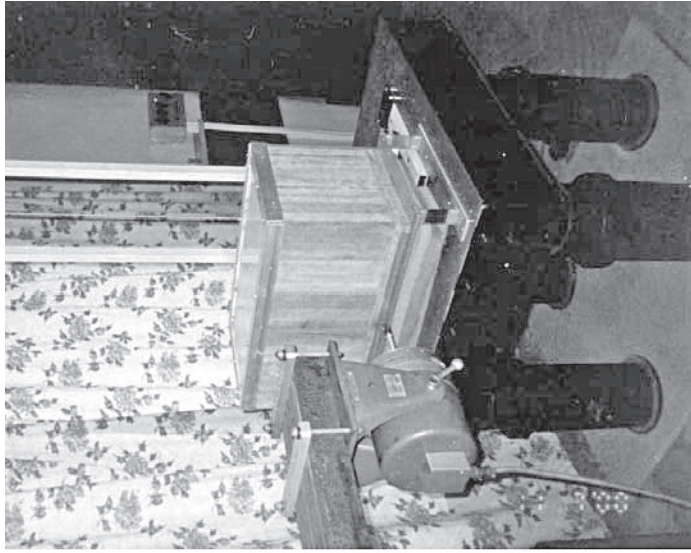
Подвижный стол опирается на четыре специальные пневмоопоры, обеспечивающие виброизоляцию стола от основания. Для крепления моделей сооружений поверхность стола имеет по всей площади систему резьбовых отверстий под винты MS.

Для создания динамических воздействий на вибростол и расположенную на нем модель сооружения используются два независимых возбудителя:

- вибратор электродинамической системы (ВЭДС), позволяющий создавать гармонические колебания в диапазоне 4...40 000 Гц от собственного генератора, или сложные колебания, моделирующие реальное воздействие при подаче на вход усилителя сигнала от внешнего источника;



а



б

Рис. 1.1. Лаборатория модельных динамических исследований:

а — общий вид лабораторной установки с вибростендом, установленной на нем моделью и измерительной аппаратурой;  
б — испытание модели здания коробчатой конструкции

– возбудитель импульсных нагрузок (специальное устройство маятникового типа, позволяющее регулировать величину и длительность импульса).

Общий вид вибростенда с вибратором ВЭДС и установленной на подвижном столе моделью испытуемого объекта приведен на рис. 1.1.

### 1.1.3. ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ МОДЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Небольшие размеры моделей сооружений определяют специфические требования к измерительной технике. Так, датчики, укрепляемые на модели, должны иметь небольшую массу и размеры (относительно массы и размеров модели); рабочий диапазон частот датчиков и соответствующей аппаратуры (усилители, частотомеры и др.) должен быть примерно на порядок выше, чем это необходимо при натуральных исследованиях. Практически требуемый рабочий диапазон составляет 10...1000 Гц.

Этим требованиям вполне удовлетворяют пьезоакселерометры типа КД 35 фирмы «Роботрон» или типа 2221 Д (ЕЕ 0003) фирмы «Брюль и Кьер». Их масса не превышает 20 г, максимальная чувствительность около 2 мВ/мс<sup>-2</sup>. Они используются обычно с интегрирующими усилителями, что позволяет, кроме ускорений, измерять также виброскорости и вибро смещения. В нашем случае использовались датчики и трехканальный усилитель фирмы «Роботрон». Усилитель снабжен стрелочным индикатором и электроннолучевой трубкой, позволяющими наблюдать за параметрами процесса в реальном времени. Усилитель имеет выходы на внешний регистратор, в качестве которого использовался персональный компьютер, снабженный платой АЦП.

## 1.2. Методика натуральных исследований

Экспериментальные натурные динамические исследования зданий и сооружений, проводились:

- 1) на специально оборудованном полигоне;
- 2) в естественных условиях.

В первом случае в условиях полигона динамические нагрузки на конструкции создавались с помощью мощной вибромашины. Во вто-

ром случае исследования проводились в реальных натуральных условиях и при этом использовались различные источники возбуждения колебаний. Далее мы подробнее остановимся на методике натуральных динамических исследований.

### 1.2.1. ПРОБЛЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ В НАТУРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Для динамических исследований натуральных конструкций требуется изучать особенности их колебаний. При этом целью исследований обычно является определение их динамических характеристик, т. е. частот и форм собственных колебаний, декрементов колебаний. Особый интерес представляет изучение нелинейных колебаний: изменение их динамических характеристик с изменением нагрузок или амплитуд колебаний. Для достижения этих целей необходимо использовать какой-то возбудитель колебаний. В качестве таких возбудителей могут быть использованы колебания:

- вызванные микросейсмами;
- техногенного характера (от движения транспорта, работы оборудования и т. д.);
- специально создаваемые нештатным включением какого-либо оборудования (мостовые краны, электромоторы большой мощности и т. д.);
- создаваемые специальными вибраторами.

Нами использовались все эти варианты возбудителей колебаний, однако наиболее эффективным, хотя и более трудоемким, является последний вариант — использование специальных вибраторов. Этот вариант потребовал выполнения работ по созданию такого возбудителя колебаний. В мировой практике разработаны и используются вибраторы различного принципа действия и различных конструктивных схем: электродинамические, гидравлические, дебалансные. Для решения наших задач были выбраны вибраторы дебалансного типа направленного действия. Эти вибраторы могут, в свою очередь, иметь различные конструктивные решения: одновалные (с совмещенными по оси валами), двухвалными, с вертикальными валами, с горизонтальными валами. После анализа этих конструктивных схем был выбран двухвальный вибратор с горизонтальным расположением валов. Его основными достоинствами являются относительная простота конструкции и надежность при эксплуатации в полевых условиях.

### 1.2.2. ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА РАБОТЫ ВИБРАТОРОВ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

Принципиальная схема работы вибратора дебалансного типа с двумя параллельно расположенными валами приведена на рис. 1.2. При вращении валов в противоположных направлениях существуют положения: когда центры масс дебалансов 2 находятся в горизонтальной плоскости и направления центробежных сил 3 на обоих валах совпадают. В этот момент амплитуда горизонтальной силы 4 достигает максимального значения, что соответствует положению I и III на рис. 1.2.

Между эффективными положениями дебалансов I и III, которые во время работы вибромашины и создают требуемую горизонтальную силу, существуют промежуточные положения II и IV, в которых дебалансы противоположно направлены в вертикальной плоскости. В этом случае центробежные силы имеют противоположное направление и представляют собой пару сил, приводящую к качательным колебаниям корпуса вибратора, в то время как горизонтальная составляющая амплитуды силы равна нулю.

Амплитуда силы, развиваемая вибратором дебалансного типа, определяется по формуле

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

где  $\omega = 2\pi f$  — угловая скорость,  $\text{с}^{-1}$ ;  $f$  — частота вращения, Гц;  $r$  — эксцентриситет неуравновешенной массы, м.

Таким образом, при использовании дебалансных вибраторов создается воздействие на сооружение гармонического вида силы, величина которой изменяется пропорционально квадрату числа оборотов вибратора. Отсюда для поддержания постоянной величины нагрузки  $P$  при изменении частоты вращения дебалансных частей вибратора необходимы соответствующие изменения либо неуравновешенной дебалансной массы, либо ее эксцентриситета относительно оси вращения. При этом, учитывая квадратичную зависимость между величиной  $P$  и частотой воздействия  $f$ , а также основной интервал исследуемых частот (как правило, диапазон 0,5...15 Гц), условие постоянства нагрузки предполагает необходимость предусматривать для одного и того же вибратора возможность с изменением числа оборотов одновременно изменять и дебалансную массу, либо ее эксцентриситет в весьма значительных пределах. Так, если вибратор при фиксированных дебалансной массе  $m$  и ее эксцентриситете  $r$  создает

при частоте  $f = 5$  Гц необходимую по величине нагрузку, то для равного воздействия при  $f = 0,5$  Гц потребуется значение  $m$  или  $r$  увеличить в 100 раз; при  $f = 1$  Гц — увеличить в 25 раз; при  $f = 15$  Гц — уменьшить в 9 раз.

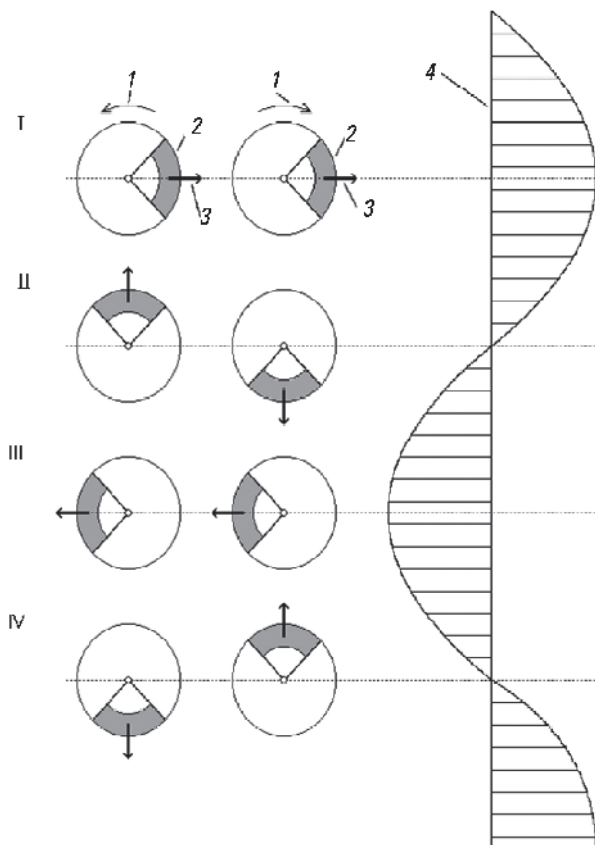


Рис. 1.2. Схема работы дебалансных вибраторов направленного действия

Таким образом, поддержание постоянной вибрационной нагрузки на всем интервале исследуемых частот становится технически трудно выполнимым и не удобным для эксплуатации в полевых условиях.



### 1.2.3. КОНСТРУКЦИЯ ПРИВОДА ВИБРОМАШИНЫ\*

Система привода должна обеспечивать плавную регулировку оборотов дебалансов в заданном диапазоне частот.

В практике организаций России (ЦНИИЭП жилища, ЦНИИСК) и других стран, использовавших подобного типа вибраторы, применялись различные виды приводов:

1) с электромотором переменного тока и механическим вариатором для регулировки оборотов дебалансов;

2) система мотор-генератор — мотор постоянного тока с системой регулировки его оборотов;

3) электромотор переменного тока с теристорным преобразователем частоты (ТПЧ) для регулировки его оборотов.

Первый тип привода, как показала практика, пригоден для мощностей до 30 кВт и не обеспечивает достаточно широкую регулировку оборотов. Второй тип привода — наиболее традиционный и широко используется в электрическом транспорте, однако, применительно к нашему случаю и при необходимой мощности 100 кВт, становится очень громоздким и тяжелым. К тому же, особенностью характеристики электромотора постоянного тока является уменьшение пускового момента при малых оборотах, что может сделать невозможным запуск вибраторов с большой массой дебалансов. Третий тип привода обладает тем же недостатком, что и второй. Кроме того, он не позволяет непосредственно регулировать обороты вибраторов в требуемом диапазоне частот, а также весьма капризен (неустойчив в работе).

Имея в виду негативные особенности всех трех описанных видов приводов, использовавшихся в разное время и в разных организациях для работы с дебалансными вибраторами, решено было изучить возможности гидравлического привода. Такие приводы широко используются для управления работой мощных экскаваторов, другой строительной техники. Для управления дебалансными вибраторами они никогда раньше не применялись. Были изучены рабочие характеристики гидроприводов и определена необходимая мощность гидромотора. На основе такого изучения было установлено, что гидравлический привод наилучшим образом отвечает требованиям управления дебалансными вибраторами, но обладает особенностями, которые потребовали их учета при проектировании самого блока привода и системы регулировки оборотов гидромотора.

---

\* Привод и сама вибромашина были целиком запроектированы кандидатом технических наук, доцентом В. В. Кузнецовым.

Конец ознакомительного фрагмента.  
Приобрести книгу можно  
в интернет-магазине  
«Электронный универс»  
[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)